

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Živilė DECKER

METALO KERAMINIŲ DANGŲ SU
VOLFRAMO KARBIDAIŠ LAZERINIS
APDOROJIMAS IR TYRIMAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (T 008)

Vilnius, 2024

Disertacija rengta 2017–2024 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. dr. Olegas ČERNAŠĖJUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Medžiagų inžinerija – T 008).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

doc. dr. Justinas GARGASAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Medžiagų inžinerija – T 008).

Nariai:

prof. dr. Onder ALTUNTAS (Eskişehir technikos universitetas, Turkijos respublika, Transporto inžinerija – T 003),

prof. dr. Audrius ČEREŠKA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Mechanikos inžinerija – T 009),

dr. Viktor GRIBNIAK (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Medžiagų inžinerija – T 008),

dr. Rasa KANDROTAITĖ JANUTIENĖ (Kauno technologijos universitetas, Medžiagų inžinerija – T 008).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2024 m. birželio 10 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto SRA-I posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vilniustech.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2024 m. gegužės 9 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto talpykloje <https://etalpykla.vilniustech.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto 2024-030-M mokslo literatūros knyga

<https://doi.org/10.20334/2024-030-M>

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2024

© Živilė Decker, 2024

zivile.decker@vilniustech.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Živilė DECKER

LASER PROCESSING AND
INVESTIGATION OF METAL-CERAMIC
COATINGS WITH TUNGSTEN CARBIDES

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MATERIALS ENGINEERING (T 008)

Vilnius 2024

The doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2017–2024.

Supervisor:

Prof. Dr Olegas ČERNAŠĖJUS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008).

The Dissertation Defence Council of the Scientific Field of Materials Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman:

Assoc. Prof. Dr Justinas GARGASAS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008).

Members:

Prof. Dr Onder ALTUNTAS (Eskisehir Technical University, Turkey, Transport Engineering – T 003),

Prof. Dr Audrius ČEREŠKA (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009),

Dr Viktor GRIBNIAK (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008),

Dr Rasa KANDROTAITĖ JANUTIENĖ (Kaunas University of Technology, Materials Engineering – T 008).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of the Scientific Field of Materials Engineering in the SRA-I Meeting Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p.m. on 10 June 2024**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vilniustech.lt

A notification on the intended defence of the dissertation was sent on 9 May 2024. A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Vilnius Gediminas Technical University repository <https://etalpykla.vilniustech.lt> and the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Šioje disertacijoje nagrinėjamos kombinuotu moderniu lazeriniu apdorojimo būdu suformuotos kompozicinės daugiafunkcės nikelio pagrindo su volframo karbidine keramika dangos. Tyrimams dangos buvo sukurtos taikant trijų etapų dangų technologiją: terminis miltelių purškimas, užpurkštos dangos perlydymas elektrinėje krosnyje ir dalinis dangos perlydymas lazeriu, suformuojant dangoje lygiagrečius takelius, kuriems būdingos metalo mechaninės savybės, struktūra, paviršiaus kietumas skiriasi nuo lazeriu neapdorotos dangos.

Darbo tikslui pasiekti darbe sprendžiami šie pagrindiniai uždaviniai: lazerinės nikelio pagrindo su volframo karbidais dangų technologijos tinkamų parametrų parinkimas ir dilimui bei korozijai atsparios kompozicinės metalo keraminės dangos suformavimas; suformuotų metalo keraminių dangų kokybinių charakteristikų priklausomybių nuo lazerinės dangų technologijos ir jos parametrų tyrimas.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros bei autorės publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, gaminieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatoma disertacijos struktūra bei disertacijos tema autorės paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose. Pirmajame skyriuje apžvelgiamos terminio purškimo technologijos, lazerinis paviršių apdorojimas, pagrindiniai jo ypatumai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai. Antrajame skyriuje aprašomos eksperimentams naudojamos medžiagos ir įranga, terminiu purškimu užpurkštų nikelio pagrindo dangų su volframo karbidais lazerinio apdorojimo metodika bei darbe taikomi medžiagų savybių tyrimo metodai. Trečiajame skyriuje pateikiami ir analizuojami, taikant kombinuotą dangų technologiją, sukurtų nikelio pagrindo su volframo karbidais dangų tyrimų rezultatai.

Disertacijos rezultatai pristatyti 5 moksliniuose straipsniuose: du iš jų – *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazės leidiniuose ir 3 konferencijų tezėse. Tyrimų rezultatai paskelbti 8 mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje.

Abstract

This dissertation examines composite multi-functional nickel-based coatings with tungsten carbide ceramics formed by a combined modern laser processing method. For research, coatings were created using a three-stage coating formation technology: thermal powder spraying, remelting of the sprayed coating in an electric furnace, and partial remelting of the coating by a laser, forming parallel tracks in the coating.

The work solved the following main tasks to achieve the goal: select the most optimal parameters of the laser coating formation technology of nickel base with tungsten carbides and the formation of a composite metal-ceramic coating resistant to wear and high-temperature corrosion and research the dependence of the qualitative characteristics of the formed metal-ceramic coatings on laser coating forming technology and its parameters.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, a summary of results, a list of used literature, and a list of the author's publications on the topic of the dissertation.

The introductory chapter discusses the research problem and the relevance of the work, describes the object of the research, formulates the purpose and tasks of the work, describes the research methodology, the scientific novelty of the work, the practical significance of the work results, and defended statements. At the end of the introduction, the structure of the dissertation, the author's publications and conference presentations on the topic of the dissertation are presented. The first chapter reviews thermal spraying technologies and laser surface processing. At the end of the chapter, conclusions are formulated and the tasks of the dissertation. The second chapter describes the materials and equipment used for the experiments, the methodology of laser processing of nickel-based coatings sprayed with thermal spraying, and the methods used for the investigation of material properties. The third chapter presents and analyses the results of coating research.

The results of the dissertation were presented in five scientific articles: two of them are publications of the Clarivate Analytics Web of Science database and 3 conference theses. Research results have been presented at eight scientific conferences in Lithuania and abroad.

Žymėjimai

Simboliai

α_{wet} – kontaktinis kampas tarp pagrindo paviršiaus ir dangos paviršiaus liestinės (angl. *the contact angle between the substrate surface and the tangent to the coating surface*);

E_g – konkretios medžiagos juostos tarpo energija (angl. *band gap energy of a particular material*);

I_0 – krintančios į medžiagos paviršių spinduliuotės intensyvumas (angl. *intensity of the radiation falling on the surface of the material*);

T_0 – fazių pusiausvyros temperatūra, °C (angl. *phase equilibrium temperature, °C*);

d_0 – spinduliuotės dėmės skersmuo (angl. *radiation spot diameter*);

I_a – šviesos intensyvumas (angl. *light intensity*);

m_e – sumažinta elektrono masė (angl. *reduced electron mass*);

z_1 – pakartotinio terminio poveikio gylis (angl. *depth of repeated thermal exposure*);

A – aplydyto sluoksnio skerspjūvio plotas (angl. *cross-sectional area of the cladding layer*);

B – aplydyto sluoksnio gylis (angl. *depth of the cladding layer*);

D – difuzijos gylis (angl. *diffusion depth*);

e – elektronų krūvis (angl. *electron charge*);

F – aplydymo tiekimo kiekis (angl. *amount of cladding supply*);

H – aplydyto sluoksnio aukštis (angl. *height of the cladding layer*);
 HRC – kietumas pagal Rokvelą (angl. *Rockwell hardness*);
 HV – kietumas pagal Vickersą (angl. *Vickers hardness*);
 I – ant paviršiaus krentančios spinduliuotės intensyvumas (angl. *intensity of radiation falling on the surface*);
 $I(z)$ – spinduliuotės intensyvumas perėjus medžiagos storį z (angl. *radiation intensity after passing the material thickness z*);
 P – lazerio galia (angl. *laser power*);
 R – paviršiaus atspindžio koeficientas (angl. *surface reflectance*);
 Ra – paviršiaus šiurkščio parametras, vidutinis aritmetinis profilio nuokrypis, μm (angl. *surface roughness parameter, arithmetic mean profile deviation, μm*);
 s – lazerinio apdirbimo žingsnis (angl. *laser processing step*);
 t – lazerio impulso trukmė (angl. *laser pulse duration*);
 T – temperatūra, $^{\circ}C$ (angl. *temperature, $^{\circ}C$*);
 V – aplydymo greitis (angl. *cladding speed*);
 W – aplydyto sluoksnio plotis (angl. *width of the cladding layer*);
 z – terminio poveikio gylis (angl. *depth of thermal exposure*);
 α – sugerties koeficientas (angl. *absorption coefficient*);
 γ – jonizacija (angl. *ionization*);
 ε – elektrinio lauko stipris (angl. *electric field strength*);
 ω – kampinis dažnis (angl. *angular frequency*).

Santrumpos

AD – išlydytos substrato medžiagos skerspjūvio plotas (angl. *cross-sectional area of the molten substrate material*);
 AN – aplydyto sluoksnio skerspjūvio plotas iki pradinio substrato paviršiaus (angl. *cross-sectional area of the coated layer to the original substrate surface*);
 CZ – aplydymo sritis (angl. *cladding zone*);
 DTA – diferencinė terminė analizė (angl. *differential thermal analysis*);
 EDS – energijos dispersinė spektroskopija (angl. *energy dispersive spectroscopy*);
 FS – liepsninis purškimas (angl. *flame spray*);
 HEF – didelis energijos srautas (angl. *high energy fluxes*);
 $HVOF$ – didelio greičio deguoninis liepsninis purškimas (angl. *high velocity oxygen fuel*);
 IZ – tarpinė sritis (angl. *interfacial zone*);
 MMK – metalo matricos keraminės dangos (angl. *metal matrix ceramic coatings*);
 PS – plazminis purškimas (angl. *plasma spraying*);

PTA – plazminis miltelinis suvirinimas (angl. *plasma powder deposition welding*);
RSD – rentgeno spindulių difrakcija (angl. *X-ray diffraction XRD*);
SEM – skenuojamoji elektroninė mikroskopija (angl. *scanning electron microscopy*);
SUB – substratas (angl. *substrate*);
TGA – termogravimetrinė analizė (angl. *thermogravimetric analysis*);
TPS – terminio poveikio sritis (angl. *heated affected zone HAZ*);
WC – volframo karbidas (angl. *tungsten carbide*), W – volframo simbolis periodinėje elementų lentelėje).

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	5
 1. TERMINIO PURŠKIMO IR LAZERINIO PAVIRŠIŲ APDOROJIMO TECHNOLOGIJOS BEI PAGRINDINIAI JŲ YPATUMAI	 7
1.1. Terminio purškimo technologijų apžvalga.....	7
1.1.1. Purkštinių dangų formavimo ir struktūros ypatumai	9
1.1.2. Terminiu būdu purkštų dangų formavimui naudojamos medžiagos.....	12
1.1.3. Terminio purškimo privalumai ir trūkumai	17
1.2. Lazerinis paviršių apdorojimas.....	18
1.2.1. Lazerinio apdorojimo procesas.....	20
1.2.2. Lazerinio aplydymo technologiniai parametrai	23
1.2.3. Sluoksnio savybės	25

1.2.4. Lazerio spinduliuotės ir apdorojamų medžiagų sąveika	27
1.2.5. Faziniai virsmai lazerio spindulio veikiamo metalo paviršiuje	30
1.2.6. Spinduliuotę sugeriančios dangos	34
1.2.7. Paviršiaus kietinimas lazeriu	35
1.2.8. Lazerinis paviršių legiravimas.....	40
1.2.9. Daugiakomponentės, savitės, korozijai ir dilimui atsparios dangos	43
1.2.10. Dviejų etapų, dangos nusodinimo ir lazerinio apdorojimo, technologijos ypatumai	46
1.3. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	52
 2. METALO KERAMINIŲ NIKELIO VOLFRAMO DANGŲ FORMAVIMO METODIKA, MEDŽIAGOS IR TYRIMO METODAI	55
2.1. Tyrimams naudotos medžiagos	56
2.1.1. Purškimo medžiagos.....	56
2.1.2. Substratas ir jo paruošimas.....	56
2.1.3. Purškimo įranga ir purškimo parametrai	57
2.1.4. Perlydymo elektrinėje krosnyje įranga ir parametrai.....	57
2.1.5. Lazerinio apdorojimo įranga ir apdorojimo parametrai.....	58
2.2. Darbe taikomi tyrimo metodai.....	64
2.2.1. Mikrostruktūros optinės mikroskopijos tyrimas	64
2.2.2. Skenuojamoji elektroninė mikroskopija ir rentgeno mikroanalizė.....	65
2.2.3. Rentgeno spindulių difrakcijos analizė.....	65
2.2.4. Dangų paviršiaus šiurkščio matavimas ir paviršiaus topografijos tyrimas.....	66
2.2.5. Kietumo ir mikrokietumo matavimai	66
2.2.6. Tribologinių savybių tyrimas.....	67
2.2.7. Abrazyvinio dilimo bandymai	68
2.2.8. Korozinio atsparumo analizė	68
2.2.9. Termogravimetrinė analizė.....	69
2.2.10. Diferencinė terminė analizė.....	70
2.3. Antrojo skyriaus išvados	70
 3. LAZERINIO APDOROJIMO POVEIKIO DANGŲ STRUKTŪRAI IR SAVYBĖMS TYRIMAI.....	73
3.1. Lazerinio apdorojimo poveikis dangų sandarai ir savybėms	73
3.1.1. Užpurkštų ir elektrinėje krosnyje perlydytų dangų sandaros ir mikrostruktūros tyrimai	74
3.1.2. Lazerių apdorotų dangų sandaros tyrimai.....	77
3.1.3. Lazerių apdorotų dangų mikrostruktūros tyrimo rezultatai	84
3.1.4. Lazerinio apdorojimo poveikis perlydytų dangų fazinei sudėčiai	89
3.1.5. Lazerių apdorotų dangų paviršiaus šiurkščio matavimų ir paviršiaus topografijos tyrimo rezultatai	91
3.1.6. Lazerių apdorotų dangų metalo kietumo ir mikrokietumo tyrimo rezultatai	95
3.1.7. Lazerių apdorotų dangų tribologinių savybių tyrimo rezultatai.....	99

3.1.8. Kompozicinių dangų abrazyvinio dilimo bandymo rezultatai.....	102
3.1.9. Kompozicinių dangų korozinio atsparumo analizė	105
3.1.10. Kompozicinių dangų termogravimetrinės ir diferencinės terminės analizės rezultatai	108
3.2. Trečiojo skyriaus išvados	110
BENDROSIOS IŠVADOS	113
REKOMENDACIJOS.....	115
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	117
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....	133
SUMMARY IN ENGLISH.....	135

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem	1
The relevance of the dissertation	2
The object of research	2
The aim of the dissertation	2
The tasks of the dissertation	3
The research methodology	3
Scientific novelty of the dissertation	4
The practical value of the research findings	4
Defended statements	4
Approval of the research findings	5
The structure of the dissertation	5
1. THERMAL SPRAYING AND LASER SURFACE PROCESSING TECHNOLOGIES AND THEIR MAIN CHARACTERISTICS	7
1.1. Overview of thermal spraying technologies.....	7
1.1.1. Features of spray coating formation and structure	9
1.1.2. Materials used for the formation of thermally sprayed coatings	12
1.1.3. Advantages and disadvantages of thermal spraying	17
1.2. Laser surface processing	18
1.2.1. Laser processing process	20
1.2.2. Technological parameters of laser cladding	23

1.2.3. Layer properties	25
1.2.4. Interaction of laser radiation and materials	27
1.2.5. Phase transformations on the surface of a metal exposed to a laser beam	30
1.2.6. Radiation absorbing coatings	34
1.2.7. Laser surface hardening	35
1.2.8. Laser alloying of surfaces	40
1.2.9. Multicomponent, self-lubricating, corrosion- and wear-resistant coatings	43
1.2.10. Features of two-stage deposition and laser post-processing technique ..	46
1.3. Conclusions of the First Chapter and formulation of dissertation tasks	52
 2. METAL CERAMIC NICKEL TUNGSTEN COATING METHODOLOGY, MATERIALS AND TESTING METHODS.....	55
2.1. Materials used for research	56
2.1.1. Spraying materials	56
2.1.2. Substrate and its preparation	56
2.1.3. Spray equipment and spray parameters	57
2.1.4. Remelting equipment and parameters in an electric furnace	57
2.1.5. Laser processing equipment and processing parameters	58
2.2. Research methods used in the work	64
2.2.1. Microstructure optical microscopy research	64
2.2.2. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis	65
2.2.3. X-ray diffraction analysis	65
2.2.4. Surface roughness measurement and surface topography research	66
2.2.5. Hardness and microhardness measurements.....	66
2.2.6. Analysis of tribological properties.....	67
2.2.7. Abrasion tests.....	68
2.2.8. Corrosion resistance analysis.....	68
2.2.9. Thermogravimetric analysis	69
2.2.10. Differential thermal analysis.....	70
2.3. Conclusions of the Second Chapter	70
 3. RESEARCH OF THE EFFECT OF LASER PROCESSING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF COATINGS	73
3.1. Effect of laser processing on the structure and properties of coatings	73
3.1.1. Structure and microstructure studies of sprayed and remelted coatings in an electric furnace	74
3.1.2. Investigations of the structure of laser-remelted coatings	77
3.1.3. Results of the microstructure research of laser-processed coatings	84
3.1.4. Effect of laser processing on the phase composition of laser processed coatings	89
3.1.5. Results of surface roughness measurements and surface topography research of laser processed coatings	91

3.1.6. Results of the research of metal hardness, microhardness and elastic modulus of laser-processed coatings	95
3.1.7. Results of tribological properties of laser processed coatings	99
3.1.8. Abrasive wear test results of composite coatings	102
3.1.9. Analysis of corrosion resistance of composite coatings	105
3.1.10. Results of thermogravimetric and differential thermal analysis of composite coatings	108
3.2. Conclusions of the Third Chapter	110
GENERAL CONCLUSIONS	113
RECOMMENDATIONS	115
REFERENCES	117
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	133
SUMMARY IN ENGLISH	135

Ivadas

Problemos formulavimas

Paviršių apsauginių dangos sluoksnių formavimas yra vienas iš efektyviausių būdų apsaugoti detalių paviršius nuo kenksmingų aplinkos veiksnių, sutaupyti brangiai kainuojančias detalių sudėtinės medžiagas, sumažinti eksploataavimo ir remonto išlaidas bei maksimaliai padidinti gaminių darbinį resursą.

Lazerinis paviršių apdorojimas yra vienas iš veiksmingiausių metodų, siekiant efektyviai ir dideliu tikslumu modifikuoti bei pagerinti darbinius detalių paviršius. Siekiant įgyvendinti vis didėjančius medžiagų eksploatacinių savybių reikalavimus, metalai dengiami metalo keraminėmis dangomis. Dangos struktūros formavimo technologijų sprendimų ir geriausios dangos sudėties kompozicijos paieška yra viena iš terminio purškimo technologijų plėtros krypčių. Dangų struktūra priklauso nuo purškiamų medžiagų cheminės sudėties, purškimo būdo pasirinkimo, jo parametrų, dangos apdorojimo ir kitų veiksnių. Dangų formavimo kokybė yra vienas iš svarbių veiksnių, ribojančių metalo keraminių dangų lazerinio apdorojimo plėtrą, nes susiduriama su dangų formavimo problemomis ir defektais. Dangos sandaros kokybės defektus, tokius kaip neišsilydę milteliai, mikroįtrūkliai ir poros, lengvai gali sukelti skirtingos naudojamų medžiagų fizinės savybės, netinkamai parinkti lazerinio apdorojimo proceso parametrai ir kiti veiksniai. Siekdami pagerinti dangos kokybę kompozicinių dangų formavimo procese,

mokslininkai atlieka įvairius bandymus, norėdami nustatyti ryšį tarp dangos formavimo kokybės ir dangos formavimo proceso parametrų. Nors yra daug būdų, kaip sumažinti dangų defektus, pvz., lazerio spindulio dydžio keitimas ar lazerinio apdorojimo takelio trajektorijos keitimas, tačiau rezultatai nėra labai veiksmingi. Nepakankamai ištirti tokie dangų lazerinio apdorojimo parametrai, kaip lazerio spindulio skersiniai svyravimai, lazerinio apdorojimo takelio trajektorija ir išankstinis pagrindo pakaitinimas prieš apdorojimą lazeriu, neleidžia prognozuoti gautamų dangų eksploatacinių savybių.

Darbo aktualumas

Siekiant padidinti įvairių gaminių darbinių paviršių kietumą, atsparumą abrazyviam dilimui, esant korozinei terpei ir aukštatemperatūrei oksidacijai, šiame darbe tiriamos nikelio pagrindo purkštinės dangos (papildomai perlydytos elektrinėje krosnyje ir apdorotos lazeriu), taikomos stiklo, naftos perdirbimo, kalnakasybos, chemijos ir kitose pramonės šakose.

Šiuo metu trūksta duomenų apie NiCrCoFeBSi+40 % WC dangos lazerinio apdorojimo parametrų įtaką perlydyto metalo vientisumui, fazinei sudėčiai, mechaninėms ir eksploatacinėms savybėms. Šiuo darbu siekiama ištirti lazerinio apdorojimo poveikį užpurkštų ir perlydytų krosnyje Ni-WC dangų struktūrai ir savybėms bei, parinkus tinkamus lazerinės dangų technologijos parametrus, suformuoti dilimui bei korozijai atsparią dangą. Darbe aprašyti, taikant lazerinį apdorojimą, suformuotų kompozicinių dangų tyrimai suteiks žinių apie minėtų dangų lazerinio apdorojimo poveikį dangų struktūrai ir savybėms. Kadangi mokslinėje literatūroje trūksta duomenų apie lazerinio apdorojimo parametrų įtaką formuojamoms dangoms, šis darbas yra naudingas siekiant sukurti geras fizikines, mechanines, tribologines ir antikoroazines savybes turinčią apsauginę dangą.

Tyrimų objektas

NiCrCoFeCBSi pagrindo su volframo karbidais dangos, suformuotos derinant terminį purškimą, dangos perlydymą elektrinėje krosnyje ir apdorojimą lazeriu.

Darbo tikslas

Lazerinio apdorojimo būdu suformuoti apsauginę Ni pagrindo su volframo karbidais dangą, pasižyminčią geromis mechaninėmis ir eksploatacinėmis savybėmis korozinėje ir aukštatemperatūrine oksidacija pasižyminčioje aplinkoje.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti spręsti šie uždaviniai:

1. Sukurti kombinuotą, 3 etapų (liepsninis purškimas, perlydymas krosnyje ir lazerinis apdorojimas) metalo keraminių dangų technologiją.
2. Ištirti lazerinio dangų apdorojimo įtaką terminiu liepsniniu būdu suformuotų purkštinių NiCrCoFeCBSi pagrindo su WC metalo keraminių dangų mikrostruktūrai, kietumui, mikrokietumui, atsparumui sausajam slydimo dilimui ir trinties koeficientui.
3. Nustatyti lazerinio apdorojimo metu naudojamų lazerio spindulio skersinių svyravimų (iki 2 mm) įtaką NiCrCoFeCBSi pagrindo su WC užpurkštų ir perlydytų elektrinėje krosnyje dangų mikrostruktūrai, fazinei sudėčiai, mikrokietumui, lazeriu perlydytų takelių geometrijai ir topografijai.
4. Nustatyti išankstinio pagrindo pakaitinimo (iki 400 °C) poveikį prieš apdorojimą lazeriu suformuotų dangų metalo struktūriniam vientisumui, lazeriu perlydyto takelio formai ir matmenims, paviršiaus nelygumams ir metalo mikrokietumui.
5. Ištirti lazerinio apdorojimo parametrų (lazerinio apdorojimo greičio ir lazerio spindulio skersinių svyravimų amplitudės) ir išankstinio pakaitinimo temperatūrų teigiamų poveikių derinį NiCrCoFeCBSi pagrindo su WC užpurkštoms ir perlydytoms krosnyje dangoms bei pateikti tokių dangų formavimo rekomendacijas.

Tyrimų metodika

Disertacijoje taikomi analitiniai ir eksperimentiniai tyrimų metodai bei lyginamoji analizė. Darbe buvo tiriamos taikant terminį purškimą, perlydymą elektrinėje krosnyje ir papildomą lazerinį apdorojimą suformuotos NiCrCoFeCBSi pagrindo su WC dangos.

Dangų struktūra ir savybės buvo tiriamos taikant šiuolaikinius tyrimo metodus: mikrostruktūros optinę mikroskopiją, skenuojamąją elektroninę mikroskopiją ir rentgeno mikroanalizę, rentgeno spindulių difrakcijos analizę. Dangų savybės tirtos atliekant paviršiaus šiurkščio matavimus ir topografijos tyrimus, metalo kietumo ir mikrokietumo matavimus, tribologinių savybių tyrimus, sausojo slydimo ir abrazyvinio dilimo bandymus. Taip pat atliktos korozinio atsparumo, termogravimetrinė ir diferencinė terminė analizės.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie medžiagų inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Nustatytos užpurkštų, perlydytų krosnyje ir lazeriu apdorotų Ni-WC dangų perlydyto takelio formos ir matmenų, paviršiaus nelygumų ir dangos paviršiaus pleišėjimo pobūdžio priklausomybės nuo lazerinio apdorojimo parametrų – lazerio spindulio skersinių svyravimų amplitudės, lazerinio apdorojimo greičio ir išankstinio dangos pakaitinimo temperatūros.
2. Nustatytos Ni-WC dangų metalo mikrostruktūros, fazinės sudėties, morfologijos, porėtumo, paviršiaus kietumo, trinties koeficiento ir atsparumo sausajam slydimui, abrazyviniam dilimui, elektrocheminei korozijai bei aukštatemperatūrei oksidacijai sąsajos su dangų formavimo būdu.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sukurta kombinuota purkštinių metalo keraminių dangų technologija, kuri leidžia efektyviai dengti plieno substratą metalo keraminėmis dangomis ir užtikrina mažą dangos porėtumą, geras tribologines savybes (trinties koeficientas mažėja iki 1,6 karto) ir gerą dangos atsparumą abrazyviniam dilimui (136 kartus didesnis nei užpurkštos dangos ir ~2 kartus didesnis nei krosnyje perlydytos dangos). Kompleksiškai buvo ištirtos suformuotos dangos, o darbe gauti rezultatai parodė lazerinio apdorojimo parametrų įtaką dangos savybėms, todėl gali būti pritaikytas pramoninis lazeris, kuris turi galimybę užtikrinti darbe aprašytus lazerinio apdorojimo parametrus. Tyrimais nustatytas kompleksinis išankstinio pagrindo pakaitinimo ir užpurkštos bei perlydytos krosnyje dangos lazerinio apdorojimo efektas, todėl, pritaikius šiame darbe aprašytus metalo keraminių dangų formavimo būdus ir jų parametrus, galima suformuoti tolygaus paviršiaus, sustiprintos smulkiadispersės struktūros, atsparias abrazyviniam dilimui ir korozijai dangas.

Ginamieji teiginiai

1. Lazerinis Ni-WC metalo keraminių dangų apdorojimas užtikrina visišką arba dalinį, priklausomai nuo lazerinio apdorojimo parametrų, volframo karbidų tirpimą perlydyto takelio metalo ir smulkios dendritinės dangos mikrostruktūros susidarymą, lemia apdoroto metalo kietumą ir tribologines savybes.

2. Ni-WC metalo keraminių dangų lazerinio apdorojimo technologija su lazerio spindulio skersiniais svyravimais ir išankstiniu dangos pakaitinimu iki 400 °C leidžia suformuoti mažo porėtumo ir didesnio struktūrinio vientisumo dangą su valdomos formos ir matmenų, homogeniškos struktūros apdoroto metalo takeliais, tai lemia suformuotos dangos eksploatacines savybes (atsparumą abrazyviniam dilimui, elektrocheminei korozijai, aukštatemperatūrei oksidacijai).

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema publikuoti 5 moksliniai straipsniai: du – *Web of Science* duomenų bazės leidiniuose, trys – recenzuotuose konferencijų darbų leidiniuose. Paskelbtos trys tezės kituose konferencijų pranešimuose.

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

- *Science integration, education and production – the basis of the implementation of the plan of the nation*, Karaganda, Kazachstanas, 2018 m.
- *Advancer materials and technologies*, Vilnius, Lietuva, 2018 m.
- *NANOSMAT 2018 13th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials*, Gdanskas, Lenkija, 2018 m.
- *Integration of science, education and production is the basis for the implementation of the Plan of the Nation*, Karaganda, Kazachstanas, 2022 m.
- *RTU 63rd International Scientific Conference of Mechanical Engineering Technology and Heat Engineering*, Ryga, Latvija, 2022 m.
- *World Conference of Mechanical Engineering*, Berlynas, Vokietija, 2022 m.
- *Mokslas – Lietuvos ateitis*, Vilnius, Lietuva, 2023 m.
- *Integration of education, science and production*, Karaganda, Kazachstanas, 2023 m.

Disertacijos struktūra

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

Darbo apimtis yra 150 puslapiai, tekste taikytos 4 numeruotos formulės, panaudoti 53 paveikslai ir 9 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 189 literatūros šaltiniai.

Terminio purškimo ir lazerinio paviršių apdorojimo technologijos bei pagrindiniai jų ypatumai

Skyriuje apžvelgiamos terminio purškimo technologijos, jų raida ir ypatumai. Detaliau analizuojamas lazerinis paviršių apdorojimas, pagrindiniai jo ypatumai, dangų legiravimo elementai bei įvairių veiksnių įtaka dangų formavimui.

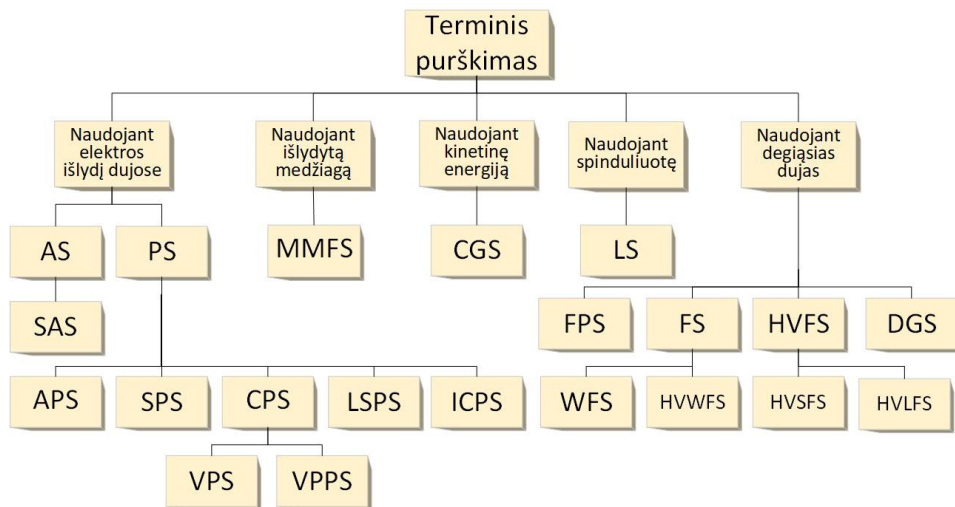
Skyriaus tematika paskelbtos dvi autorės publikacijos (Čepukė et al., 2018; Škamat et al., 2019).

1.1. Terminio purškimo technologijų apžvalga

Terminio purškimo technologijos buvo pradėtos naudoti daugiau nei prieš šimtmetį, XX amžiaus pradžioje. Pirmasis terminis purškimo patentas buvo užregistruotas įmonės *Oerlikon* 1882 m. Jo esmė buvo švino miltelių purškimas ant įtvirtinto paviršiaus. Šiuo principu buvo sukurtas procesas, leidžiantis gaminti švino plokšteles baterijoms. Vėliau procesas buvo patobulintas ir atsirado daugiau patentų.

Terminis purškimas pradėjo populiarėti ir 1909 m. buvo užpatentuotas pirmasis komerciškai perspektyvus terminio purškimo įrenginys, skirtas metalo dangoms gauti. Šį patentą užregistravo Max Ulrich Schoop Šveicarijoje.

M. U. Schoop laikomas terminio purškimo technologijos pradininku. Šį atradimą jis padarė sode stebėdamas savo vaikus, šaudančius iš *Flobert* ginklų, kurių švininės kulkos atsitrenkdamos į sieną formavo dėmes. 1912 m. jis sukūrė pirmąjį liepsninio purškimo viela degiklį, tuomet dar žinomą kaip „pistol“, o 1914 m. jis užpatentavo purškimo degiklį su dviguba viela (Siegman et al., 2013).



1.1 pav. Terminio purškimo metodų klasifikacija pagal naudojamą energijos šaltinį:

AS – elektrolankinis purškimas; CPS – plazminis purškimas kamerose; DGS – detonacinis dujinis purškimas; ICPS – purškimas induktyviai sujungta plazma; liepsninis purškimas išlydytu metalu; FPS – miltelinis liepsninis purškimas; FS – liepsninis purškimas; HVFS – didelio greičio liepsninis purškimas; HVWFS – didelio greičio liepsninis purškimas viela; HVLFS – didelio greičio liepsninis purškimas lydalų; HVSFS – didelio greičio liepsninis purškimas suspensija; LPPS – laminarinis plazminis purškimas suspensija; LS – lazerinis purškimas; MMFS – liepsninis purškimas išlydytu metalu; PS – plazminis purškimas; SAS – elektrolankinis purškimas apsauginėse dujose; SPS – plazminis purškimas suspensija; VPS – plazminis purškimas vakuumė; VPPS – aukšto slėgio plazminis purškimas; WFS – liepsninis purškimas viela

Fig. 1.1. Classification of the thermal spray family of deposition techniques: AS – electric arc spraying; CPS – plasma spraying in chambers; DGS – detonation gas spray; ICPS – inductively coupled plasma spraying; flame spraying with molten metal; FPS – powder flame spray; FS – flame spray; HVFS – high-velocity flame spray; HVWFS – high-velocity flame wire spray; HVLFS – high-velocity flame melt spray; HVSFS – high-velocity flame spray suspension; LPPS – laminar plasma spray suspension; LS – laser spraying; MMFS – flame spraying with molten metal; PS – plasma spraying; SAS – electric arc spraying in shielding gas; SPS – plasma spray suspension; VPS – plasma spraying in a vacuum; VPPS – high-pressure plasma spraying; WFS – wire flame spray

Šios technologijos pramoniniu mastu buvo plačiau pradėtos naudoti devintojo dešimtmečio pradžioje, o aeronautikos ir branduolinėje pramonėje buvo taikoma tik didelės pridėtinės vertės komponentų gamybai.

Šiais laikais terminio purškimo technologijos yra patikimas ir ekonomiškasis būdas detalėms ir gaminių paviršiams (substratams) padengti įvairių paskirčių dangomis. Terminiškai purškiamos dangos ir jų formavimas tapo svarbia šiuolaikinės pramonės technologija, sėkmingai naudojama tokiose srityse kaip kosminė inžinerija, įvairios pramonės ir žemės ūkio šakos bei elektros energijos gamyba. Terminis purškimas yra vienas iš efektyviausių procesų, siekiant apsaugoti daugelio mašinų elementų konstrukcinę medžiagą nuo paviršinės elektrocheminės korozijos, dilimo bei oksidacijos.

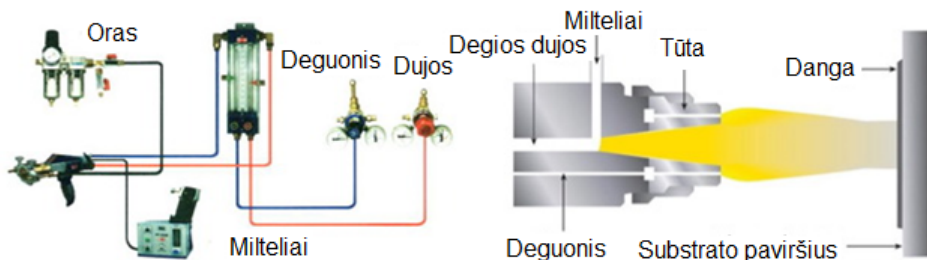
Terminio purškimo technologija pagal naudojamą energijos šaltinį klasifikuojama į tris pagrindines grupes: liepsninis purškimas, elektrinis lankinis purškimas ir plazminis purškimas. Viena iš klasifikacijų, apimanti pagrindinius šiuo metu žinomus metodus, pateikiama 1.1 paveiksle. Atsižvelgiant į tai, kokį rezultatą siekiama gauti, pasirenkamas tinkamiausias purkštinių dangų formavimo būdas. Kadangi metodai ir procesai nuolat yra tobulinami, klasifikacijos grupės kartas nuo karto pasipildo naujais pogrupiais (Babiak et al., 2006; Gonzalez, 2007; Simunovic, 2010; Gargasas, 2011; Erne et al., 2012; Škamat, 2013; Tejero-Martin et al., 2019).

1.1.1. Purkštinių dangų formavimo ir struktūros ypatumai

Purkštinės dangos susidaro substrato paviršiuje terminio purškimo metu iš elektrolankinio išlydžio plazmoje ar dujų liepsnoje išlydytų medžiagų. Terminis purškimas yra ekonomiškai ir naši dangų technologija (dengiančios medžiagos kiekis per laiko vienetą – nuo 15 g/min iki 3300 g/min), skirta paviršiams padengti apsauginėmis dangomis (angl. *OC Oerlikon Management AG*).

Terminis purškimas – tai bene populiariausia ir universaliausia ant substrato paviršiaus formuojamų dangų technologija. Terminiu purškimu galima dengti visų rūšių plienus, spalvotuosius metalus ir jų lydinis, keramiką, medieną, stiklą, plastiką, audinius bei kompozitines medžiagas. Tai priklauso nuo terminio purškimo būdo, parinktos technologijos, užpurškiamos medžiagos išsilydymo laipsnio ir savybių, išsilydžiusių dalelių formos ir greičio. Substratus galima dengti metalu, įvairiais lydiniais ar keramika (Gargasas, 2011; Fang et al., 2005).

Purškiamoji medžiaga gali būti naudojama vielos, strypo, lankstaus elektrodo ar miltelių pavidalu. Miltelinio liepsninio purškimo proceso principinė schema pavaizduota 1.2 paveiksle. Ši dangų technologija ir įranga yra nesudėtinga bei nebrangi, naudojamos nebrangios eksploatacinės medžiagos, yra didelis dangų sudarančių medžiagų pasirinkimas, todėl dengimo technologija yra ekonomiškai efektyvi.



1.2 pav. Miltelinio liepsninio purškimo proceso principinė schema
(SK ProfMetallizatsiya, 2018; Bühler AG, 2019)

Fig. 1.2. Schematic diagram of the thermal powder spraying process
(SK ProfMetallizatsiya, 2018; Bühler AG, 2019)

Dujų srautu išlydyta purškiamoji medžiaga suskaidoma į smulkius lašelius, lašeliai įgreitinami ir su didele kinetine energija bloškiami į substrato paviršių. Purkstinė danga susidaro, kai atskiri purškiamos medžiagos lašeliai susiduria su substrato paviršiumi, auštant kristalizuojasi ir formuoja tiškalus. Didinant atomizuojančiųjų dujų slėgį, purškiamosios medžiagos lašeliai mažėja, o jų greitis didėja. Elektrolankinio purškimo atveju išlydyta purškiamoji medžiaga atomizuojama suspausto oro srautu. Oru atomizuojant lanke išlydytą purškiamąją medžiagą, purkstinėje dangoje susidaro didelis oksidų kiekis, kadangi oro dujų terpėje skriedamos skystosios dalelės sąveikauja su ore esančiu deguonimi ir tik tada susiduria su substrato paviršiumi. Susidaro oksidai, kurie patenka į užpurškiamąją dangą, taip susilpnindami sukibimą su substratu ir blogindami mechanines dangų savybes. Kietosios ir trapios oksidų dalelės sunkina vėlesnę dangų mechaninį apdirbimą. Oru atomizuotose purkstinėse dangose atsiranda tarpų tarp tiškalų ir oru užpildytų tuštumų, kurių kiekis lemia didesnę dangos porėtumą, o porėtumas dažnai yra nepageidaujamas veiksnys (Vilys et al., 2007). Padidėjęs porėtumas sumažina sluoksnių mechanines savybes. Didelis porų tankis dangose pagreitina korozinių terpių prasiskverbimą į dangų vidų, o vėliau ir į substratus, t. y. pablogina atsparumą korozijai. Didelis porėtumas pablogina dangų atsparumą oksidacijai aukštoje temperatūroje, nes deguonis gali difunduoti per poras į pagrindą (Hao et al., 2024).

Dangas formuojančios medžiagos dažnai savyje turi daug legiravimo elementų. Nuo šių elementų kiekio bei rūšies priklauso tam tikros suformuotos dangos savybės. Jei skirtingose suformuotos dangos vietose legiravimo elementų koncentracija yra nevienoda, tai ir dangos savybės tokiose vietose bus skirtingos. Šios priežastys nulemia gana sudėtingą geros kokybės ir vienodų mechaninių bei eksploatacinių savybių dangos formavimą. Dangos sukibimo stipris su substrato

paviršiumi (adhezija) priklauso nuo ryšio tarp iš lašelių susidarančių atskirų tiškalų ir ryšio tarp tiškalų ir substrato (Newbery et al., 2000; Planche et al., 2005). Dangos adhezijos stipris su substratu priklauso nuo dangos ir substrato medžiagos tarpusavio fizikinės ir cheminės sąveikos, vykstančios paviršių sąlyčio srityje (sulydymo srityje). Blogas adhezijos stipris atsiranda dėl struktūrinio medžiagų nesuderinamumo, nepakankamo metalurginio ryšio, didelių vidinių įtempių, netinkamai parinkto purškimo režimo parametrų ir pan. Dangos ir substrato adhezijos stipris yra vienas iš pagrindinių kriterijų, nusakančių dangos eksploatacinę atitikimą ir ilgaamžiškumą, o sulydymo srities medžiagos priešlaikinis irimas priklauso nuo dangos ir substrato paviršių sandaros, fizikinių ir cheminių reiškinių (Tillmann et al., 2017).

Vienas iš pagrindinių terminio purškimo privalumų yra tai, kad dengiamosios medžiagos išlydyti ar iš dalies išlydyti lašeliai neišlydo substrato dengiamojo paviršiaus. Paviršiaus temperatūra retai pakyla daugiau nei 200 °C, todėl terminis poveikis gaminiui gana nedidelis. Terminio purškimo metu gautos dangos savybės ir vykstantys procesai priklauso nuo daugelio kintamųjų, tokių kaip purškimo metodas, purškimo technologiniai parametrai, naudojama įranga, dangą formuojančių medžiagų tipas, dalelių forma bei cheminė sudėtis ir kt. Norint gauti kokybiškas dangas, labai svarbu suprasti, kaip kiekvienas kintamasis paveiks galutinį rezultatą (England, 2008).

Norint padidinti dangos tankį ir sumažinti porėtumą, danga yra perlydoma. Perlydymo procesas atliekamas kartu su dangos purškimu arba vėliau po purškimo. Kaitinimas vyksta, kol pasiekiamą temperatūra tarp dangos lydinio skystosios (lot. *liquidus*) ir kietosios (lot. *solidus*) būsenų temperatūrų, dažniausiai iki 1000–1100 °C. Dangos perlydymas gali būti atliktas naudojant dujinę liepsną, elektrinę krosnį, taikant indukcinį kaitinimą ir lazerinį perlydymą. Po perlydymo danga aušinama arba termiškai apdorojama (Škamat et al., 2019). Dangų perlydymo lazerio spinduliuote technologija pasižymi mažu dangos medžiagos porėtumu ir geru adhezinio sukibimu su substratu (dėl gero metalurginio ryšio), mažu lazerio spinduliuotės terminiu poveikiu gilesniems substrato sluoksniams, galimybe lengvai automatizuoti ir robotizuoti dangos formavimą, proceso metu dangą formuoti apsauginių dujų atmosferoje, o proceso režimo parametrus tiksliai ir operatyviai reguliuoti bei valdyti. Taikant vėlesnį purkštinių dangų lazerinį apdorojimą gaunamų perlydytų dangų storis yra 10–1000 μm, o vienu ėjimu formuojamos dangos apdorojimo ruožo plotis yra 1–7 mm (Hao et al., 2005; Manna et al., 2011; Škamat et al., 2019).

Dangos kokybei didelę įtaką turi substrato paviršiaus šiurkštis. Didelis šiurkštis gerina dangos sukibimą, nes didėja tikrasis dangos ir substrato paviršiaus sukibimo plotas. Šiurkštaus substrato paviršiaus mikronelygumų viršūnėlių metalas, veikiamas išlydytų dalelių srauto, įkaista labiau nei lygaus paviršiaus metalas. Tai gerina dangos ir substrato sukibimą bei padidina sąveikos laipsnį.

1.1.2. Terminiu būdu purkštoms dangoms formuoti naudojamos medžiagos

Terminis purškimas apibūdinamas kaip itin paprastas, našus, universalus ir nebrangus dangų formavimo būdas (Valiulis, 2005; Škamat, 2013; Simunovic, 2010). Dangoms formuoti naudojamos plataus asortimento medžiagos, o dažniausiai naudojami metalai yra geležis, kobaltas, molibdenas, titanas, nikelis, varis, chromas, cinkas, volframas, alavas ir aliuminis. Kietieji metalų lydiniai kobalto, geležies ir nikelio pagrindu (MCrAlY lydiniai, čia M reiškia Co, Fe arba Ni) yra labai atsparūs korozijai ir oksidacijai aukštoje temperatūroje. Dangos aliuminio bronzos pagrindu pasižymi geru mechaniniu apdirbamumu. Taip pat plačiai naudojami polimerai, keramikos (Al, Ti, Zr ir Cr oksidai, magnio cirkonatas ir kt.) ir kompozitai (metalai ir jų lydinių kompozitai su karbidais, boridais, oksidais, grafitu ir kt.) (Valiulis, 2005; Škamat, 2013; Simunovic, 2010).

Terminio purškimo metu substrato paviršiuje susidaro danga iš lankinio išlydžio plazmoje ar dujų liepsnoje išlydytos medžiagos dalelių. Dangos savybės priklauso nuo užpurškiamos medžiagos dalelių judėjimo greičio dujų sraute ir susidūrimo su paviršiumi sąlygų, jų įkaitinimo laipsnio, tarp užpurkštų dalelių atsiradusių ryšių pobūdžio ir stiprumo, srities, esančios tarp dangos ir substrato paviršiaus, vientisumo bei struktūros (Valiulis, 2005).

Terminio purškimo procesai taip pat taikomi pažeistų bei nusidėvėjusių įvairių mašinų ir mechanizmų dalių remontui. Kartais terminis purškimas taikomas apdailai, norint pagerinti gaminių estetines savybes. Dengimo medžiaga gali būti viela, milteliai, strypas ar lankstus elektrodas. Purškiant liepsną, naudojama šiluminė energija, gaunama deginant degių dujų (daugiausia acetileno, propano, propileno ar vandenilio) ir deguonies mišinį, kad išlydytų arba aplydytų dangos medžiagos daleles. Terminio purškimo būdu galima nusodinti gana storas (nuo 0,02 mm iki 50 mm) metalines, polimerines, keramines ir kompozicines dangas. Dengimo proceso operacijos gali būti rankinės, mechanizuotos ir visiškai automatizuotos (Simunovic, 2010).

Norint pagerinti izoliacines (elektrines ir šilumines) ir tribologines dangų medžiagų savybes, be metalinių žaliavų, taip pat terminiam purškimui naudojama daugelis keraminių ir metalo keraminių medžiagų. Dažniausiai metalo keraminėms purkštinėms dangoms formuoti naudojamas keramines žaliavas (kietoji fazė) galima suskirstyti į keramikos oksidus, karbidus ir boridus, kurie yra įterpiami į metalo rišiklio fazę (vadinamieji kermetai). Dėl skirtingų dangos kietumo fazėje naudojamos žaliavos sandaros ir savybių (kietumo ir kitų) formuojamos skirtingų savybių metalo keraminės dangos, o pati dangos keraminė žaliava gaminama visiškai skirtingais gamybos būdais. Norint gauti tankesnės mikrostruktūros ir geresnių fizikinių bei mechaninių savybių dangas naudojami smulkiagrūdė struktūrą turinčios keramikos ir sukepintų kermetų milteliai. Taip pat naudojant purškimui smulkiagrūdės žaliavas galima suformuoti palyginti mažus nelygumus

turinčius dangų paviršius, taip sumažinant dangos vėlesnio mechaninio apdirbimo sąnaudas (Erne et al., 2012; Gell, 2001; Tillmann et al., 2008).

Terminio purškimo procesas be vėlesnio dangos perlydymo nedaro didelės įtakos substrato metalo mikrostruktūrai ir savybėms bei detalės deformacijos laipsniui, nes substrato ir dangos sąsajos srityje metalo temperatūra yra nuo 100 °C iki 300 °C. Skriejančios įkaitintų dujų sraute išlydytos arba iš dalies išlydytos dangos medžiagos dalelės neišlydo substrato medžiagos smūgio metu, o substrato paviršius tik šiek tiek įkaista. Išimtis yra terminio purškimo procesas su lygiagrečiu arba vėlesniu dangos perlydymu, kai aukšta dangos visiško perlydymo temperatūra daro įtaką substrato medžiagos savybėms (Simunovic, 2010).

Terminio purškimo procesų plėtra ir tobulinimas buvo pagrindinė funkcinė ir išmaniųjų dangų technologijos evoliucijos tendencija, leidžianti nusodinti naujas medžiagas ir padengti naujus pagrindus (substratus), praplečiant prieinamų galimybių spektrą. Jau kelis dešimtmečius pasaulyje yra labai platus terminiu purškimu formuojamų dangų pridėtinį medžiagų pasirinkimas (Metco, 2006; Davis et al., 2004; Simunovic, 2010; Fauchais et al., 2007; Singh et al., 2020):

- Aliuminio pagrindo lydiniai naudojami nusidėvėjusiems aliuminio ir magnio lydinų paviršiams atnaujinti. Aliuminio oksidas yra dilimui atspari metalo oksido keramika, chemiškai inertiška ir stabili aukštoje temperatūroje. Pagerina dangos eksploatacines savybes abrazyvinio, slydimo ir erozinio dilimo atvejais. Aukšto grynumo klasės aliuminio oksido keramika (baltasis aliuminio oksidas) taip pat pasižymi puikiais dielektrinėmis savybėmis. Dangą formuojančių miltelių mišiniai su aliuminio oksidine keramika, turintys nedidelį ar vidutinį titano oksido kiekį, pagerina dangos stiprumo savybes. Aliuminio silicio pagrindo keraminės medžiagos tinkamos naudoti su titano turinčiais lydiniais. Šios keraminės medžiagos padidina dangos atsparumą trinčiai esant temperatūrai ir sumažina dilumo intensyvumą. Aliuminio silicio pagrindo lydiniai neturėtų būti veikiami aukštesnės nei 315 °C temperatūros, nes jie yra linkę į senėjimą, kuriam būdingas kietumo sumažėjimas ir antrinių silicio fazių susidarymas lydinyje.
- Kobalto ir nikelio pagrindo medžiagos paprastai ant substrato paviršiaus purškiamos plazma ir paskui termiškai apdorojamos. Po terminio apdorojimo gaunamos didelio porėtumo dangos, kurios pasižymi geru atsparumu erozijai ir abrazyviniam dilimui.
- Kobalto pagrindu pagamintos kompozicinės dangų medžiagos naudojamos siekiant padidinti paviršiaus atsparumą dilimui aukštoje temperatūroje, atsparumą aukštatemperatūrei korozijai ir oksidacijai, taip pat kobalto pagrindo substratams restauruoti. Pavyzdžiui, CoMoCrSi lydiniai yra žinomi dėl puikių slydimo tribologinių savybių aukštoje temperatūroje, antikoroziinių, antioksidacinių ir atsparumo nusidėvėjimui savybių.

CoCrNiWC lydiniai dėl legiravimo anglimi ir karbidų formavimosi proceso pagerina dangų kietumą ir dilimo savybes. Kobalto lydinų terminis apdorojimas po padengimo gali dar labiau pagerinti dangų eksploatacines savybes. Kobalto pagrindo medžiagos pasižymi dideliu kietumu aukštoje temperatūroje, turi didesnę atsparumą smūgiams ir geresnę elastingumą nei nikelio pagrindu pagaminti lydiniai. Jie taip pat mažiau linkę įtrūkti aušinant po lydymosi.

- Nikelio pagrindu pagaminti lydiniai naudojami daugelyje skirtingų pramonės sričių. Pagrindinė šių lydinų paskirtis yra suformuoti metalo keraminių dangų metalinę matricą (rišamąją fazę), užtikrinti dangos ir substrato gerą sukibimą (gali būti naudojama metalo keraminė danga nikelio pagrindu arba tarpinis nikelio lydinio sluoksnis tarp keraminės dangos ir substrato), suformuoti bendrai korozijai ir slydimui atsparią dangą, taip pat lydiniai naudojami mašinų detalių nudilusio paviršinio sluoksnio geometrijai ir matmenims atkurti ir restauruoti. Papildomi nikelio pagrindo lydinų legiravimo elementai pagerina lydinio ir dangos atsparumą aukštatemperatūrei korozijai, antioksidacines ir tribologines slydimo savybes. Chromas, aliuminis ir itris daro įtaką dangos metalo oksidacijos greičiui, besiformuojančio oksidinio sluoksnio sandarai ir sukibimo stipriui.
- Vario pagrindo lydiniai padidina dangos atsparumą korozijai sūriame vandenyje ir koroziniam pleišėjimui, yra pranašesni už aliuminio pagrindo lydinius. Kaip ir kitos minkštosios matricos yra naudojami siekiant sumažinti dangos porėtumą ir struktūros trapumą. Tai pagerina paviršiaus apdirbamumą bei sumažina komponentų nusidėvėjimą eksploatacijos metu. Vario pagrindu pagamintų kompozicinių medžiagų dangos gali būti naudojamos labai įvairiai, įskaitant vario pagrindu pagamintų substratų atkūrimą ir restauravimą, taip pat minėtų medžiagų dangos gali būti naudojamos kaip apsauga nuo užšalimo, minkštųjų guolių gamyboje, gaminant geras elektrinio ir šiluminio laidumo bei antikoroazines savybes turinčią medžiagą. Vario legiravimas nikelio padidina vario lydinio darbinės temperatūros ribas ir daro lydinį atsparesnį korozijai. Aliuminio ir vario (aliuminio bronzos) lydiniai taip pat yra atsparesni dilimui ir oksidacijai nei grynas varis. Rekomenduojama viršutinė grynojo vario naudojimo temperatūros riba yra 230 °C.
- Plastikų pagrindo polimerinės medžiagos yra naudojamos kuriant savitepes dangų sistemas, kai darbinė temperatūra yra žemesnė kaip 350 °C. Kontroluojamas porėtumas pasiekiamas įterpiant polimerą į dangos struktūrą. Kaitinant dangą aukštoje temperatūroje vyksta dangos polimerinės medžiagos degradacija, skilimas, oksidacija ir sudeginimo

procesas. Tokios dangos po terminio apdorojimo (325–350 °C) yra mažiau linkusios sukepti ir pakeisti matmenis.

- Itrių stabilizuoto cirkonio pagrindu pagaminti keraminiai milteliai su kontroliuojamu polimerinių medžiagų kiekiu naudojami aukštatemperatūrems atsparioms dilimui dangoms gaminti. Polimerinė medžiaga gali būti išdeginama dangos terminio apdirbimo metu arba eksploatacijos metu.
- Cirkonio pagrindu pagaminta keramika naudojama termobarjerinių dangų gamyboje, tai pagerina komponentų šilumos izoliaciją ir tarnavimo laiką aukštoje temperatūroje. Stabilizatoriai, tokie kaip magnis, kalcis ir itris, yra naudojami legiruojant cirkonio oksidus, siekiant sumažinti ir apriboti fazinius virsmus medžiagoje.
- Boro ir anglies priedai padidina geležies pagrindu pagamintų dangų kietumą ir atsparumą dilimui, o chromo ir nikelio priedai pagerina antikoroazines savybes. Lydiniai, kurių sudėtyje yra daug molibdeno, pagerina dangų tribologines savybes, sumažina slydimo nusidėvėjimą ir padidina atsparumą cheminei korozijai. Fe-Ni lydiniai turi geresnį mechaninį apdirbamumą nei gryno nikelio dangos.
- Molibdenas dangoje pagerina dangos metalo atsparumą dilimui ir sumažina oksidaciją. Dėl anglies priedų molibdeno dangoje susidaro molibdeno karbidas, o tai padidina dangos kietumą ir atsparumą dilimui. Paprastai gryno molibdeno viršutinė eksploataavimo riba oksiduojančioje aplinkoje yra 315 °C. Vertingiausios molibdeno savybės yra didelis šilumos laidumas, mažas šilumos plėtimasis ir geras sukibimas (adhezija) su plieno substratais.
- Titano pagrindu pagamintų medžiagų dangos dažniausiai naudojamos medicinos reikmėms, kai reikalingas biologinis suderinamumas. Dažnai kuriamos porėtos struktūros dangos, kurios naudojamos implantų gamyboje. Titano oksidas ir jo lydiniai pagerina dangos kietumą, tačiau ne tiek daug kaip aliuminio oksidas. Titano oksido pagrindu pagamintos dangos atsparios dilimui, kai yra tepimas. Dangos neturėtų būti naudojamos aukštesnėje nei 540 °C temperatūroje, kad būtų išvengta įtrūkių dėl fazinių virsmų. Didesnės chromo oksido ar aliuminio oksido koncentracijos titano oksido dangoje padidina medžiagos atsparumą dilimui.
- Kermetai – metalų ir metalo oksido keramikos mišiniai. Pagrindinis kermetų panaudojimas yra šiluminio barjero formavimas gaminio paviršiuje, kai turi būti kontroliuojami substrato ir dangos šilumos mainai ir mažinamas medžiagos šiluminis plėtimasis. Iš kermetų paprastai yra formuojami tarpiniai dangos sluoksniai tarp rišamojo ir keraminio viršutinio sluoksnio.

- Chromo karbido keraminės medžiagos dažniausiai naudojamos aukštesnėje temperatūroje nei volframo karbido keraminės medžiagos. Chromo karbido keraminių medžiagų rekomenduojama darbinė temperatūra yra nuo 540 °C iki 815 °C. Daugelyje šių medžiagų yra papildomų priedų, tokių kaip nikelis ir chromas. Jie naudojami kaip keraminės medžiagos matrica, gerinanti dangos struktūrinį vientisumą, atsparumą korozijai ir atsparumą dilimui. Šių medžiagų dangos gali veiksmingai padėti apsaugoti gaminių paviršius esant kietųjų dalelių erozijai, dilimui aukštoje temperatūroje ir šiluminei korozijai. Chromo oksidas yra vienas iš chemiškai inertiškiausių ir atspariausių dilimui oksidų. Tokio tipo keraminės dangos naudojamos iki 540 °C darbinės temperatūros. Pridėjus titano oksido ir silicio dioksido, pagerėja dangos kohezija (rišamasis stipris), tvirtumas ir atsparumas dilimui. Šios dangos pasižymi didesniu šilumos laidumu nei cirkonio pagrindu pagamintos keraminės dangos, turi didesnę mikro- ir makrokietumą bei atsparumą dilimui.
- Volframo karbidai (WC) laikomi ugniai atspariais karbidais, kurių lydymosi temperatūra yra 2870 °C. Jie pasižymi dideliu kietumu ir geru cheminiu atsparumu. Volframo karbidas gali egzistuoti dvejomis fazėmis – WC ir W_2C , o jų kietumas siekia 2000–2700 HV. Volframo karbido milteliai gaminami įanglinant volframo miltelius aukštoje temperatūroje (>1000 °C), tokiu būdu susidaro monokristalinis volframo karbidas, kurio anglies kiekis ~ 6,1 %, arba eutektinis WC/ W_2C , kurio anglies kiekis yra ~4 %. Įanglinimas atliekamas tokiomis medžiagomis kaip anglies monoksidas, angliavandenilių dujos arba suodžiai. Nors aukšta įanglinimo temperatūra užtikrina greitą reakciją, ji taip pat sukelia volframo karbido grūdelių grubumą. Volframo karbido keraminės medžiagos dangoje rekomenduojama naudoti, kai gaminio darbinė temperatūra yra žemesnė kaip 500 °C, nes aukštesnėje temperatūroje keraminėje medžiagoje susidaro trapios fazės, kurios sumažina dangos atsparumą dilimui ir struktūrinį vientisumą. Aukštoje temperatūroje volframo karbidas skyla į volframą ir anglį, o tai gali įvykti naudojant aukštos temperatūros terminį purškimą, pvz., taikant didelio greičio deguonies dujinį purškimą (HVOF) ir didelės energijos plazmos (HEP) metodus. WC karbidų oksidacija prasideda 500–600 °C temperatūroje. Jie atsparūs rūgštims (išskyrus vandenilio fluorida rūgštis ir azoto rūgštis mišiniams esant aukštesnei nei kambario temperatūrai). Kambario temperatūroje jie reaguoja su fluoro dujomis ir aukštesnėje nei 400 °C temperatūroje su chloru, nereaguoja į sauso H_2 poveikį iki lydymosi temperatūros. Smulkių miltelių pavidalo volframo karbidas lengvai oksiduojasi vandenilio peroksido vandeniniuose tirpaluose. Esant

aukštai temperatūrai ir slėgiui, jie reaguoja su vandeniniu natrio karbonatu, sudarydamas natrio volframą. Įprastai volframo karbidas naudojamas ne tik paviršiaus dengimui, bet ir kaip kietoji fazė metalų įrankiuose. Volframo karbidai šiuo atveju sukepinami su metaliniu rišikliu, dažnai kobaltu ir rečiau nikeliu, nes šie elementai užtikrina gerą lydinio vilgumą. Volframo karbido priedas dangoje gerina dangos atsparumą erozijai, abrazyviniam dilimui ir atsparumui smūgiams. Chromo ir nikelio priedas WC metalo keraminėje dangoje pagerina medžiagos atsparumą atmosferos korozijai.

1.1.3. Terminio purškimo privalumai ir trūkumai

Terminio purškimo privalumai:

- Platus dangų medžiagų pasirinkimas – yra daugybė įvairių medžiagų (metalinų ir nemetalinių), iš kurų terminio purškimo būdu galima gauti aukštos kokybės dangas. Tai gali būti: metalai, lydiniai, keramikos, plastikai ir polimerai. Dengimo medžiagą galima specialiai parinkti kiekvienam atskiram substratui.
- Didelė pagrindo (substrato) medžiagų ir dengiamų gaminių dydžių įvairovė – šiuo metodu galima padengti bet kokią medžiagą, jeigu tik dengiama medžiaga gali atlaikyti terminio purškimo proceso šiluminį poveikį. Tačiau taip pat yra keletas specifinių purškimo būdų (šaltasis purškimas ir t. t.), kuriems naudojama daug žemesnė purškimo proceso temperatūra, todėl dengiamų substrato medžiagų diapazonas dar labiau padidėja. Padengiamųjų komponentų dydis praktiškai neribojamas.
- Galimybė naudoti įvairias terminio liepsninio purškimo liepsnas – reguliuojant dujų tiekimą ir maišymosi santykį galima naudoti neutralią, oksiduojančią, pusiau oksiduojančią, redukuojančią liepsną ir k. t.
- Silpnas terminis poveikis substratui, jei nėra atliekamas vėlesnis dangos perlydymas.
- Galimybė iš dalies arba visiškai automatizuoti patį purškimo procesą.
- Galimybė dangą formuoti bet kurioje erdvinėje padėtyje.
- Purškimo proceso bei jo valdymo paprastumas, didelis proceso našumas.
- Nereikalingas gaminio paviršiaus apdirbimas po purškimo.
- Prailginamas gaminio eksploatavimo laikas – danga prailgina komponento eksploatavimo laiką, sukurdamą veiksmingą apsaugą nuo korozijos, erozijos, skilimo, abrazyvinio dilimo ir kitų formos paviršiaus pažeidimų. Terminis purškimas leidžia suformuoti dangas (iki 10 mm) didesniu nusodinimo greičiu nei kiti padengimo būdai.
- Sumažinamos išlaidos – naudotų komponentų restauravimas naudojant terminį purškimą gali būti daug pigesnis sprendimas nei nusidėvėjusio

komponento keitimas nauju. Terminio purškimo technologija yra daug efektyvesnė už kitas dangų technologijas, kadangi dangai formuoti sunaudojama mažiau medžiagų.

Terminio purškimo trūkumai:

- Paslepia (užmaskuoja) gaminio pagrindinę medžiagą – terminiu purškimu formuojamos dangos paslepia pagrindinės medžiagos paviršių, daugeliu atvejų be papildomų tyrimų neįmanoma pasakyti, iš kokios medžiagos gaminio pagrindas buvo pagamintas iki dengimo proceso.
- Didelės pradinės sąnaudos – kai kuriems terminio purškimo dangų formavimo metodams (plazminis purškimas, elektrolankinis purškimas, didelio greičio dujinis purškimas ir kiti) reikalinga labai brangi įranga, todėl pradinės sąnaudos gali būti didelės.
- Ne visada geras dangos stipris (kohezija).
- Ne visada pakankamas dangos sukibimas su pagrindine medžiaga (adhezija).
- Žalinga darbo aplinka – prieš purškimą paviršiai dažnai smėliuojami arba apdirbami šratiniu valymu, purškimo metu išsiskiria dūmai, o dalis skriejančių dangos formavimo medžiagos dalelių yra nepanaudojama, todėl užteršiama aplinka, kurioje vyksta substrato apdorojimo procesas ir dangų formavimas (Davis et al., 2004; Tamulevičius et al., 2007; IRS Surfacing Technologies Ltd, 2018; Singh et al., 2020).

1.2. Lazerinis paviršių apdorojimas

Lazerinių technologijų kūrimas ir vystymas yra vienas perspektyviausių ir pažangiausių pramonės sektorių. Didelės galios lazeriai naudojami fotovoltinių, medicinos, elektronikos prietaisų gamybai, fotoninių įrenginių integravimui, plataus vartojimo elektroninių prietaisų, tokių kaip išmanieji telefonai, organiniai šviesos diodai ir puslaidininkiniai įrenginiai, gamybai. Fotovoltinių prietaisų gamybos srityje lazeriai naudojami paviršiams mikrotekstūruoti, siekiant pagerinti šviesos gaudymo savybes, gaminant puslaidininkius, elektriniams kontaktams, elektrinei izoliacijai, mikro- ir nanodalelėms sukepinti ir pan. Taip pat didelės galios lazeriniai šaltiniai naudojami pramoninio precizinio apdirbimo procese ir veikia kaip nauja platforma stipraus lauko fizikos tyrimams, naudojant didžiausią PW galią. Lazeriai atlieka svarbų vaidmenį gaminant energijos prietaisus bei ieškant alternatyvių energijos šaltinių saulės ir termobranduolinės energetikos srityse (Gupta, 2020; Zuo et al., 2022; Kahhal et al., 2024).

Šiais gamtinių išteklių išeikvojimo ir nuolatinės pramonės plėtros laikais paviršiaus apdorojimo technologijos tampa vis svarbesnės. Paviršiaus apdorojimo

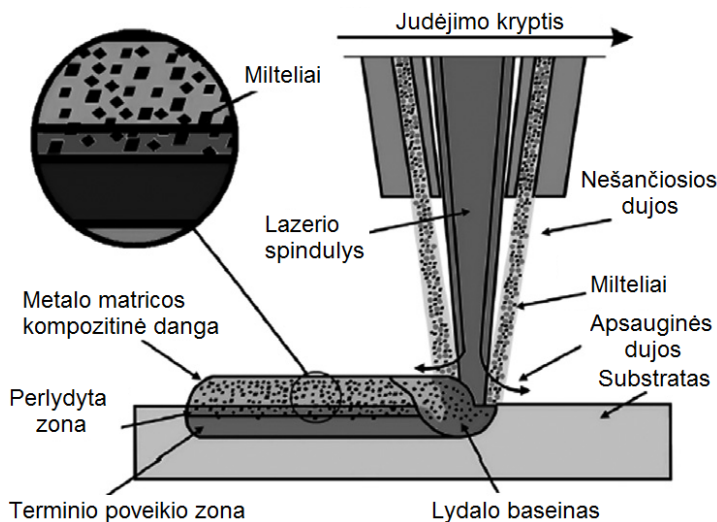
koncentruotais energijos srautais metodai (angl. *high energy fluxes* – *HEF*), kurie yra svarbi šiuolaikinių technologijų dalis, yra intensyviai taikomi formuojant paviršius bei keičiant skirtingų medžiagų paviršiaus struktūrą ir savybes (Herzog et al., 2016; Valkov et al., 2018). Medžiagų paviršiui apdoroti taikant HEF metodus naudojami koncentruoti fotonų (lazerio spinduliuotės) arba pagreintų elektronų (elektronų pluošto) srautai. Šių procesų metu pagrindo (substrato) paviršius yra veikiamas elektronų arba lazerio spinduliu. Apdorojimas lazeriu arba elektronų spinduliuotės pluoštu gali modifikuoti viršutinį medžiagos arba dangos sluoksnį nepaveikdamas gilesnių sluoksnių mikrostruktūros. Lazerio spinduliuotės pluoštas pasižymi dideliu energijos tankiu tiek naudojant impulsinį, tiek tolydųjį režimą. Lazerinis apdirbimas taip pat pasižymi dideliu koherentiškumu, kryptingumu ir monochromatiškumu. Šios savybės suteikia galimybę tiksliai nukreipti pluoštą pasirinkta kryptimi ir stipriai sufokusuoti, tokiu būdu pasiekiant energijos tankius, kurie reikalingi medžiagai įkaitinti ir lydėti (Šalna, 2003; Singh et al., 2020). Dėl elektromagnetinės spinduliuotės sąveikos su substrate esančiais medžiagos elektronais vyksta lazerinės spinduliuotės sugertis medžiagoje. Elektromagnetiniams spinduliams veikiant medžiagą, dėl sąveikos su elektromagnetiniu lauku medžiagoje esantys elektronai įgauna kinetinės energijos, kurią virpesių forma perduoda medžiagos gardelei, o tai lemia, kad vyksta medžiagos kaitinimas ir šilumos pasiskirstymas nuo medžiagos paviršiaus gilin. Po lazerinio apdorojimo ruošinys greitai atvėsta. Greito kaitinimo ir aušinimo procesai daro įtaką medžiagos struktūriniam virsmams, cheminės sudėties pokyčiams, paviršiaus savybėms ir kt. Taikant šį procesą formuojamos dangos pasižymi puikiu metalurginiu ryšiu (adhezija) su pagrindine medžiaga, taip pat lazerinio apdorojimo procesas yra tinkamas esančio porėto viršutinio dangos sluoksnio sutankinimui – korozijos barjero suformavimui. Pagal maksimalią kaitinimo temperatūrą galima apibrėžti kelis lazerinio apdorojimo procesus (Vuoristo et al., 2005; Narendra et al., 2008; Valkov et al., 2018):

- 1) Kai kaitinimo temperatūra yra žemesnė už apdoroto bandinio medžiagos lydymosi temperatūrą, apdorojama medžiaga išlieka kietos būsenos, tačiau gali įvykti tam tikri faziniai ir struktūriniai pakitimai. Tokios technologinės sąlygos yra plačiai naudojamos medžiagų paviršiui grūdinti.
- 2) Kai maksimali kaitinimo temperatūra yra aukštesnė už bandinio medžiagos lydymosi temperatūrą ir tuo pačiu metu žemesnė už medžiagos garavimo temperatūrą, apdorojama medžiaga tampa skystosios būsenos. Tokie apdorojimo būdai naudojami legiruojant ir plakiruojant.
- 3) Kai kaitinimo temperatūra yra aukštesnė už medžiagos garavimo temperatūrą, apdorota medžiaga iš dalies išgarinama. Tokios technologijos naudojamos dangoms nusodinti (elektronų spinduliuotei išgarinti, nusodinti lazeriu ir kt.).

1.2.1. Lazerinio apdorojimo procesas

Lazerinis aplydymas yra dangos formavimo technologija iš pridėtinių medžiagų, taikant šią technologiją lazerio didelės energijos srautas perduodamas į substrato paviršių, sukuriant lydalo dangą. Į lydalo takelį tiekiami miltelių arba vielos pavidalo pridėtinė medžiaga, kuri su substratu sudaro stiprų metalurginį ryšį jai sukietėjus (Reddy et al., 2018).

Lazerinis aplydymas yra tarpkryptinis apdorojimo būdas, kuris kombinuotai apima lazerinę technologiją, kompiuterizuotą gamybą ir proceso valdymo sistemą. Lazerinio aplydymo principinė schema pavaizduota 1.3 paveiksle. Paveiktos srities judėjimo greitį ir trajektoriją galima valdyti naudojant automatizuotą sistemą. Apdoroto bandinio paviršinio sluoksnio struktūrą po lazerinio aplydymo paprastai sudaro keturios sritys: aplydymo sritis (angl. *cladding zone* – CZ), pereinamoji (sulydymo) sritis (angl. *interfacial zone* – IZ), terminio poveikio sritis (angl. *heated affected zone* – HAZ) ir substratas (angl. *substrate* – SUB) (Liu et al., 2017; Bartkowski et al., 2018).



1.3 pav. Lazerinio aplydymo principinė schema (Bartkowski et al., 2018)

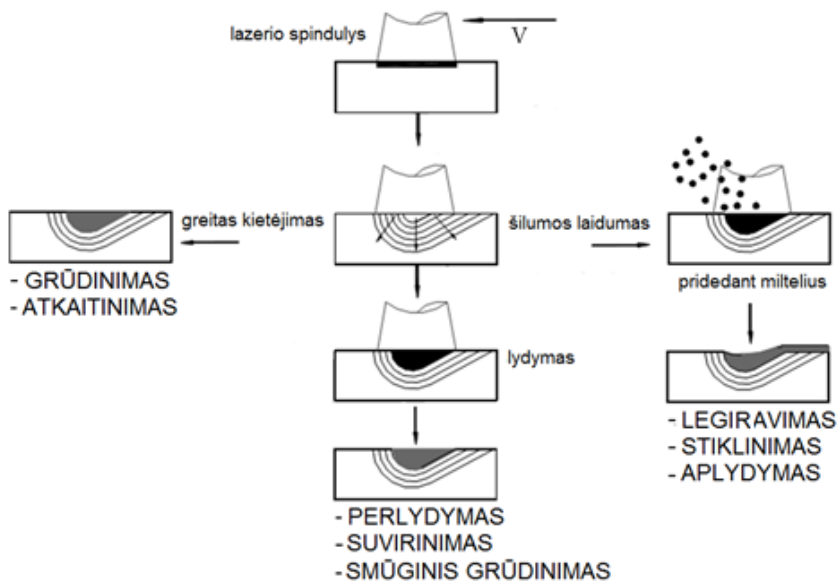
Fig. 1.3. Schematic diagram of the laser cladding process (Bartkowski et al., 2018)

Lazerinio aplydymo metu lazerio energija yra sugerama substrato medžiagos paviršiuje. Įgreitinti srauto elektronai susidurdami su substratu perduoda savo energiją medžiagos gardelei. Bandinio temperatūra padidėja. Lazerio spinduliuotės nanosekundinių impulsų trukmė yra didesnė nei elektronų aušimo ir gardelės kaitimo trukmės, todėl paviršiaus šiluma pasiskirsto medžiagos tūryje.

Sukuriama vadinamoji šilumos poveikio sritis medžiagoje. Pradinės medžiagos savybės šioje srityje didėjant temperatūrai keičiasi. Formuojasi vidiniai bei paviršiniai defektai ir pasireiškia medžiagos lydymas ir kristalizacija (Balachninaite et al., 2016). Medžiagos lydymosi ir kristalizacijos procesas atlieka labai svarbų vaidmenį lazerinei spinduliutei veikiant apdirbamąjį paviršių (1.4 pav.).

Įvairiems paviršiaus apdorojimo efektams pasiekti taikomi šie procesai:

- Lazeriu išlydoma medžiaga, ji greitai kristalizuojasi ir kinta medžiagos paviršiaus fizikinės savybės. Būdinga grūdinimo, smūginio grūdinimo, graviravimo technologijoms.
- Įvairių medžiagų miltelių ar kietųjų dalelių įterpimas į metalo lydalo takelį, norint labiau pakeisti substrato paviršiaus cheminę sudėtį ir savybes. Būdinga paviršiaus legiravimo, dengimo, aplydymo technologijoms.

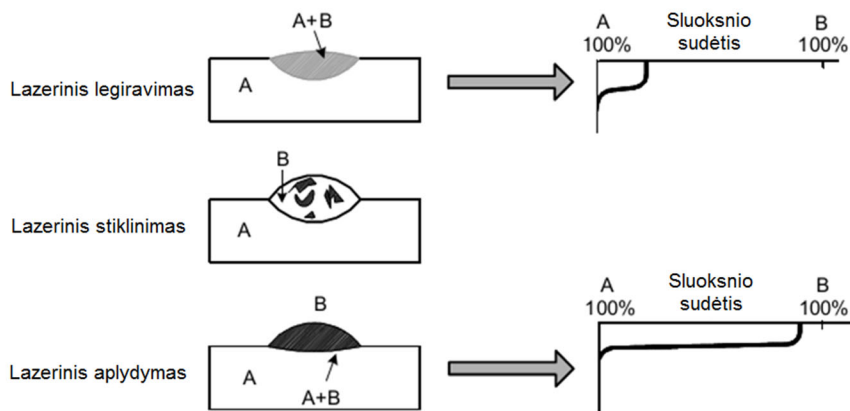


1.4 pav. Įvairių lazerinių apdorojimo būdų schema (Zanzarin et al., 2015)

Fig. 1.4. Schematic of different laser material processing techniques (Zanzarin et al., 2015)

Lazerinis grūdinimas, pakartotinis lazerinis perlydymas, lazerinis suvirinimas be pridėtinės medžiagos ir smūginis grūdinimas yra grindžiami medžiagos paviršiaus sluoksnio mikrostruktūriniais virsmais. Lazerinio aplydymo ir legiravimo metu į substrato lydalo takelį papildomai tiekama pridėtinė

medžiaga, kuri ant substrato paviršiaus sudaro dengiamąjį sluoksnį su kitokia chemine sudėtimi. Sluoksnio cheminė sudėtis ir savybės priklauso nuo pridėtinės medžiagos rūšies ir kiekio, kaip matyti 1.5 paveiksle.



1.5 pav. Įvairios lazerinio apdorojimo metu gaunamos mikrostruktūros ir cheminės kompozicijos (Zanzarin et al., 2015)

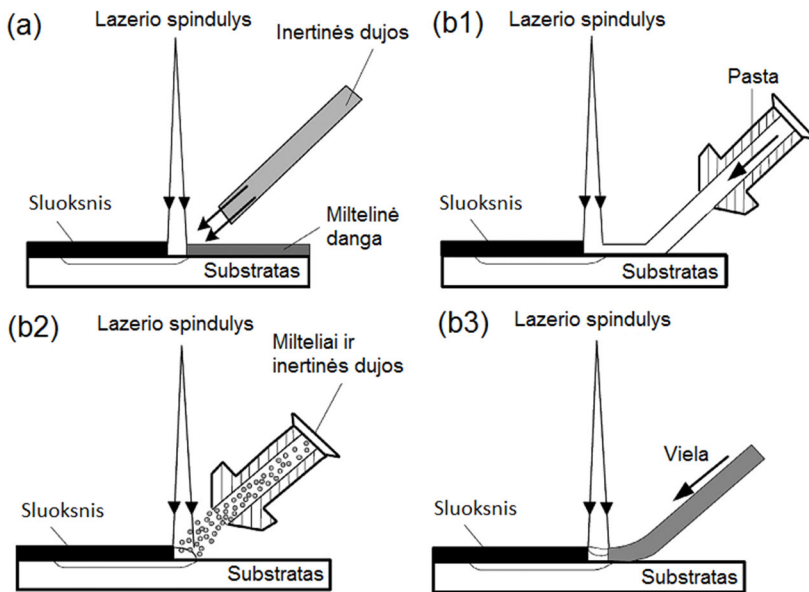
Fig. 1.5. Different microstructures and chemical compositions of laser alloying, glazing, and cladding (Zanzarin et al., 2015)

Lydymo lazeriu (legiravimo) metu į lydalo takelį patenka tik nedidelis kiekis pridėtinės medžiagos. Dėl šios priežasties priedas ir pagrindinė medžiaga susimaišo vienodai visame lydalo tūryje. Lazerinis aplydymas yra panašus į lydymą lazeriu, tačiau substrato praskiedimas yra sumažintas iki minimumo, dėl to į lydalo takelį reikia tiekti daug daugiau pridėtinės medžiagos.

Pridėtinė medžiaga ant substrato gali būti tiekiama dviem būdais: lydant pridėtinę medžiagą, jau iš anksto padengtą ant pagrindinės medžiagos paviršiaus (dviejų etapų procesas), arba nuolat tiekiant pridėtinę medžiagą į lazeriu apdorojamą lydalo takelį (vieno etapo procesas) (1.6 pav.). Vieno etapo lazerinio apdorojimo proceso metu naudojama pridėtinė medžiaga gali būti tiekiama trimis būdais: tiekiant pastą, įpurškiant miltelius arba tiekiant viela (Toyserkani et al., 2005; Zanzarin et al., 2015; Liu et al., 2017; Narayanan et al., 2019; Nath et al., 2019).

Lazerio spinduliuotės energijos koncentracija tokia didelė, kad lazerinis apdorojimas trunka gerokai trumpiau nei apdorojimas kitais būdais, pavyzdžiui, suvirinimo lazerio spinduliuote greitis 10–20 kartų didesnis nei dujinio suvirinimo. Dėl lazerinio proceso lokalumo ir spartumo nėra reikšmingų liekamųjų deformacijų, neiškraipoma detalės geometrija; dėl didelio lazerio pluošto galios tankio galima apdirbti beveik visas kietas, trapias, sunkiai lydžias

ir kt. medžiagas (metalus ir nemetallines medžiagas, tarp jų ir deimantus), pjaustyti ir suvirinti detales, sukietinti ir legiruoti jų paviršių, valyti nuo gaminių paviršių oksidines plėveles ir kt. Lazerio spinduliuote, naudojant optines ir veidrodines sistemas, galima apdirbti sunkiai pasiekiamas vietas.



1.6 pav. Skirtingi lazerio apdengimo būdai: (a) dviejų pakopų lazerinis aplydymas, (b) vieno žingsnio lazerinis aplydymas (b1) pasta, (b2) miltelių įpurškimas ir (b3) vielos tiekimas (Zanzarin et al., 2015)

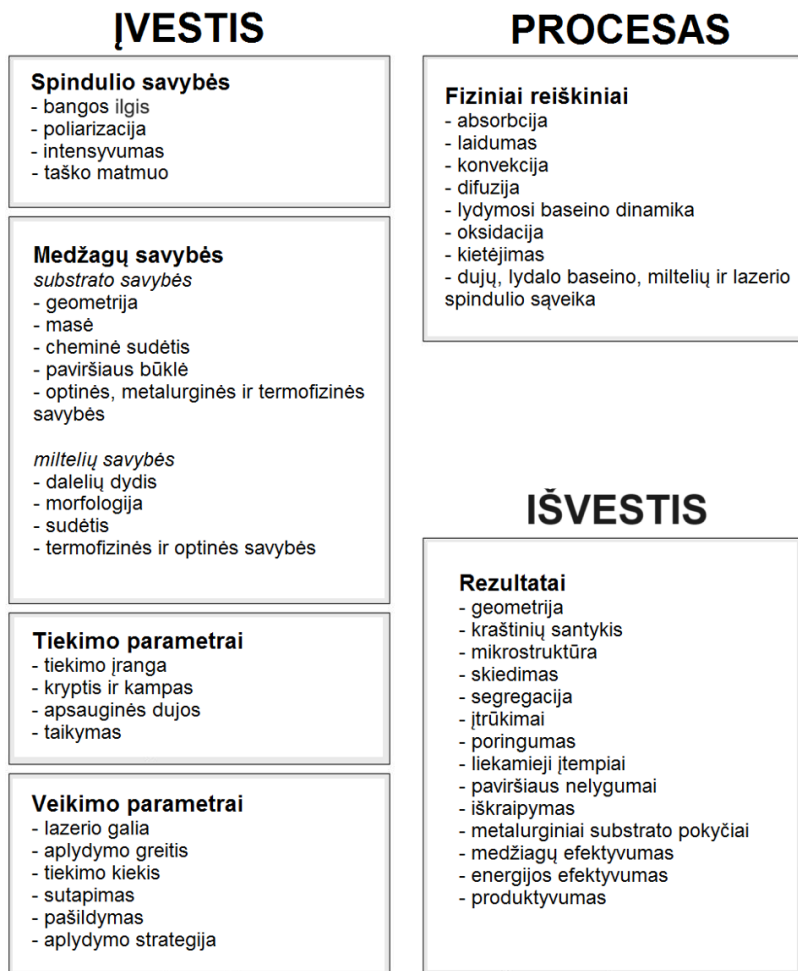
Fig. 1.6. Different methods of laser cladding: (a) preplaced powder, (b1) paste feeding, (b2) powder injection and (b3) wire feeding (Zanzarin et al., 2015)

Kai kuriems lazeriniams technologiniams procesams (legiruojant ir kietinant detalių paviršius ir kt.) darbo srityje reikia naudoti inertinių dujų terpę (ypač apdorojant chemiškai aktyvias medžiagas), specialias spinduliuotę sugeriančias dangas ir kt. Tam, kad technologinis procesas būtų efektyvesnis, kartais tikslinga į poveikio sritį tiekti papildomą energiją: šiluminę, magnetinę, elektros, mechaninę ir kt. (Šniuolis, 2014).

1.2.2. Lazerinio aplydymo technologiniai parametrai

Lazerinio aplydymo metu suformuotų dangų kokybę ir jų savybes gali nulemti daugybė veiksnių, tokių kaip aplydymo sluoksnio geometrija, takelio ir substrato metalo mikrostruktūra bei skiedimo laipsnis, įtrūkių atsiradimas, metalo

liekamieji įtempiai ir deformacijos, paviršiaus šiurkštis, cheminės sudėties pokyčiai ir proceso efektyvumas. Šiems veiksniams turi įtakos lazerinio aplydymo proceso parametrai ir fiziniai reiškiniai, atsirandantys aplydymo proceso metu. 1.7 paveiksle pateikti įvesties, proceso ir išvesties parametrai ir reiškiniai, susiję su aplydymo procesu.



1.7 pav. Lazerio aplydymo įvesties, proceso ir išėjimo proceso parametrai papildomai tiekiant miltelius (Zanzarin et al., 2015)

Fig. 1.7. Inputs, outputs and process parameters of laser cladding by powder injection (Zanzarin et al., 2015)

Įvesties parametrus galima suskirstyti į lazerio spindulio, medžiagų, tiekimo ir veikimo parametrus. Lazerio spindulio ir veikimo parametrai paprastai yra fiksuoti ir priklauso nuo naudojamos įrangos, lazerio tipo ir optikos. Medžiagos parametrai yra susiję su pridėtinės medžiagos ir substrato pasirinkimu ir apima miltelių dalelių savybes (dalelių dydį ir morfologiją, cheminę sudėtį, termofizikines ir optines savybes) ir substrato savybes (geometriją, masę, cheminę sudėtį, paviršiaus būklę, termofizikines ir optines savybes). Veikimo parametrus galima keisti, o jų kitimas turės įtakos proceso rezultatams. Pagrindiniais parametrais laikomi lazerio galia (P), aplydymo greitis (V) ir pridėtinės medžiagos tiekimo kiekis (F), nes jie daro didžiausią poveikį dangos savybėms.

Lazerinio aplydymo metu keičiant veikimo parametrus dažniausiai keičiamas suformuoto sluoksnio pločio ir aukščio santykis (W/H), nes aplydyto sluoksnio forma ir geometriniai parametrai labai priklauso nuo pridėtinės medžiagos tiekimo kiekio ir aplydymo greičio. Substrato lydymą daugiausia veikia lazerio spindulio galios tankis miltelių masės vienetui P/F: substrato metalo skiedimas didėja didinant lazerio galią ir mažėja didinant pastūmos greitį.

Aplydymo proceso parametrų ir aplydyto sluoksnio charakteristikų sąsąjį ir koreliacijų supratimas yra labai svarbus formuojant dangas be defektų su norima gauti geometrija, metalurginiu ryšiu tarp dangos ir substrato bei mažu skiedimo laipsniu. Iš esmės, pasirinkus tam tikrą priedą ir pagrindinę medžiagą, galima užtikrinti kokybišką įvairių gaminių padengimo procesą lazeriniu aplydymu, užtikrinant tinkamą santykį tarp tiekiamos pridėtinės medžiagos ir lazerio spindulio galios tankio (Steen et al., 2013; Zanzarin et al., 2015).

Parametrai, tokie kaip lazerio galia, aplydymo greitis, spindulio skersmuo, spindulio židinio nuotolio taško padėtis, yra susiję su aplydyto sluoksnio forma ir geometrija, skiedimo laipsniu, sluoksnio storio, dangos metalo mikrostruktūra ir mechaninėmis savybėmis. Pvz., dėl žemos magnio substratų lydymosi temperatūros (~560 °C) jie gali intensyviai lydytis lazerinio aplydymo procese, o tuomet formuojamos dangos, skiedžiamos substrato metalu. Dangos metalo skiedimo laipsnio dydis priklauso nuo apdorojimo parametrų. Norint kontroliuoti išlydyto takelio ir substrato sąveiką ir suformuoti dangas, kurios turi vienodą cheminę sudėtį, tankią mikrostruktūrą ir geresnes mechanines bei fizikines savybes, labai svarbu sureguliuoti lazerinio apdorojimo proceso parametrus (Gao et al., 2009; Liu et al., 2017; Singh et al., 2020).

1.2.3. Sluoksnio savybės

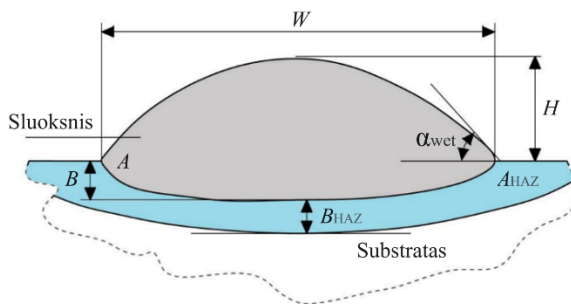
Formuojant daugiafunkces dangas lazerinio aplydymo būdu, yra itin svarbios trys pagrindinės aplydyto sluoksnio charakteristikos: sluoksnio geometriniai matmenys, skiedimo laipsnis ir dangos metalo porėtumas. Dangos metalo skiedimo procesas yra substrato medžiagos susimaišymas su dengiančiąja

medžiaga, pakeičiančia abiejų medžiagų lydinio kompoziciją ir cheminę sudėtį, kurios gali paveikti gaminio eksploatacines savybes.

Šiuo metu plačiai paplitęs įvairių modelių, skirtų lazerinio aplydymo dangų geometrinėms perlydytos vonelės charakteristikoms prognozuoti, taikymas. Bandymai modeliuoti aplydyto sluoksnio parametrus bei kitas savybes, tokias kaip aplydyto sluoksnio forma ir geometrija, buvo atlikti anksčiau (Pinkerton et al., 2004; Tan et al., 2018). Populiarus metodas aplydymo dangų charakteristikoms prognozuoti yra tiesinė regresija, naudojant bandymų ir klaidų metodą. Nors skirtingais prognozavimo metodais galima nustatyti, kurie lazerinio apdorojimo proceso parametrai turi įtakos dangos formavimuisi, tačiau labai skiriasi šių parametrų įtaka. Šie modeliai gali paaiškinti empirinius tyrimų rezultatus. Be šių statistinių modelių, taikomi ir teoriniai dangų formavimo modeliai (Reddy et al., 2018).

Tipinis aplydyto sluoksnio pjūvis pavaizduotas 1.8 paveiksle. Pagrindiniai sluoksnio geometriniai parametrai yra šie (Zanzarin et al., 2015; Liu et al., 2017; Narayanan et al., 2019):

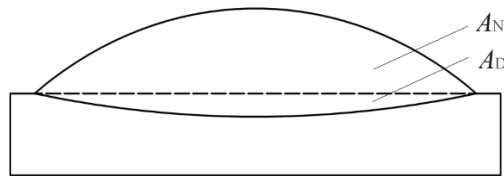
- sluoksnio aukštis (H);
- sluoksnio plotis (W);
- sluoksnio gylis (B);
- aplydyto sluoksnio skerspjūvio plotas (A);
- TPS gylis (B_{HAZ}): terminio poveikio srities, esančios substrate, gylis;
- TPS plotas (A_{HAZ}): terminio poveikio srities plotas substrate;
- kontaktinis kampas (α_{wet}): dar vadinamas drėkinimo (vilgumo) kampu – tai kampas tarp pagrindo paviršiaus ir dangos paviršiaus liestinės.



1.8 pav. Tipinis aplydyto sluoksnio pjūvis (Zanzarin et al., 2015)

Fig. 1.8. Typical clad cross-section with most common geometrical characteristics (Zanzarin et al., 2015)

Paviršių apdorojant lazeriu dažniausiai paveikiamas paviršinis sluoksnis iki 1 mm storio, kuris išlydomas kartu su pridėtiniais legiravimo elementais taip, kad susidarytų homogeninis legiruotas perlydyto metalo sluoksnis. Šio proceso privalumas yra taupus brangių legiravimo elementų panaudojimas, siekiant pagerinti paviršiaus savybes (Nath et al., 2019; Narayanan et al., 2019).



1.9 pav. Aplydyto sluoksnio skerspjūvio plotas: išlydytos substrato medžiagos skerspjūvio plotas (A_D); aplydyto sluoksnio skerspjūvio plotas iki pradinio substrato paviršiaus (A_N) (Zanzarin et al., 2015)

Fig. 1.9. Schematic drawing of the clad cross-sectional area showing the part of the cross-sectional area emerging from the original surface of the plate (A_D) and the melted cross-sectional area of the substrate (A_N) (Zanzarin et al., 2015)

Dangos metalo skiedimo procesas laikomas svarbiu veiksniu, norint kontroliuoti dangos „užterštumą“ substrato medžiaga. Siekiant užtikrinti gerą dangos sukibimą su pagrindu, būtinas minimalus abiejų lydinų maišymosi lygis, tačiau jis negali būti per didelis. Per didelis dangos metalo praskiedimas gali neigiamai paveikti dangos savybes. Skiedimas gali būti matuojamas skirtingais būdais. Taikant dažniausiai naudojamą metodą, dangos metalo skiedimas yra išlydytos substrato medžiagos (A_D) skerspjūvio ploto ir bendro aplydyto sluoksnio skerspjūvio ploto ($A_N + A_D$) santykis $A_D / (A_N + A_D)$ (1.9 pav.) (Fathi et al., 2006; Huang, 2011; Nath et al., 2019).

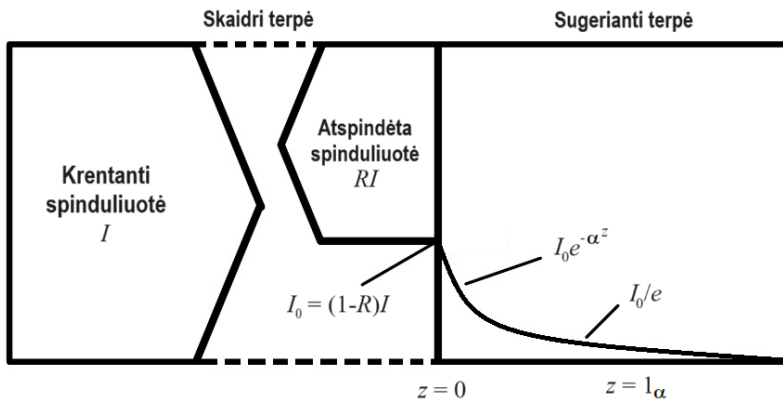
1.2.4. Lazerio spinduliuotės ir apdorojamų medžiagų sąveika

Lazerinio apdirbimo procese viena iš svarbiausių lazerio ypatybių – galimybė sukoncentruoti lazerio energiją pasirinktame apdirbamojo substrato paviršiaus plote ir gauti didelį lazerinės spinduliuotės poveikio intensyvumo laipsnį. Kadangi lazerio spindulys gali būti sufokusuotas labai mažame paviršiaus plote, tai spinduliuotės intensyvumo vertė šiame taške gali išaugti iki 10^6 – 10^8 kartų. Tokiu būdu gaunamas labai greitas ir itin mažos poveikio srities kaitinimas. Tokios lazerio spindulio intensyvumo vertės sudaro sąlygas medžiagos lazerinei abliacijai. Abliacijos metu vyksta apdorojamos medžiagos kietosios ir dujinės būsenos virsmas. Medžiagos paviršinio sluoksnio šalinimo (išgarinimo) greitis šiuo atveju siekia 1–

10 monosluoksnių per impulsą, tai reiškia, kad medžiagos paviršiaus forma ir struktūra yra modifikuojama labai ploname paviršiaus sluoksnyje, o tai sunkiai pasiekama kitais apdirbimo būdais. Pagrindiniai lazerinio apdirbimo procesą apibūdinantys parametrai yra lazerinės spinduliuotės sugerties (α) ir šilumos difuzijos (D) gyliai. Apdorojant medžiagas, lazerio spindulio efektyvumas priklauso nuo apšvitintos medžiagos sugerties. Lazerio spindulių sugertis priklauso nuo lazerio spindulio bangos ilgio ir apšvitintos medžiagos bei jos topografijos. Dėl didelio energijos poveikio kiekio medžiagoje gali prasidėti įvairūs pokyčiai, tokie kaip medžiagos garavimas, lydymasis, irimas, arba gali būti sužadinti kiti fizikiniai ar cheminiai procesai, kurių metu keičiasi medžiagos savybės (1.10 pav.). Spinduliuotės skverbimasis į medžiagą aprašomas Beero–Lamberto lygtimi (Meijer, 2004; Balachninaite et al., 2008; Gibson et al., 2021; Ulčinas, 2016):

$$I(z) = I(1 - R)e^{-\alpha z} = I_0 e^{-\alpha z}, \quad (1.1)$$

čia $I(z)$ – spinduliuotės intensyvumas perėjus medžiagos storį z , I – krentančios ant paviršiaus spinduliuotės intensyvumas, R – paviršiaus atspindžio koeficientas, α – sugerties koeficientas, I_0 – krintančios į medžiagos paviršių spinduliuotės intensyvumas.



1.10 pav. Lazerinės spinduliuotės atspindys ir sugertis medžiagoje (Balachninaite et al., 2008)

Fig. 1.10. Reflection and absorption of laser beams (Balachninaite et al., 2008)

1.10 paveiksle pavaizduota lazerinės spinduliuotės atspindžio nuo apdirbamos medžiagos paviršiaus bei patekusios į medžiagą spinduliuotės skverbimosi gilyn schema. Didžiausia lazerio spinduliuotės energijos dalis sugerama medžiagos paviršiuje ir ji eksponentiškai mažėja, didėjant atstumui nuo paviršiaus. Dėl medžiagos paviršiaus atomų sąveikos su prasiskverbusia lazerio spindulio energijos dalimi įvyksta medžiagos kaitinimas. Atsispindėjęs spinduliuotės dalis ne-

dalyvauja medžiagos kaitinimo procese. Lazerio spinduliuotės sugerties gylys medžiagoje priklauso nuo medžiagos temperatūros ir naudojamo lazerio spindulio bangos ilgio. Didžioji lazerio spinduliuotės energijos dalis sugerama medžiagos sluoksnyje, kuris vadinamas lazerinės spinduliuotės skverbties gyliu arba optiniu pralaidumu. Šiame medžiagos gylyje šviesos intensyvumas sumažėja α kartų:

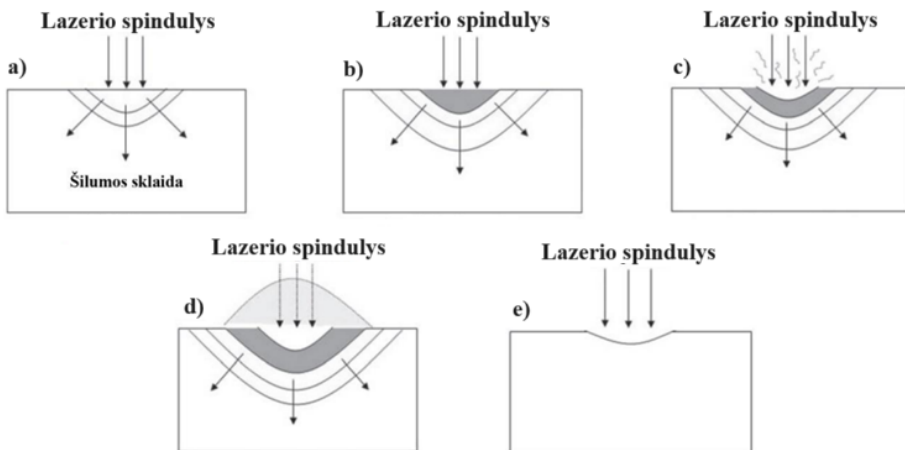
$$l_a = \frac{1}{\alpha} = \frac{\lambda}{4\pi\kappa}. \quad (1.2)$$

Metalų ekstinkcijos koeficientas κ yra didesnis už 1, todėl juose lazerio spinduliuotė sugerama mažesniame negu bangos ilgis λ gylyje, tai atitinka maždaug 0,1–0,01 bangos ilgio, o atspindžio koeficientas R gali siekti Ni atveju iki 74 %, W – 58 % ir Al bei Cu daugiau kaip 90 %. Todėl didžioji lazerio galios dalis atsispindi nuo paviršiaus, o likusi dalis absorbuojama praktiškai daugeliometalinių medžiagų paviršiuje. Kylant temperatūrai bei didėjant metalų elektriniam laidumui, sugertis taip pat didėja ir, esant metalo lydymosi temperatūrai, artėja prie 100 % (Bass et al., 1995; Balachninaite et al., 2008; Narayanan et al., 2019).

Kita labai svarbi medžiagos savybė, nusakanti šilumos difuzijos atstumą nuo lazerio spinduliuote paveiktos srities per lazerio impulso trukmę t , yra šilumos difuzijos gylys:

$$D = 2\sqrt{z \cdot t}, \quad (1.3)$$

čia z – medžiagos storis.



1.11 pav. Lazerinės spinduliuotės ir medžiagos sąveikos fizikiniai reiškiniai, priklausomai nuo sugerties energijos tankio: a) kaitimas; b) lydymasis; c) garavimas; d) plazmos formavimasis ir e) abliacija (Anoop et al., 2009)

Fig. 1.11. Various effects of laser-material interaction: (a) heating, (b) surface melting, (c) surface vaporisation, (d) plasma formation, and (e) ablation (Anoop et al., 2009)

Didėjant impulso trukmei – šilumos prasiskverbimas taip pat didėja.

Lazerinės spinduliuotės ir medžiagos sąveikos srityje pasireiškiantys fizikiniai procesai priklauso nuo spinduliuotės intensyvumo, bangos ilgio, o, esant nes-tatmenam spinduliuotės kritimui, – nuo lazerio spindulio poliarizacijos ir nuo ruo-šinio savybių. Šie procesai pavaizduoti 1.11 paveiksle.

Priklausomai nuo spinduliuotės intensyvumo galintys vykti reiškiniai: kaiti-nimas, lydymasis, garavimas, plazmos susidarymas ir abliacija (Balachninaite et al., 2008; Narendra et al., 2008).

Išskiriami trys lazerinės spinduliuotės sukulto kietųjų kūnų optinių savybių pokyčio mechanizmai. Priklausomai nuo lazerio spinduliuotės intensyvumo, po-kyčio mechanizmai išdėstomi tokia tvarka (Markovič, 2018):

- medžiagos ir laisvų elektronų tankio kitimas;
- laisvų krūvininkų optinė generacija (tarpjuostiniai šuoliai, staigi joniza-cija dielektrikuose ir puslaidininkuose);
- daugiafotonė sugertis (intensyvus lazerio spindulio elektrinio lauko po-veikis).

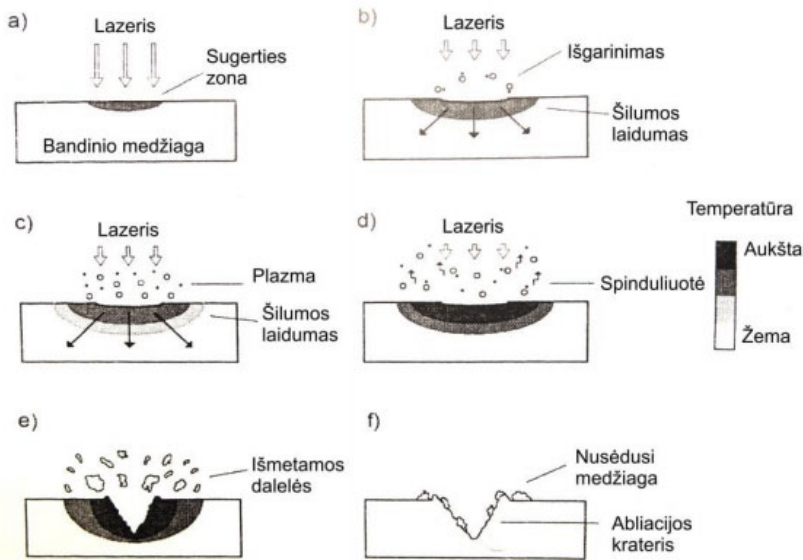
1.2.5. Faziniai virsmai lazerio spindulio veikiamo metalo paviršiuje

Pagrindiniai procesai, vykstantys lazerio spinduliuotei sąveikaujant su kietuoju kūnu, pavaizduoti 1.12 paveiksle.

Šiame paveiksle lazerio impulso trukmė yra nanosekundžių eilės, o bangos ilgis matomoje arba infraraudonojoje spektro srityje. Dalis lazerio spinduliuotės yra sugerama bandinio medžiagoje. Didinant lazerio energiją, atsiranda struktū-rinių medžiagos defektų, nutraukiami ryšiai tarp atomų ir stebimi faziniai virsmai metale. Didinant lazerio spindulio galios tankį bandinys gali išsilydyti ir, dar la-biau padidėjus temperatūrai, išgaruoti. Tai priklauso nuo lazerinio apdorojimo pa-rametrų (Balachninaite et al., 2016).

Pasikeitus išorės sąlygoms, t. y. slėgiui ir temperatūrai, lydiniuose pradeda vykti savaiminiai faziniai virsmai. Metalui pereinant iš vienos polimorfinės mo-difikacijos į kitą, šiluma sugerama arba išskiriama. Tam reikalingas atitinkamo dydžio perkaitinimas (arba peraušinimas), palyginus su fazių pusiausvyros tem-peratūra. Virsmai gali būti difuziniai ir nedifuziniai. Fizikiniams ir struktūriniams pokyčiams tirti naudojamos lydinių būsenos diagramos. Pavyzdžiui, konstrukci-nio plieno terminio apdorojimo procesas prasideda kaitinant termiškai stabilaus austenito srityje. Termiškai paveikto plieno savybės priklauso nuo kaitinimo tem-peratūros, trukmės ir aušinimo greičio. Didelę reikšmę turi pradinis medžiagos apdorojimas. Labai sunku dėl trumpo lazerio poveikio laiko ir nevysiškai įvykusių difuzijos bei metalurginių procesų lydale tiksliai nustatyti austenizacijos proceso

kinetines sąlygas, esant lazeriniam apdorojimui (Balachninaite et al., 2008; Valiulis, 2008).



1.12 pav. Lazerio ir medžiagos sąveikos procesai: a) sugertis ir ryšių nutraukimas; b) šilumos laidumas ir išgarinimas; c) plazmos formavimasis; d) plazmos plėtimasis ir spinduliavimas; e) dalelių išmetimas; f) susiformavęs krateris (Balachninaite et al., 2016)

Fig. 1.12. Laser-material interaction processes: (a) absorption and bond breaking; (b) thermal conductivity and evaporation; (c) plasma formation; (d) plasma expansion and radiation; (e) particulate emissions; and (f) formed crater (Balachninaite et al., 2016)

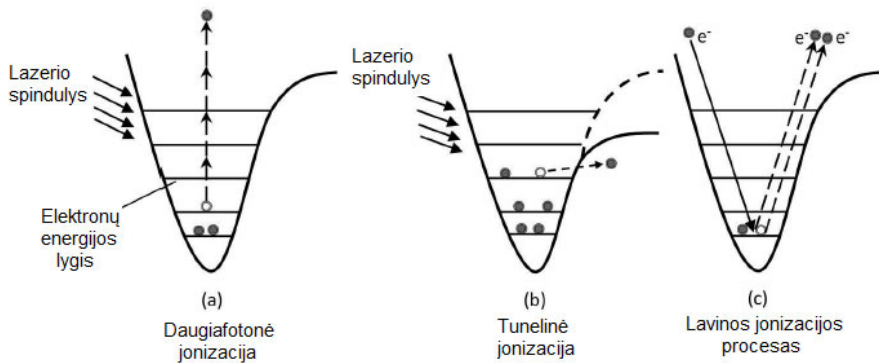
Terminio poveikio rezultatas priklauso nuo besiformuojančių austenito virsmo produktų charakteristikų auštant (grūdelių dydis, struktūros vienodumas, fazių santykis). Plienai gali turėti dviejų tipų struktūrą – stambiagrūdę ir smulkiagrūdę. Lazeriniam grūdinimui būdingas paviršinio sluoksnio didelis perkaitinimas, todėl tam labiau tinka smulkios struktūros plienai.

Struktūros stambėjimą stabdo legiravimas. Eksperimentų metu buvo pastebėta, kad esant lazeriniam poveikiui austenizacija vyksta greičiau nei toje pačioje temperatūroje kaitinant ruošinius tradiciniais būdais bei tai, kad vienkartinio poveikio impulsai labai trumpi, todėl metalo fazės nespėja difuziškai sąveikauti ir dažnai kiekvienos lazeriu paveikto sluoksnio sudedamosios virsmi vyksta pradinėje medžiagos struktūroje (Balachninaite et al., 2008).

Esant mažesniai nei 1 GW/cm^2 intensyvumui, lazerio spinduliuotė nėra lengvai absorbuojama puslaidininkinėse ir dielektrinėse medžiagose, turinčiose nedaug laisvųjų elektronų. Esant didesniai lazerio spinduliuotės intensyvumui

($\geq 1 \text{ GW/cm}^2$), gali vykti netiesiniai procesai, tokie kaip daugiafotonė jonizacija ir tunelinė jonizacija, medžiagos paviršius yra nuolat garinamas. Proceso metu dėl didelio lazerio spindulio intensyvumo vyksta sparti paviršinio sluoksnio jonizacija ir formuojasi plazma (Eliseev et al., 2005; Nath et al., 2019; Narayanan et al., 2019).

Plazma susiformuoja didėjant temperatūrai ir medžiagos garų jonizacijos laipsniui. Apdorojant gali pasireikšti nepageidaujamas plazmos ekranavimo efektas, mažinantis mikroapdorojimo proceso efektyvumą. Plazma plečiasi ir vėliau vėsta perduodama savo energiją aplinkai per susidūrimus, dalelių rekombinaciją ir spinduliuotės emisiją (Balachninaite et al., 2008).



1.13 pav. Įvairių netiesinių absorbcijos procesų, susijusių su dideliu lazerio intensyvumu, schema: (a) daugiafotonė jonizacija, (b) tunelinė jonizacija, (c) lavinos jonizacijos procesas (Narayanan et al., 2019)

Fig. 1.13. Schematic of various nonlinear absorption processes in a matter at high laser intensities: (a) multiphoton ionisation, (b) tunnelling ionisation, and (c) avalanche ionisation process (Narayanan et al., 2019)

Daugiafotonės jonizacijos procese, kai lydalo takelį veikia intensyvus lazerio impulsas, keli fotonai, kurių kiekvienas turi savo energiją, absorbuoja elektronus, kaip pavaizduota 1.13 paveiksle, a. Procesas tampa reikšmingas, kai lazerio intensyvumas yra didesnis nei 1 GW/cm^2 . Esant dideliame intensyvaus lazerio spindulio elektriniam laukui, kai kurie sujungti elektronai taip pat gali tuneliu pereiti per potencialų barjerą (1.13 pav., b) (Nath et al., 2019; Narayanan et al., 2019).

Pagal adiabatiškumo parametą nustatoma, ar dominuos daugiafotonė ar tunelinė jonizacija (Eliseev et al., 2005):

$$\gamma = \frac{\omega \sqrt{2m_e E_g}}{e\epsilon}, \quad (1.4)$$

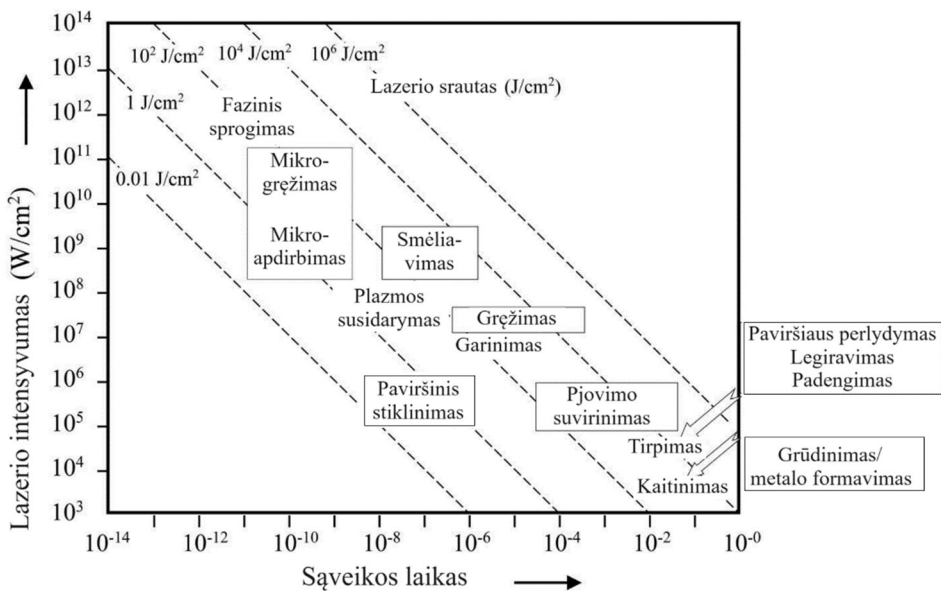
čia ε – elektrinio lauko stipris, ω – kampinis dažnis, m – sumažinta elektrono masė, e – elektronų krūvis, ε – konkretios medžiagos juostos tarpo energija.

Jei $\gamma \geq 1$, vyksta tuo pat metu kelių fotonų absorbcija (daugiafotonės jonizacijos mechanizmas).

Jei $\gamma \leq 1$, vyksta tunelinės jonizacijos mechanizmas (Eliseev et al., 2005).

Keletas laisvų elektronų, kuriuos sukuria anksčiau išvardyti netiesiniai procesai, gali paspartėti, esant dideliame lazerio spinduliuotės elektriniam laukui, įgyti didelę kinetinę energiją ir sukelti tolesnę jonizaciją, esant kontaktui su konkretios medžiagos atomais. Šis procesas vadinamas lavinos jonizacijos procesu (1.13 pav., c). Taigi esant dideliame lazerio intensyvumui, didesniame nei 1 GW/cm^2 , elektronų jonų plazma sukurama per daugiafotonius, tunelinius jonizacijos ir lavinos jonizacijos procesus medžiagoje (Narayanan et al., 2019).

Priklausomai nuo pageidaujamo gauti rezultato ir naudojantis 1.14 paveiksle pateikta diagrama, keičiant lazerio spindulio galios tankį kiekį bei lazerio spinduliuotės sąveikos su bandinio paviršiumi trukmę, galima gauti skirtingus lazerinio apdorojimo metodus, besiskiriančius tarpusavyje savo fizikine prigimtimi.



1.14 pav. Lazerinio apdirbimo metodų diagrama (Narayanan et al., 2019)

Fig. 1.14. Various laser material processing applications (Narayanan et al., 2019)

Diagramoje pateikti lazerinio apdorojimo metodai yra įvardijami kaip atskiri apdirbimo būdai, tačiau juos skiria tik nedidelė riba, kai vieną procesą keičia kitas

(Balachninaite et al., 2008; Markovič, 2018; Nath et al., 2019; Narayanan et al., 2019).

1.2.6. Spinduliuotę sugeriančios dangos

Labai svarbi medžiagų paviršiaus savybė yra gebėjimas sugerti krintantį lazerio spinduliuotės srautą. Šis parametras vadinamas medžiagos absorbcija. Absorbcijos vertės yra svarbios apskaičiuojant lazerinio apdorojimo proceso efektyvumą ir prognozuojant vis dažniau naudojamų lazerinių procesų poveikį medžiagai. Lazerio spindulio sąveika su bet kokia medžiaga sukelia dalelių (t. y. elektronų, molekulių, atomų ir kt.) svyravimus ir padidina medžiagos vidinę energiją. Yra žinoma, kad dalį lazerio spinduliuotės galios sugeria medžiaga, o dalis atsispindi nuo jos. Medžiagą veikiant lazeriu, svarbiausia yra ne spinduliuotės galia, o energija, kurią medžiaga sugeria. Kai lazerio spindulys veikia ruošinį, dalį lazerio energijos apdorojama medžiaga sugeria, todėl medžiaga kaista. Kuo didesnę energijos kiekį medžiaga sugeria, tuo stipriau ir giliau įkaista medžiaga. Lazerio spinduliuotės srauto įkaitintos medžiagos gylis priklauso nuo spindulio bangos ilgio. Pavyzdžiui, esant bangos ilgiui $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$, juodųjų metalų (Fe ir Fe lydiniai) spinduliuotės energijos sugertis yra 10–30 %, esant bangos ilgiui $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$, spinduliuotės energijos sugertis siekia jau 50–80 %. Siekiant padidinti lazerinių technologinių procesų našumą, būtina pagerinti medžiagų gebėjimą sugerti lazerio spinduliuotės srautą. Šiam tikslui pasiekti medžiagų paviršiuose formuojamos įvairios specialios dangos arba sluoksniai, kurie užtikrina mažą krintančios spinduliuotės atspindį bei didina paviršiaus absorbciją. Metalai turi labai didelį lazerio spinduliuotės atspindžio koeficientą, o tai paaiškina ir jų blizgesį. Kadangi metalų spinduliuotės srauto atspindys yra didelis, jų sugertis yra maža, nes abiejų šių parametrų suma turi sudaryti 100 % krintančio spinduliuotės srauto (Balachninaite et al., 2008; Šniuolis, 2014).

Siekiant padidinti lazerio spinduliuotės sugertį, apdorojant įvairias metalines medžiagas, dažniausiai taikomi įvairūs būdai. Metalų paviršiams apdoroti lazerio bangos ilgis parenkamas įvertinus medžiagos kritinį bangos ilgį. Pavyzdžiui, Al, Au ir Ti kritiniai bangos ilgiai yra atitinkamai maždaug 1064 nm, 630 nm ir 10000 nm. Kai lazerio spindulio bangos ilgis yra didesnis už kritinį bangos ilgį, metalo paviršiaus atspindys lazerio spinduliui smarkiai padidėja, o jo sugertis smarkiai sumažėja, todėl atsispindi daugiau nei 92 % krintančio lazerio spinduliuotės pluošto. Šviesolaidinio lazerio YAG, dažniausiai naudojamo lazeriniam mikroapdirbimui, lazerio bangos ilgis yra 1064 nm. Esant tokiam bangos ilgiui, daugumos metalų, tokių kaip Al, Cu, Ag, Pt, Zn ir Pb, atspindys yra didesnis nei 80 %. CO₂ dujų lazerio, kuris dažnai naudojamas didelės galios lazeriniam apdorojimui, lazerio bangos ilgis yra 10 600 nm. Dėl to daugumos metalų atspindys

yra didesnis nei 90 % ir lazerinio apdorojimo procesas turi labai mažą efektyvumą.

Metalinis paviršius gali būti padengiamas atitinkama danga, kad būtų pagerinta krentančio lazerio spinduliuotės srauto sugertis. Paprastai tai gali būti grafito arba mangano fosfato danga. Dėl šios dangos susidaro juodas sugeriantis sluoksnis, kuris gali pagerinti absorbciją iki 60–80 %. Tačiau labai svarbus yra tinkamas dangos storis. Jei danga per stora, dėl per didelės lazerio spinduliuotės absorbuojamos dalies ji gali išgaruoti lazerinio apdorojimo proceso pradžioje. Jei danga per plona, ji gali visiškai išgaruoti lazerio spinduliui net nepasiekus apdorojamos vietos iki apdorojimo lazeriu pradžios, todėl lazerinio apdorojimo metu metalo paviršius turės didelį atspindį. Dangos storis turi įtakos lazerio spinduliuotės srauto energijos absorbcijai ir jos perdavimui į metalą per šilumos laidumą. Jei lazerinio apdorojimo pabaigoje spinduliuotę sugerianti danga išgaravo, tai laikoma optimaliu dangos storiu. Šį parametą galima nustatyti atliekant bandymus.

Lazerinis procesas apibūdinamas kaip aplinką tausojanti bei išteklius taupanti technologija. Lazerinė technologija siūlo daugybę paviršių valymo ir modifikavimo galimybių. Pvz., metalinius paviršius galima padaryti atsparesnius korozijai, pagerinti dangų sukibimą arba sukurti naujus sluoksnius, kuriuose būtų galima laikyti ir transportuoti skysčius. Naudojant paviršių apdorojimą lazeriu, galima pagerinti medžiagų paviršių sugeriamąsias (absorbcijos) savybes (Zhu et al., 2020). Jame visų pirma naudojamas eksimerinio lazerio derinys su UV spindulių spektru ir CO₂ lazerio spinduliuote tuo pačiu metu atliekamam tolesniam apdorojimui, todėl žymiai padidėja CO₂ lazerio spindulio absorbcija medžiagos paviršiuje. Išankstinio apdorojimo efektyvumui daugiausia įtaką daro trys veiksniai: lazerio energija, lazerio impulsų skaičius ir medžiagos fizikinės savybės. Išankstinis apdorojimas yra sudėtinga technologija ir šiuo metu daugiausia remiasi praktine patirtimi, todėl reikia atlikti tolesnius teorinius tyrimus ir išsiaiškinti, kokią įtaką dangų savybėms daro skirtingi lazerinio apdorojimo parametrai.

Mechaninio ir cheminio paviršiaus paruošimo technologijos taip pat gali reikšmingai pagerinti metalų paviršių absorbciją, pvz., metalo paviršiaus šiurkščio didinimas iki tam tikro dydžio, bandinio metalo paviršiaus apdorojimas rūgštinėmis medžiagomis siekiant suformuoti metalo junginių sluoksnį (oksido ir t. t.) (Heigl, 2004; Seibold, 2006).

1.2.7. Paviršiaus kietinimas lazeriu

Vienas labiausiai paplitusių lazerinio apdorojimo būdų yra ruošinio paviršiaus metalo sukietinimas. Šiuo būdu galima sukietinti detalių paviršius, ypač tada, kai reikalingas lokalus poveikis. Taikant šią technologiją taip pat galima keisti sukie-

tinamo sluoksnio gylį, nekeičiant detalės geometrinių matmenų ir išvengiant didelių gaminio deformacijų (Zohuri et al., 2021). Tai ypač svarbu tikslių prietaisų gamyboje.

Sukietinant lazeriu intensyvus koncentruotas lazerio spinduliuotės pluoštas (sufokusuotas nuo milimetro dalių iki kelių milimetrų paviršiaus plote) veikia apdirbamo metalo paviršiaus sritį, kurios paviršinis sluoksnis sugeria spinduliuotę ir greitai įkaista iki aukštos temperatūros, viršijančios kritines temperatūros (mikrostruktūros fazinių virsmų) reikšmes. Nustojus veikti lazerio spinduliuotei, įkaitęs paviršiaus metalas dėl šiluminio laidžio į medžiagos gilesnius sluoksnius greitai ataušta. Dėl greito metalo paviršiaus sluoksnio aušinimo susidaro kieta martensitinės sandaros struktūra.

Sukietintos medžiagos sluoksnio storis, plotis, kietumas, stipris ir kt. fizikinės savybės priklauso nuo detalės matmenų ir jos apdirbimo greičio, spinduliuotės srauto energinių parametrų, fizikinių ir cheminių medžiagos savybių, detalės paviršiaus švarumo laipsnio ir atspindžio koeficiento (švarūs, blizgantys paviršiai kartais atspindi net iki 90 % lazerio spinduliuotės). Kuo daugiau metalas sugeria energijos, tuo giliau paveikiamas paviršiaus metalas ir tuo storesnis būna sukietinamas sluoksnis. Tačiau labai didinant spinduliuotės srauto tankį, dėl intensyvaus jo poveikio detalės paviršiaus metalas pradeda lydytis, o vėliau ir garuoti. Sukietintas apdoroto metalo sluoksnis dažniausiai būna ne storesnis kaip 2 mm (Balachninaite et al., 2008; Šniuolis, 2014).

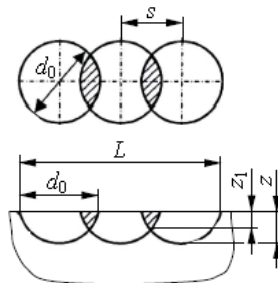
Daugiausia taikomi du lazerinio sukietinimo būdai (Šniuolis, 2014):

- Paviršinis sluoksnis įkaitinamas neviršijant medžiagos lydymosi temperatūros ir nepaveikiant apdirbamojo paviršiaus mikrogeometrijos. Šiuo atveju paviršius sukietėja dėl martensitinio fazinio virsmo, esant dideliams įkaitinimo ir aušinimo greičiams.
- Paviršinio sluoksnio metalas išsilydo iki tam tikro gylio. Sukietintą sluoksnį sudaro perlydyta ir grūdinimo paveikto metalo sritys. Šis būdas netinka jau termiškai apdorotam įrankių plienui.

Metallų ir jų lydinų paviršių galima sukietinti naudojant impulsinės ir nuolatinės veikos lazerius. Sukietinant nuolatinės veikos technologiniais lazeriais, gaunamas storesnis ir tolygesnis sukietintas sluoksnis, procesas vyksta 2–4 kartus sparčiau negu sukietinant impulsiniais lazeriais. Atliekant lazerinį sukietinimą bei norint kad būtų užtikrintas visas norimo paviršiaus ploto padengimas, lazerinio apdorojimo technologinis procesas turi būti toks, kad detalės paviršiuje lazerio spinduliuotės srauto takeliai iš dalies dengtų vienas kitą (1.15 pav.).

Lazerinio apdorojimo parametrų ir sanklotos (dalinio sutapimo) koeficiento pasirinkimas priklauso nuo norimo gauti efekto (Balachninaite et al., 2008; Angelastro et al., 2013; Šniuolis, 2014; Joshi et al., 2018).

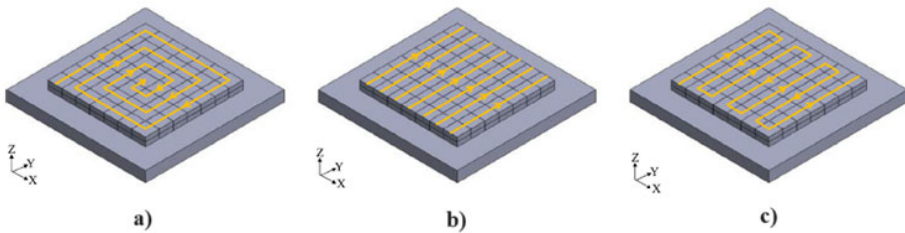
Detalių paviršių lazeriu galima sukietinti ištais, atskirais plotais arba juostelėmis. Proceso našumui padidinti efektyvu kietinti atskirais plotais arba juostelėmis. Juostelių žingsnį galima pasirinkti, dažniausiai jis priklauso nuo kietinamos detalės paskirties ir jos darbo sąlygų. Kietinant plokščiąjį paviršių, detalė gali judėti slenkamuoju judesiu, o lazerio spindulys skersai, sinusoide, apskritimu, aštuoniuke, begalybės trajektorija ir t. t. Detalė gali judėti svyruojamu judesiu (arba kitokia trajektorija) ir tuo pačiu metu detalei suteikiamas ir slenkamasis judesys. Tokiu principu darbo našumas gali siekti $500 \text{ cm}^2/\text{min}$.



1.15 pav. Lazerinio apdorojimo skenavimo schema: s – apdirbimo žingsnis; d_0 – spinduliuotės dėmės skersmuo; z – terminio poveikio gylis; z_1 – pakartotinio terminio poveikio gylis (Valkov et al., 2018)

Fig. 1.15. Scanning scheme of laser processing: s – processing step; d_0 – diameter of the radiation spot; z – depth of thermal exposure; z_1 – depth of repeated thermal exposure (Valkov et al., 2018)

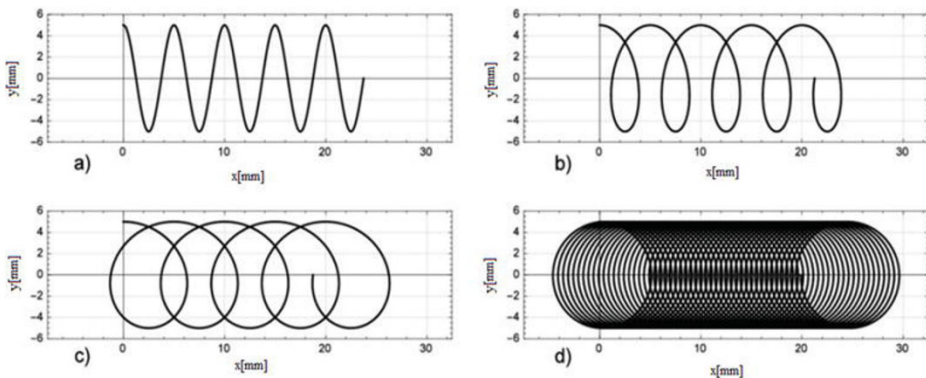
Elektriniai, elektromagnetiniai, magnetostrikciniai, pjezokeraminiai apdorojamos detalės ir lazerio spindulio svyravimų žadintuvai leidžia realizuoti skirtingas kietinimo schemas, nuo kurių priklauso metalo kietėjimo proceso dinamika, jo valdymas bei norimas gauti rezultatas (1.16 pav. ir 1.17 pav.). Apdirbamos detalės greitis procese taip pat yra labai svarbus parametras. Bandinio judėjimo metu lazerio spinduliuotės energija perduodama šilumos pavidalu į medžiagos tūrį. Nuo apdorojamo paviršiaus judėjimo greičio priklauso paveikto metalo kaitinimo ir aušinimo greičiai. Padidėjus bandinio judėjimo (lazerinio apdorojimo) greičiui, lazerinės spinduliuotės energija ir lazerio spindulio galios tankis į apdorojamąjį paviršių sumažėja. Nuo lazerio spinduliuotės intensyvumo ir bandinio judėjimo greičio priklauso gaminio sukietintų sričių tūriai, storiai ir pločiai (Šniuolis, 2014; Pitassi et al., 2017; Valkov et al., 2018; Ren et al., 2019).



1.16 pav. Lazerinio skenavimo schemas: a) spiralė; b) lygiagrečiais takeliais; c) zigzagas (Ren et al., 2019)

Fig. 1.16. Laser scanning pattern: (a) spiral pattern; (b) offset pattern; and (c) zigzag pattern (Ren et al., 2019)

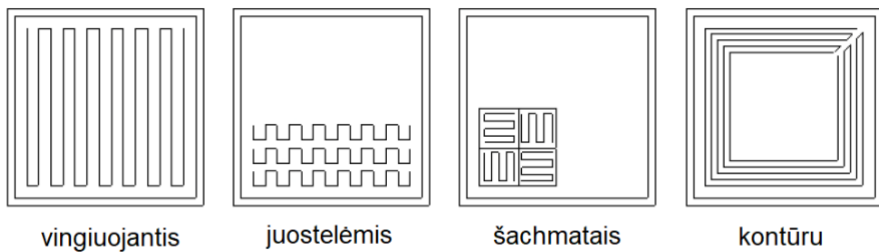
Lazerio skenavimo schema apdorojimo metu turi didelę įtaką apdorojamos medžiagos mikrostruktūrai, mechaninėms savybėms, bandinio deformacijoms ir liekamųjų temperatūrinių įtempių pasiskirstymui (Ren et al., 2019; Tejero-Martin et al., 2019).



1.17 pav. Lazerinio skenavimo schemas: a) sinusoidinė; b) sukamoji elipsės formos; c) sukamoji apskritimais, didesniu bandinio judėjimo greičiu; d) sukamoji apskritimais, lėtesniu bandinio judėjimo greičiu (Valkov et al., 2018)

Fig. 1.17. Different types of scanning electron beam: (a) sinusoidal dithering; (b) ellipsoidal rotating; (c) circular rotating with higher specimen movement velocity; (d) circular rotating with slower specimen movement velocity (Valkov et al., 2018)

Universalios bandinio arba dangos paviršiaus skenavimo schemas nėra, todėl būtina atlikti išsamius tyrimus ir rasti tinkamiausią skenavimo schemą, atsižvelgiant į gaminio geometriją, charakteristikas ir medžiagos savybes (1.18 pav.) (Pitassi et al., 2017).



1.18 pav. Skirtingi skenavimo būdai: vingiuojantis (zigzagais), juostelėmis, šachmatais ir kontūru (Pitassi et al., 2017)

Fig. 1.18. Different scanning strategies: meander, stripes, chess, and contour (Pitassi et al., 2017)

Dvi dažniausiai pasitaikančios skenavimo schemas yra vingiavimas ir skenavimas juostelėmis. Skenuojant juostelėmis ir šachmatais pavienių skenavimo linijų ilgis mažesnis, todėl sumažinama liekamųjų įtempių koncentracija bei pagerinamos apdorojamo lydinio mechaninės savybės (Amirjan et al., 2019; Guo et al., 2019). Buvo pastebėta, kad, mažinant lazerinio apdorojimo trajektorijos šachmatų kvadratų kraštinės dydį, metalo liekamieji įtempiai nebemažėja. Buvo įrodyta, kad skenavimo technologija lazeriu leidžia kurti apdorojimo takelius, lygiagrečius su gaminio krašto geometrija, todėl tai turi teigiamą įtaką paviršiaus kokybei (Han et al., 2018; Koutny et al., 2018; Liu et al., 2019).

Lazerio spinduliuote sukietintas paviršiaus sluoksnis dėl aukštatemperatūro poveikio metalui yra vizualiai gerai matomas detalės paviršiuje. Kadangi apdoroto metalo terminio poveikio srities dydis priklauso nuo lazerio impulsų trukmės, lazerinis apdorojimas ilgais impulsais dažnai palieka matomus pokyčius metalo paviršiuje, atsirandančius dėl šiluminio lazerio poveikio. Lazeriu sukietinto metalo paviršius dėl terminio poveikio ir esančio ore deguonies iš dalies oksiduojasi ir patamsėja lyginant su nepaveiktu lazerio spinduliuote paviršiumi. Apdoroto lazeriu bandinio paviršiniame sluoksnyje metalo struktūra yra smulkiagrūdė, o gilesniuose sluoksniuose pamažu pereina į pradinę metalo lydinio struktūrą. Toks sukietintas metalo sluoksnis, laipsniškai pereinantis į pradinę struktūrą, yra gerai sukibęs ir dažnai pasižymi geromis eksploatacinėmis savybėmis (Balachninaite et al., 2008; Piasecka, 2014).

Apdorojant lazeriu, norint gauti tolygesnį temperatūros pasiskirstymą paviršiniame sluoksnyje ir geresnes apdirbamo sluoksnio mechanines savybes (tolygias fizikines medžiagos savybes visomis kryptimis), tikslinga naudoti lazerinio skenavimo trajektorijos vektorių tarp nuoseklių apdorojimo etapų, kai proceso metu keičiama lazerio srauto kryptis (Amirjan et al., 2019; Jis et al., 2021). Kartais pakartotinis apdoroto metalo perlydymas yra naudingas norint gauti smulkiagrūdę

arba smulkiadispersę mikrostruktūrą, geras mechanines savybes ir sumažinti liekamuosius įtempius. Renkantis lazerinio apdorojimo schemą geriau pasirinkti trumpesnę skenavimo vektoriaus ilgį, naudoti optimalią skenavimo seką bei lazerio trajektorijos sukimosi kampą.

1.2.8. Lazerinis paviršių legiravimas

Lazerinis paviršių legiravimas – medžiagų apdorojimo būdas, kurio metu naudojant fokusuotos lazerio spinduliuotės šaltinį gaunamas didelis energijos tankis legiruojančiųjų medžiagų sluoksniui ir pagrindiniam metalui išlydyti. Tai nesudėtingas ir našus procesas, kurio metu keičiasi apdoroto paviršinio sluoksnio cheminė sudėtis. Substrato paviršinis sluoksnis legiruojamas pridėtine medžiaga, kuri gali būti įvairių miltelių ar pastų pavidalo. Taikant lazerinį apdorojimą gaminio paviršiuje galima suformuoti lydinio sluoksnį, kuriam būdingos naujos fizikinės, cheminės, mechaninės savybės. Lazerinio legiravimo metu naudojamos lazerio spinduliuotės galios tankis siekia $10^4\text{--}2\cdot 10^5\text{ W/cm}^2$. Lazerinės spinduliuotės veikiamas substrato paviršiaus metalas susilydo su legiravimo priedų sluoksniu, todėl legiravimo elementai susimaišo su pagrindiniu metalu. Apdorojimo metu greitai kaitinant ir aušinant naujai suformuotą sluoksnį, gaunamos paviršiaus metalo savybės, kurių neįmanoma pasiekti kitais įprastais apdorojimo metodais. Labai dideli gauto legiruoto sluoksnio aušinimo greičiai leidžia formuoti smulkias (iki nano dydžio) ir netgi amorfinės lydinio struktūras, pasižyminčias didelio metalo stiprio charakteristikomis. Legiravimo metu vyksta sudėtingi masės ir šilumos mainai bei mikrometalurginiai procesai perlydytame metalė (Škamat, 2013; Šniuolis, 2014; Jeyaprakash et al., 2019).

Cheminiai legiravimo elementai, naudojami lazeriniam apdorojimui, skirstomi į tris grupes:

- Nemetalinės medžiagos (C, N, B, Si ir kt.). Įsotinus anglimi mažanglį plieną, galima gauti smulkiagrūdę martensitinę struktūrą, kurios mikrokietumas siekia 9 GPa. Po lazerinio azotinimo plieno struktūroje susidaro martensitas, liekamas austenitas ir kieti legiravimo elementų nitridai (geležies nitridai nepasižymi dideliu kietumu). Lazerinio apdorojimo būdu įterpiant į plieną boro, jo struktūroje daugėja geležies boridų (FeB , Fe_2B , Fe_3B), o mikrokietumas padidėja iki (12–21) GPa. Tokie paviršiai yra atsparūs abrazyviniam dilimui. Prisotinus metalus siliciu, lazerio poveikio srityje susidaro geležies silicidai Fe_3Si , Fe_2Si_3 , FeSi , FeSi_2 , o mikrokietumas padidėja iki 14–15 GPa. Padidėja paviršiaus metalo atsparumas dilimui, korozijai, aukštos temperatūros poveikiui. Silicis didina legiruoto metalo stiprį, tamprumą, atsparumą rūgštims.

- Metalai ir jų lydiniai (Co, Cr, Ni, Mn, Mo, W, Ti, V). Legiruojant gaminio paviršinį sluoksnį pridėtiniais metalais ir jų lydiniais perlydytame metalo susidaro persotinti kietieji tirpalai ir intermetaliniai junginiai. Legiruoto metalo sluoksnio mikrokietumas siekia iki 8–10 GPa. Chromas padidina legiruoto metalo kietumą, stiprį, atsparumą korozijai. Vanadis didina kietumą ir stiprį, smulkiną lydinio grūdelius. Titanas didina metalo stiprį ir tankį, turi įtakos smulkinant grūdelius, gerina apdirbamumą ir atsparumą korozijai. Manganas didina lydinio kietumą, atsparumą dilimui, smūginėms apkrovoms ir nemažina plastiškumo. Kobaltas didina legiruoto metalo atsparumą karščiui, pagerina magnetines savybes, padidina atsparumą smūgiams. Molibdenas didina tamprumą, stiprio ribą tempiant, pagerina lydinio antikoroazines savybes ir didina atsparumą oksidacijai, esant aukštai temperatūrai. Aliuminis didina metalo atsparumą korozijai, plastiškumą ir stiprį. Bronza didina lydinio plastiškumą, kietumą, atsparumą. Nikelis didina metalo atsparumą korozijai ir plastiškumą. Taip pat nikelis su daugeliu cheminiu elementu sudaro kietąjį tirpalą ir gali ištirpinti jų daug ir įvairiais santykiais. Tai leidžia keičiant legiravimo elementų kompoziciją, 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 šių priežasčių nikelis yra puikus pagrindas apsauginėms dangoms kurti (Gargasas, 2011).
- Karbidai. Jei lazerinio apdorojimo metu suformuoto legiravimo sluoksnio medžiagoje yra daug karbidų, labai padidėja legiruoto metalo kietumas ir atsparumas dilimui. Metalai legiruojami daugiausia sunkiai lydžių metalų karbidais (TiC, VC, TaC, WC) (Šniuolis, 2014).

Legiruoto perlydyto metalo cheminė sudėtis labiausiai lemia gaunamų paviršiaus sluoksnių fazinę sudėtį ir fazių santykį. Legiravimo procesas gali būti taikomas suformuotų dangų savybėms pagerinti, kadangi perlydyto sluoksnio metalo cheminės sudėties patobulinimas leidžia pakeisti metalo mikrostruktūrą ir pasiekti norimą rezultatą. Purškiami milteliai dažniausiai maišomi su metalų karbidais (WC, TiC, VC, $B_{13}C_2$, SiC ir kt.), boridais (TiB_2), oksidais (CeO_2 , La_2O_3 , Y_2O_3 ir kt.) ir pan. (Sidhu et al., 2006; Xu et al., 2012; Skamat, 2013; Fu et al., 2019).

Tarp metalo matricos metalo keraminių kompozitų plačiai naudojamas nikelio pagrindu pagaminto lydinio ir volframo karbido derinys. Įvairiais tyrimais buvo analizuojama lazerinio apdorojimo parametrų, taip pat miltelių kompozicijos įtaka galutiniam volframo karbidų susidarymui dangoje, jos funkcinėms savybėms bei kietumui (Amado et al., 2011; Luo et al., 2015; Deschuyteneer et al., 2015; Vostřák et al., 2018). Volframo karbido priedo taikymas taip pat turi tam

tikrų trūkumų, kurie gali apriboti jo naudojimą. Volframo karbidas smarkiai suskaidomas lazerinio apdorojimo procese ir turi mažesnę termodinaminę stabilumą, palyginti su daugeliu kitų karbidų (Fiala et al., 2017; Vostřák et al., 2019). Siekiant įveikti apribojimus, susijusius su volframo karbidų metalo keraminių dangų formavimu, kuriami nauji volframo karbidų ir metalo matricos kompozitų dangų tipai (Fiala et al., 2017). Fiala et al. (2017) atlikto tyrimo metu buvo palygintos dangos su $(\text{TiW})\text{C}_{1-x}$ karbidais mikrostruktūra ir mechaninės savybės su įprasta volframo karbidų danga. Nustatyta, kad dangoje su $(\text{TiW})\text{C}_{1-x}$ didelis karbido dalelių kiekis neištirpsta, palyginti su volframo karbidų danga. Priklausomai nuo lazerinio apdorojimo metu naudojamo lazerio spindulio galios tankio, skiriasi karbidų tirpimas dangos metale. Esant dideliame lazerio spindulio galios tankiui, neištirpusios karbidų dalelės koncentruojasi vidurinėje dangos metalo matricos dalyje perlydyto metalo paviršiuje, o perlydyto metalo paviršiuje ištirpsta daugiau karbidų. Esant mažam lazerio spindulio galios tankiui, karbidai neištirpsta per visą dangą. Naujos suformuotos siekia 1070–2370 HV ir yra didesnis nei pagamintų dangų su volframo karbidais kietumas (Vostřák et al., 2019).

Silicio karbidas (SiC) yra puslaidininkis, pasižymintis tokiomis savybėmis, kaip plati izoliavimo juosta, didelis elektrinio lauko stiprumas ir didelis nešiklio prisotinimo greitis. Kartu su geru cheminiu ir terminiu stabilumu leidžia gaminti prietaisus, skirtus aukšto dažnio, aukštos įtampos, aukštos temperatūros ir stiprios spinduliuotės aplinkai. Be to, kompozitinės medžiagos, pagamintos naudojant SiC, turi daug privalumų, tokių kaip lengvas svoris, atsparumas smūgiams ir atsparumas aukštai temperatūrai, todėl jos yra labai perspektyvios aviacijos ir kosmoso medžiagų ir karinių medžiagų srityse. Tačiau tam tikros problemos ir iššūkiai trukdo plačiai taikyti SiC matricų kompozitus (Sun et al., 2024). Silicis reaguoja į įvairių metalų priemaišas dangoje ir lengvai sudaro trapius silicidus, pvz., nikelio (Cuppoletti, 2011). Norint išspręsti šią problemą, buvo atlikti tyrimai su SiC ir Ni pagrindo superlydinio jungtimis: naudojant $\text{Ni}_{0.93}\text{B}_{0.07}$ tarpinę dangą, naudojant Ag tarpinę dangą ir naudojant Ag foliją. Pirmuoju atveju buvo pastebėta, kad boro pridėjimas į tarpinės dangos metalą nėra pakankamas veiksnys, kad būtų išvengta besiformuojančių jungties silicidų trapumo, veikiant dideliems liekamiesiems įtempiams metale. Antruoju atveju, naudojant Ag tarpinę dangą ($\approx 2\text{ }\mu\text{m}$), žymiai sumažėjo SiC reakcija su Ni matrica. Galima daryti išvadą, kad pakankamas Ag tarpinės dangos storis ($> 50\text{ }\mu\text{m}$) gali užkirsti kelią nepageidautinai silicidų formavimosi reakcijai esant $900\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrai. Trečiuoju atveju buvo ištirtas naujas būdas sujungti SiC ir Ni pagrindo lydinį, naudojant aukštą proceso temperatūrą ($600\text{ }^\circ\text{C} < T < 800\text{ }^\circ\text{C}$) bei naudojant storą Ag foliją ($\approx 200\text{ }\mu\text{m}$). Įrodyta, kad naudojant sidabro foliją tarp SiC ir Ni sluoksnių padidėja mechaninis atsparumas šlyčiai. Taikant šį metodą, buvo pagamintos jungtys, pasižyminčios dideliu atsparumu šlyčiai (iki $45 \pm 9\text{ MPa}$) (Hattali et al., 2012).

Paviršių legiravimas Ce, La, Y cheminiais elementais ar jų oksidais turi platų poveikį: padidina legiruoto metalo kietumą, atsparumą abrazyviniam dilimui, tąsumą, atsparumą oksidacijai ir korozijai, susmulkina struktūrą, sumažina porėtumą bei sumažina trinties koeficientą (Kunlin et al., 1998; Sharma, 2012; Zhang et al., 2014; Ye et al., 2018).

1.2.9. Daugiakomponentės, savitės, korozijai ir dilimui atsparios dangos

Daugelyje pramonės sričių: elektronikos, energetikos, chemijos, telekomunikacijų, mikro- ir nanoelektronikos, taip pat medicinoje techninė ir technologinė pažanga gali būti pasiekta tik naudojant naujas daugiakomponentes, daugiafunkces, specifinėmis fizikinėmis ir cheminėmis savybėmis pasižyminčias dangas (Tamulevičius et al., 2007). Daugiakomponentėms dangoms būdingas didesnis medžiagos kietumas ir didesnis atsparumas įtrūkiams, lyginant su dvikomponentėmis dangomis (Chim et al., 2009).

Daugeliu atvejų vienakomponentė danga negali atitikti visų detalės paviršiui keliamų reikalavimų, todėl kuriamos kompozicinės, daugiafazės dangos, kurių struktūrą sudaro mikro- ir nanometrinio dydžio fazių mišiniai. Paviršiaus savybes lengviausia pagerinti parinkus tinkamos sudėties paviršinę dangą. Norint pagerinti medžiagos ar apsauginės dangos atsparumą dilimui, reikia vienu metu didinti medžiagos kietumą ir tamprumo modulį. Didelį paviršiaus išdilimą galima sumažinti paviršių padengus dilimui atsparia danga, tokia kaip TiN, TiC, Ti(CN) ir Al_2O_3 arba daugiasluoksne WC/MeC danga (Valiulis, 2012). Tyrimais nustatyta, kad šie elementai didina atsparumą trinčiai ir dilimui bei padidina dangos metalo kietumą (Gargasas, 2011; Azadi et al., 2016).

Nanokristalinės medžiagos pasižymi unikalėmis cheminėmis, fizikinėmis ar mechaninėmis savybėmis. Nanokristalinių medžiagų dangos yra ypač kietos ir stiprios. Labai našus dangų sudarymo iš nanomiltelių būdas yra miltelių plazminis ar didelio greičio liepsninis-deguoninis purškimas. Vienos technologinės operacijos metu milteliai išlydomi, greitai aušinami ir bloškiami į dengiamos detalės paviršių. Pastebėta, kad termiškai purškiamos dangos, naudojant nanomiltelius, yra labiau atsparesnės nusidėvėjimui nei sudarytos iš mikrokristalinio dydžio miltelių. Didelio greičio liepsninio-deguoninio purškimo būdu sudarytos dangos, lyginant su plazminiu purškimu, dėl mažesnės purškiamos medžiagos dalelių temperatūros yra mažesnio porėtumo, stipresnio ryšio su substratu ir geresnio atsparumo dilimui. Šiuo būdu labai sėkmingai kuriamos kietos ir atsparios dilimui keraminės bei metalo keraminės dangos (Tjong et al., 2004; Valiulis, 2012; Tiwari et al., 2019).

TiN ir CrN dangos turi skirtingus formavimosi ypatumus. Pavyzdžiui, TiN danga aukštesnėje negu 500 °C temperatūroje pradeda intensyviai oksiduotis ir ant TiN paviršiaus susidaro silpnai sukibusi su titano nitridu TiO_2 fazė, kuri labai

blogina TiN dangos atsparumą dilimui. TiN dangos kietumas žymiai mažėja aukštesnėje negu 700 °C temperatūroje. CrN dangos pasižymi akivaizdžiai geresniu atsparumu aukštemperatūrei oksidacijai, nes ant jų paviršiaus susidaro tankaus ir pasyvaus Cr₂O₃ oksido sluoksnis, stabdantis tolesnį dangos oksidavimąsi. Oksiduotis jos pradeda aukštesnėje negu 700 °C temperatūroje (Steyer et al., 2003; Chim et al., 2009; Erne et al., 2012; Baran et al., 2014; Mahato et al., 2016).

Chromo boridų dangos yra atsparios korozijai ir dilimui. Dangos, sudarytos taikant nuolatinės srovės magnetroninį dulkiniimą, būna amorfinės sandaros, neaukštos kokybės. Taikant kintamosios srovės magnetroninio dulkinimo metodą, gaunamos labai kietos CrB₂ dangos, kurių kietumas yra apie 45–54 GPa. Tyrimais buvo nustatyta, kad nusėdusi CrB₂ danga turėjo tankesnę struktūrą ir geresnį atsparumą korozijai (Choi et al., 2007; Valiulis, 2012; Weng et al., 2019).

Pastaraisiais dešimtmečiais suformuojama daug įvairios sudėties trikomponentinių (Ti-Al-N, Ti-B-N, Ti-Al-B, Ti-Si-B, Ti-Si-N) ir keturkomponentinių (Ti-Al-Si-N, Ti-Al-B-N, Ti-B-C-N) plonų dangų kompozicijų. Šios dangos yra labai kietos (70 GPa), atsparios dilimui ir korozijai, pasižymi geru sukibimu su substratu stipriu ir šiluminiu stabilumu. Tokias geras eksploatacines dangų charakteristikas lemia labai mažas kristalitų dydis, didelis kiekis grūdų ribų paviršių, mikro- ir makroįtempiai, pasikeitęs nemetalinių elementų tirpumas ir susidariusi daugiafazė kristalinė būseną (Audronis et al., 2007; Chen et al., 2010; Valiulis, 2012; Mahato et al., 2016; Malvajerdi et al., 2019).

Savitėpės dangos, eksploatuojamos sausos trinties sąlygomis, pasižymi skirtingomis struktūromis, o kartais net gali ir skirtis priklausomai nuo sudedamųjų dangos dalių. Dangos matrica gali būti sudaryta iš kietų karbidinių ar specialios paskirties keraminių darinių (PTFE, h-BN, grafito, MoS₂, MoSe₂, WSe₂ ir kt.), o paviršiniai sluoksniai padengti minkštesnėmis dangomis (Gargasas, 2011; Armada et al., 2013). Šioms medžiagoms būdingas mažas trinties koeficientas, susijęs su jų sluoksniuota 2D struktūra, kuri užtikrina lengvą slydimą bazinės kristalinės gardelės plokštuma. Ypač geras savybes turi funkcinės ir gradientinės dangos. Šiuo atveju dangos sudėtis ir mechaninės savybės palaipsniui kinta, atsižvelgiant į dangos storį (tiek makro-, tiek mikrolygmenyje). Jos sudarytos iš kieto vidinio sluoksnio, kuris iš trintyje esančios dangos medžiagos pusės užtikrina mažą slėgį į substrato paviršių. Ant šio sluoksnio sudaromas kitas išorinis sluoksnis, kurio yra labai mažas trinties koeficientas, t. y. sluoksnis, turintis savaiminio tepimo savybių. Paprastai tokį dvigubą sluoksnį sudaro daugiakomponentė danga, sudaryta iš TiB₂-MoS₂. Šių dangų trinties koeficientas yra tik 0,05, o metalo kietumas siekia 20 GPa. Tokios dangos 2D struktūra gali efektyviai padidinti gaminio paviršinio sluoksnio metalo stiprį, kietumą, atsparumą dilimui ir įvairiems įbrėžimams bei suteikti dangų technologijai kokybinį šuolį, t. y. padidinti dangos eksploatacijos laiką ir pritaikymo galimybes (Valiulis, 2012; Baran et al., 2014; Swaminathan et al., 2015; Wang et al., 2018; Li et al., 2018).

Lazerinio legiravimo metu maišant ir išlydant skirtingų fizikinių ir cheminių savybių medžiagas, dažnai kristalizacijos metu vyksta atskirų komponentų segregacija. Jeigu komponentų segregacija nepageidautina, tai lydymui naudojama impulsinė periodinė lazerio spinduliuotė, kuri dėl impulsinio poveikio lydalui pagerina dangą sudarančių komponentų susimaišymo vienodumą ir paskesnę dangos paviršiaus mechaninį apdirbamumą, kartu gali dangos trinties koeficientą sumažinti iki dviejų kartų (Valiulis, 2012).

Savitepės dangos dažniausiai formuojamos iš kietųjų komponentų, nes terminio purškimo procese sudėtinga skystus dangos komponentus išlaikyti kietoje dalelės medžiagoje. Šiuo atveju skysti komponentai turėtų atlaikyti ekstremalias terminio purškimo proceso sąlygas (aukštą temperatūrą, dalelių smūgi į substratą). Eksperimentiškai buvo atliktas skystųjų ir kietųjų komponentų savaiminio tepimo dangų formavimas. Tyrimo metu polimerų dalelės kartu su polialfaolefino (PAO) ir silikono alyvomis užpildytomis kapsulėmis buvo purškiamos ant substrato paviršiaus, kad būtų gauta danga su kapsulėmis, paskirsčiusiomis kietoje polimerinėje matricoje. Dangų tyrimai parodė, kad kapsulės atlaikė terminio purškimo proceso sąlygas. Trinties koeficientas sumažėjo nuo 0,5 (dangos be kapsulių) iki 0,15 (dangos, turinčios alyva užpildytų kapsulių). Šios žemos trinties koeficiento vertės rodo galimybę mechaninėse tribologinėse porose pasiekti ribinius ir mišrius tepimo režimus (Armada et al., 2013; Espallargas et al., 2013; Espallargas et al., 2015).

Atsparios korozijai dangos turi pasižymėti dideliu tankiu ir kuo mažesniu porėtumu (iki 1 %), taip pat neturėti vertikalių plyšių ar mikrotrūkių, pro kuriuos iki dangos gali prasiskverbti agresyvi aplinka. Įprastų mikrostruktūrinio dydžio dangų paviršiaus morfologija gan šiurkšti (paviršiaus profilio įdubimų dydis iki 40 μm), lyginant su nanostruktūrinę sandarą turinčiomis dangomis WC-12Co (įdubimų dydis iki 20 μm). Itin atsparios korozijai dangos yra nikelio pagrindo, kurių sudėtyje yra cinko, aliuminio ar vario priedų (Gargasas, 2011; Liu et al., 2016). Korozinis dangų atsparumas vertinamas pagal korozinę elektrocheminę medžiagos elgseną, lyginant su įprastos medžiagos elgsena tomis pačiomis sąlygomis. Plonos dangos, turinčios 2–5 nm dydžio kristalus, korozijos greitis, lyginant su mikrostruktūrinėmis medžiagomis, yra gerokai mažesnis (10–1000 kartų). Ši dangų savybė siejama su medžiagos ypač smulkia nanostruktūrine sandara. Be to, daugiakomponenčių dangų, pvz., sudarytų iš TiC-Mo-Fe-Si, korozija yra labai selektyvi. Pirmiausia ištirpsta (sukoroduoja) neatspariausi komponentai (dažniausiai geležis), dėl to dangos paviršiuje padidėja korozijai atsparesnių cheminių elementų kiekis (pvz., silicio) ir tokiose vietose susidaro apsauginė mažesnio tirpumo plėvelė (Valiulis, 2012). Kaip rodo praktika, Ni pagrindo termiškai užpurkštos dangos yra tinkamos priemonės, leidžiančios gauti daugiafunkčius gaminių sandarinimo paviršius, turinčius mažą paviršiaus šiurkštį. Cr₃C₂-NiCr danga, nusedinama terminio purškimo metu, yra viena iš geriausių apsauginių korozijos

dangų (Fedrizzi et al., 2004; Tiwari et al., 2019). Šioje dangoje chromo karbido dalelės yra įterptos į NiCr metalinę matricą. HVOF purškiama volframo karbido danga su nikelio matrica taip pat pasižymi puikiu atsparumu korozijos sukeliama metalo paviršiaus erozijai. Taikant HVOF proceso terminio purškimo techniką naudojama dujų degimo proceso produktų srauto kinetinė energija, kad būtų stipriau plastiškai deformuoti besiformuojantys substrato paviršiuje pridėtinių milteilių dalelių tiškai (angl. *splat*), sukuriant tankią, labai mažo porėtumo, geros dangos dalelių tarpusavio kohezijos ir didelio dangos bei substrato sukibimo stiprumo, didelio kietumo dangos struktūrą (Mann et al., 2001; Hazra et al., 2012; Prasanna et al., 2018). Pavyzdžiui, termiškai purškiamos Cr_3C_2 -NiCr dangos ant 310S plieno, esant 700 °C temperatūrai, yra atsparios aukštatemperatūrei korozijai, lyginant su 310S plienu be dangos, nes dangos paviršiuje susidaro apsauginiai oksidų sluoksniai (Cr_2O_3 , NiCr_2O_4) (Shukla et al., 2016; Kamal et al., 2015; Tiwari et al., 2019).

1.2.10. Dviejų etapų dangos nusodinimo ir lazerinio apdorojimo technologijos ypatumai

Dėl puikių nikelio lydinių savybių (gero plastiškumo ir atsparumo korozijai) ir volframo karbido savybių (aukšta lydymosi temperatūra 2870 °C, didelis kietumas 16–22 GPa, atsparumas nusidėvėjimui ir korozijai) Ni pagrindu pagamintos metalo matricos ir metalo karbidų (MMK) kompozicinės dangos plačiai naudojamos apsauginiais tikslais įvairiose pramonės ir technologijų srityse (Davis, 2000; Koc et al., 2000). Tradiciškai terminio purškimo procesai buvo naudojami Ni pagrindu su volframo karbidais dangoms formuoti. Pastaraisiais dešimtmečiais sparčiai vystantis lazerių gamybai, išaugo susidomėjimas lazerinio padengimo ir apdorojimo technologijomis, o ypač kompozicinių daigafunkčių metalo keraminių dangų formavimu. Pagrindiniai privalumai ir problemos, būdingos Ni pagrindo su volframo karbidais dangų lazerinio dengimo technologijai, buvo aptartos (Škamat et al., 2021) darbe, o kaip alternatyva buvo apsvaistyta dviejų dangos formavimo etapų nusodinimo ir lazerinio papildomo apdorojimo technologija. Taikant šią technologiją naudojamas pigesnis, paprastesnis ir lengvai valdomas dujinis liepsninis purškimo metodas pirminiam kompoziciniam sluoksniui suformuoti, o pasukui sluoksnis perlydomas impulsiniu lazeriu, siekiant pagerinti dangos mechanines ir eksploatacines savybes (padidinti dangos kietumą ir atsparumą dilimui).

Apsauginėms nikelio pagrindo su volframo karbidais dangoms formuoti plačiai taikomi terminio purškimo metodai, tokie kaip liepsninis purškimas, plazminis purškimas, lankinis purškimas ir didelio greičio deguoninis liepsninis purškimas. Per pastaruosius du dešimtmečius didžiausias dėmesys buvo skiriamas Ni-WC dangų formavimo metodų kūrimui (Farahmand et al., 2015; Weng et al., 2016; Shu, et al., 2017; Erfanmanesh et al., 2018; Shi et al., 2018; Li et al., 2019;

Li et al., 2020; Shu et al., 2020; Tehrani et al., 2020; Zhang et al., 2020; Zhao et al., 2020; Bartkowski et al., 2021; Hu et al., 2021; Yan et al., 2021). Galima išskirti du pagrindinius Ni-WC dangų formavimo būdus – HVOF ir PS purškimas bei lazerinis aplydymas (plakiravimas), kurio metu dangos formavimas vyksta naudojant lazerio spindulio energiją (Farahmand et al., 2015; Weng et al., 2016; Shu, et al., 2017; Erfanmanesh et al., 2018; Shi et al., 2018; Li et al., 2019; Li et al., 2020; Shu et al., 2020; Tehrani et al., 2020; Zhang et al., 2020; Zhao et al., 2020; Bartkowski et al., 2021; Hu et al., 2021; Yan et al., 2021). Lazerinio aplydymo metu miltelių arba vielos pavidalo pridėtinė medžiaga tiekama į lazeriu apdorojamą substrato paviršiaus sritį, tokiu būdu formuojant išlydyto pridėtinio ir pagrindo metalų vonelę, o vėliau vonelei ataušus formuojasi prilydytas susikristalizavęs dangos sluoksnius. Lazerio spindulys juda (skenuoja) substrato paviršiumi, vienu praėjimu suformuodamas siaurą MMK dangos sluoksnį. Norint padengti visą paviršių, procesas paprastai atliekamas atskirais ėjimais su tam tikro dydžio sanklota. Beveik visuose bandiniuose, lyginant su tradiciniais MMK dangų formavimo procesais užpurškiant (FS, PTA, HVOF ir kt.), lazerinis aplydymas leidžia gauti tankesnes, mažo porėtumo ir tvirtai sukibusias su pagrindu dangas. Yra žinoma, kad dėl itin greitų kaitinimo ir aušinimo procesų apdorojimas lazeriu sukuria MMK dangas, turinčias kitokią metalo mikrostruktūrą ir savybes, kurių neįmanoma pasiekti, taikant įprastus nusodinimo purškimo būdus. Tačiau ši technologija turi ir trūkumų, tokių kaip: volframo karbido dalelių ištirpimas išlydytoje Ni pagrindu suformuotoje matricoje, dėl to sumažėja metalo keraminės dangos kietumas ir padidėja poringumas; didesnio tankio nei nikelio matricos volframo karbido dalelių nugrimzdimas į dangos apatinį sluoksnį, sukuriant nehomogenišką dangos struktūrą su mažesnio kietumo ir stiprumo viršutiniu dangos sluoksniu; įtrūkių susidarymas dėl temperatūrinių įtempių. Mokslinėse publikacijose pateikiami įvairūs minėtų problemų sprendimo būdai, pavyzdžiui, dangų technologijos parametrų optimizavimas (Bartkowski et al., 2021, Yan et al., 2021; Chen et al., 2023), išankstinis pagrindo pakaitinimas (Farahmand et al., 2015; Shi et al., 2018; Hu et al., 2021; Chen et al., 2023), daugiasluoksnių (gradientinės struktūros) dangų formavimas (Shi et al., 2018), retųjų žemių elementų ir kitų junginių įterpimas į pridėtinį metalą (Weng et al., 2016; Li et al., 2020; Shu et al., 2020).

Volframo karbidai naudojami kompozitinėse MMK dangose, siekiant padidinti dangos paviršiaus kietumą ir užtikrinti aukštą atsparumą dilimui, kurių negalima pasiekti naudojant tik metalų lydinių dangas. Tačiau ne visi mokslinėje literatūroje aprašyti metodai leidžia pasiekti tokius rezultatus. Darbuose (Farahmand et al., 2015; Shi et al., 2018; Hu et al., 2021), kuriuose autoriai naudojo substrato išankstinį pakaitinimą iki ~200 °C ir aukštesnės temperatūros, buvo pateikti šie geriausi dangos metalo kietumo rezultatai: 760 HV esant 59 masės % WC dalelių mišinyje (Farahmand et al., 2015), 1350 HV_{0,2} (WC fazei) (Hu et al., 2021), 740 HV_{0,2} esant 10 masės % WC (Shi et al., 2018). Pridėjus retųjų

žemių elementų, turinčių oksidų, tokių kaip La_2O_3 ir CeO_2 (Weng et al., 2016; Li et al., 2020; Shu et al., 2020), buvo gautos šios dangų metalo kietumo reikšmės: ~500 HV_{0,2} esant 60 masės % WC dalelių mišinyje (Weng et al., 2016); 55 HRC/arba 650 HV esant 60 masės % WC (Li et al., 2020); ~525 HV_{0,2} esant ~50 masės % WC (Shu et al., 2020). Zhao ir kt. (Zhao et al., 2020) pasiūlė naują iš anksto įkaitintos pridėtinės vielos metodą Ni/WC kompozitinėms dangoms formuoti aplydymu. Kaip rodo pateikti rezultatai, WC dalelių tirpimas Ni pagrindu esančioje matricoje buvo sėkmingai slopinamas ir gaunami homogeniški dangos sluoksniai; tačiau nusodintų dangų metalo kietumas nebuvo toks didelis – šiek tiek didesnis nei 600 HV_{0,2} esant 45 masės % WC dalelių mišinyje (Zhao et al., 2020).

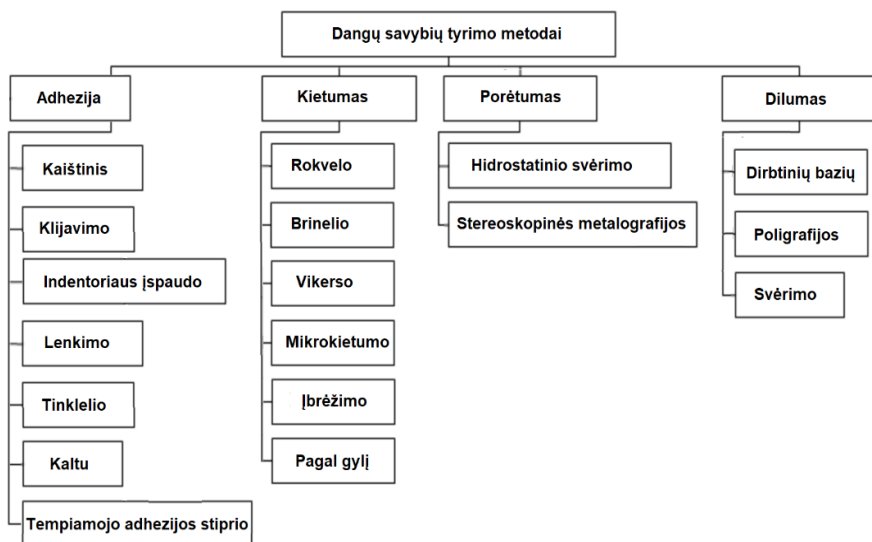
Apibendrinant minėtuose darbuose pateiktus rezultatus, galima teigti, kad, kuriant lazerinio aplydymo technologijas, pasiekta pažanga, o kai kurie sprendimai gali būti taikomi pramonėje, tačiau gautų dangų metalo kietumas (nepaisant didelio WC dalelių kiekio pridėtinės medžiagos mišinyje) nebuvo itin didelis. Galima pastebėti ir kai kuriuos kitus šios dangų technologijos ypatumus: naudojant lazerinio aplydymo metodą, kai pagrindas iš anksto padengiamas milteliais, sunku įgyvendinti technologinį procesą, kuris užtikrintų vienodą pridėtinių miltelių sluoksnio storį sudėtingesnės geometrijos dengiamo gaminio dalims. Taikant metodą, kai milteliai paduodami automatiškai, rezultatas priklauso ir nuo miltelių padavimo būdo bei vietos, į kurią yra tiekiami milteliai, o tai apsunkina parametrų optimizavimo procedūrą kiekvienu konkrečiu atveju. Be to, reikia pažymėti, kad daugelyje atliktų tyrimų naudojama nestandartinė laboratorinė įranga, kurios prieinamumas yra ribotas. Šiuo požiūriu jau suformuotos užpurškiant dangos perlydymas lazeriu yra paprastesnis – gali būti naudojami standartiniai gamybiniai purškimo ir lazeriniai įrenginiai, pavyzdžiui, lazerinio suvirinimo įrenginiai, kurių kaina pastaruoju metu labai sumažėjo, todėl jie prieinami platesniam vartotojų ratui. Liepsninis dangų purškimo metodas yra ypač lengvai automatizuojamas cilindrinės ir plokščios formos gaminiams; rankiniu būdu arba naudojant standartinį robotą manipuliatorių galima padengti sudėtingesnės geometrijos paviršius. Naudojant roboto manipuliatorių, lazerio galvutės judėjimui skenuojant jau užpurškštos dangos paviršių, Ni-WC dangos formavimas gali būti atliekamas įvairaus sudėtingumo gaminio paviršiams. Liepsninis purškimas užtikrina stabilų dangos storį ir tolygų WC dalelių pasiskirstymą užpurškštoje dangoje (Škamat et al., 2019). Paprastai tokios MMK dangos yra labai porėtos ir turi blogesnę adheziją su pagrindu, lyginant su HVOF arba PTA purškimo metodais, tačiau vėlesnis užpurškštų dangų perlydymas lazeriu sumažina poringumą ir formuoja metalurginius ryšius tarp dangos ir substrato.

Škamat et al. (2019) atliko liepsniniu būdu užpurškštų Ni pagrindo su WC dalelėmis dangų, gautų perlydant tradiciniais metodais (liepsninis, krosninis, indukcinis) ir lazerio spinduliu naudojant Nd:YAG lazerį, kurio bangos ilgis 1064 nm, metalo mikrostruktūros ir savybių tyrimus. Tradiciniais metodais perlydytų

dangų mikrostruktūra ir kietumas buvo panašūs ir daugiausia nulemti kaitinimo trukmės dydžio. Optimali dangos metalo mikrostruktūra, užtikrinanti didžiausią dangos kietumą ~880 HK2,0 ir geriausią atsparumą dilimui, buvo gauta siaurame kaitinimo trukmės reikšmių intervale, kai metalinė dangos matrica buvo pakankamai perlydyta, kad gerai suvilgytų substrato paviršių ir užpildytų užpurkštos dangos poras bei tarpus tarp tiškalų, tačiau WC dalelės išliktų neištirpusios metalinėje dangos matricoje. Tradiciniais būdais perlydytos dangos buvo lyginamos su lazeriu perlydytomis dangomis, kurios buvo apdorojamos lazeriu tokiu režimu, kad danga persilydytų per visą dangos storį ir šiek tiek būtų išlydytas substratas bei susidarytų pakankama jungtis tarp dangos ir pagrindo. Nustatyta, kad apdorojant impulsiniu lazeriu Ni pagrindo matricos mikrostruktūroje susidaro itin smulkūs W gausūs dendritai, kurie morfologija, dydžiu ir fazės sudėtimi labai skyrėsi nuo tradiciniais būdais perlydomų dangų. Dėl to pastebimai padidėjo dangos metalo kietumas (~12–31 %) ir atsparumas dilimui (iki 42 %), lyginant su geriausiais rezultatais, pasiektais Ni-WC dangas perlydant elektrinėje krosnyje, liepsniniu ir indukciniu būdais. Tačiau platesnis Ni-WC dangų, perlydytų lazeriu naudojant įvairius parametrus, tyrimas nebuvo atliktas. Minėtų darbų rezultatai parodė, kad dangų mikrostruktūra ir savybės gali labai skirtis tiek naudojant skirtingus lazerių tipus, tiek skirtingus lazerinio apdorojimo parametrus, o tai pirmiausia susiję su perlydomos dangos kaitinimo ir aušinimo režimo skirtumu.

Siekiant įvertinti suformuotos dangos eksploatacinį tinkamumą ir kokybę, būtina įvertinti šias svarbias dangos metalo savybes: šilumos laidumą, elektros laidumą, atsparumą šilumos ciklams ir t. t. Dangų savybės tiriamos įvairiais metodais. 1.19 paveiksle pavaizduoti pagrindiniai dangų savybių tyrimo metodai. Dangų tyrimo metodai paprastai skiriasi nuo vienalyčių medžiagų (metalų ir jų lydinių) tyrimo metodų. Kadangi gerokai skiriasi dangų ir vienalyčių medžiagų gamybos ir formavimo procesai, tai ir dangų struktūra bei savybės skiriasi nuo masivių konstrukcinių medžiagų struktūros ir savybių.

Dauguma nikelio pagrindu pagamintų lydinių, naudojamų terminiam purškimui su vėlesniu perlydymu liepsna, yra pagrįsti savaime besifliusuojančia Ni-B-Si sistema, kurioje boras ir silicis veikia kaip fliuso priedai, mažinantys lydinio lydymosi temperatūrą ir užkertantys kelią išlydyto metalo oksidacijai. Papildomas savaime besifliusuojančių nikelio lydinių legiravimas chromu užtikrina lydinio metalo kieto tirpalo didesnę kietumą ir chromo karbidų, boridų, karboboridų ir (ar) borokarbidų susidarymą. Kobaltas dažniausiai veikia kaip dangos metalo besiformuojančio kieto tirpalo stiprinimo elementas, geležis gerina substrato paviršiaus drėkinimą ir dalyvauja kietosios fazės formavimo procese, o anglis (sudarant karbidus) leidžia sukurti didesnio kietumo (iki ~780 HV) nikelio lydinis (Sousa et al., 2020). Tačiau metalų lydinių, net ir gausiai legiruotų, kietumas yra ribotas. Dangų atsparumas dilimui gali būti dar labiau padidintas pridėjant kietų junginių, pavyzdžiui, plačiai naudojamo volframo karbido.



1.19 pav. Pagrindiniai dangų savybių tyrimo metodai
Fig. 1.19. Main methods of investigation of coating properties

Purškiamos terminiu būdu MMK dangos, kurių kietumas siekia ~64 HRC, gali būti gaunamos naudojant miltelių mišinius iš gausiai legiruoto savaime besifliusuojančio nikelio lydinio ir volframo karbido dalelių. Keraminės medžiagos turi dar didesnę kietumą, tačiau tokioms medžiagoms būdingas trapumas riboja jų naudojimą tose srityse, kuriose svarbios ir kitos savybės, išskyrus kietumą, pavyzdžiui, atsparumas smūgiams ir trapiam irimui (Hossain et al., 2022). MMK dangos, nors ir prastesnės už keramines dangas savo atsparumu dilimui, tačiau pasižymi geresne sanglauda ir sukibimu su substratu stipriu, geresniu plastiškumu ir atsparumu smūgiams. Dėl šių savybių jos yra veiksmingesnės stipraus nusidėvėjimo sąlygomis su ciklinėmis ir smūginėmis apkrovomis, kurios būdingos daugeliui skirtingų detalių bei mazgų eksploatavimui. Dangos metalo kietumo padidėjimas ir atsparumo dilimui pagerėjimas pasiekiamas padidinus kietosios frakcijos kiekį dangos matricoje, tačiau dėl to prarandamas metalo plastiškumas (Cao et al., 2022; Li et al., 2022). Norint padidinti MMK dangų kietumą, reikia ieškoti kitų sprendimų. Vienas iš sprendimų – retųjų žemių elementų oksidų pridėjimas, jie padidina metalo mikrokietumą, atsparumą dilimui ir tribologines savybes, suteikia dangos metalui savaiminio tepimo savybių ir mažina trinties koeficientą (Hossain et al., 2022; Wang et al., 2017). Ši dangų technologija leidžia pasiekti gerus rezultatus, tačiau dėl didelės retųjų žemių elementų oksidų kainos stipriai išauga dangų technologijos kaina. Taip pat žinoma, kad mechanines metalo savybes galima pagerinti susmulkinus lydinio mikrostruktūrą iki submikrostruktūrinio arba

nanosuktūrinio dydžio, kurį galima pasiekti purškiant mikroninio ir nanodydžio medžiagų daleles arba naudojant koncentruotus energijos šaltinius, tokius kaip elektronų ar lazerio spinduliuotės pluoštus (Shang et al., 2022). Daugelis šios srities tyrimų rodo, kad metalų lydinių ir MMK dangų medžiagų lydymas lazeriu sudaro labai smulkią perlydyto metalo mikrostruktūrą ir pagerina jų metalurgines, mechanines ir kitas savybes, įskaitant kietumą (Škamat et al., 2019). Tobulėjant lazerinei įrangai, atsirado naujų apdorojimo būdų, leidžiančių įveikti kai kuriuos trūkumus, būdingus medžiagų paviršių lydymui lazeriu.

Lazeriu perlydytas paviršinis metalo sluoksnis formuojamas perėjimo takelių būdu, kai tolesnio perėjimo takelio kraštas sutampa arba iš dalies sutampa su ankstesnio perėjimo takelio kraštu. Perlydyto metalo takelio skerspjuvis yra „pjūklo formos“ profilis su geometrija, kurią iš anksto nulemia netolygus lazerio spindulio galios pasiskirstymas gaminio paviršiuje, kuris paprastai gali būti aprašytas Gauso dėsnio (Wang et al., 2016). Norint įveikti nevienodą lazerio spindulio galios pasiskirstymą metalo apdorojimo srityje ir gauti pageidaujamą proceso lazerio spindulio galios tankio pasiskirstymą apibrėžtame paviršiaus plote, buvo sukurta lazerio spindulio virpesių arba skersinių svyravimų technika – pirmiausia elektronų pluoštui (Sciaky et al., 1981), o vėliau ir lazeriui (Busuttil, 1997). Jau kelis dešimtmečius suvirinimas lazeriu naudojant lazerio spindulio skersinius svyravimus (osciliaciją) sulaukė vis didesnio susidomėjimo, daugiausia virinant skirtingų metalų (Kraetzsch et al., 2011) ir aliuminio lydinius (Wang et al., 2016; Chen et al., 2021; Pang et al., 2019; Ai et al., 2022; Kim et al., 2013), taip pat ir kitus lydinius, pavyzdžiui, mažai anglies turinčio plieno (Zhang et al., 2003), nerūdijančiojo plieno (Yan et al., 2022; Girerd et al., 2022) ir Invar lydinio (Jiang et al., 2020). Suvirinant lydinius arba apdorojant dangas lazeriu su skersiniais svyravimais, lazerio galvutė juda nustatyta kryptimi pastoviu greičiu, o lazerio spindulys aukštu dažniu svyruoja tam tikra trajektorija, pavyzdžiui, sinusoidine, kvadratine, trikampė, apskrita, elipsinė ir t. t, pakeičiant lazerio spindulio galios tankio pasiskirstymą ruošinio paviršiuje per atskirą lazerio apdorojimo perėjimą, mažinant didelį lydalo aušinimo greitį ir sumažinant didelius temperatūrinius gradientus metalė (Busuttil, 1997). Perlydyto metalo takelio forma tampa platesnė ir seklesnė, o lydalo vonelės apatinio ruožo sulydymo linija plokščia (Ai et al., 2022); šiuo atveju lydalo takelio arba siūlės plotis yra iš anksto nulemtas lazerio spindulio svyravimų amplitudės (Thiel et al., 2012). Pabrėžiama (Thiel et al., 2012), kad lazerio su skersinių spindulio svyravimų technika leidžia tyrėjams stabilizuoti suvirinimo lazeriu procesą ir pagerinti proceso efektyvumą dėl padidėjusio lydalo vonelės tūrio. Savo tyrime Ai et al. (2022) pastebėjo, kad taikant lazerio spindulio svyravimų metodiką apdorojimo metu išlydyto metalo maksimali temperatūra ir skysto vonelės metalo konvekcijos arba tėkmės greitis mažėja. Lazerio spindulio svyravimų amplitudės arba dažnio padidėjimas apdorojimo metu lėmė stabilesnę ir seklesnę lydalo vonelę ir sumažino porėtumą aliuminio lydinyje. Nustatyta, kad

papildomas lydymosi takelio metalo maišymo efektas lazerinio apdorojimo metu pagerina perlydytos siūlės lydinio formavimosi metalurginius procesus, susijusius su besiformuojančio kieto metalo orientuotų dendritų augimo deformacija, ir dėl to siūlės metale formuojasi lygiagrečių grūdelių mikrostruktūra ir vyksta grūdelių rafinavimo procesas (Chen et al., 2021; Jiang et al., 2020). Remiantis suvirinimo proceso baigtinių elementų analizės rezultatais (Jiang et al., 2020), lazerio spindulio skersiniai svyravimai užtikrina tolygesnį temperatūros pasiskirstymą išlydyto metalo vonelės centrinėje dalyje, kur yra didžiausia lazerio spindulio galios koncentracija (pagal Gauso dėsnį). Be to, baigtinių elementų modeliavimas rodo, kad lazerinis suvirinimas su lazerio spindulio skersiniais svyravimais gali sumažinti temperatūrinių įtempių reikšmes ir jų koncentracijos lygį siūlėje. Yan et al. (2022) teigia, kad lazerio spindulio svyravimo amplitudės ir dažnio padidinimas sumažina virintinės jungties liekamuosius įtempius ir virinamo gaminio deformaciją.

Šiuo metu žinoma mokslinė informacija ir dauguma lazerinio poveikio su skersiniais svyravimais atliktų tyrimų yra suvirinimo technologijų srityje (Jiang et al., 2020; Chen et al., 2021; Ai et al., 2022; Girerd et al., 2022). Tačiau mokslinių tyrimų rezultatai parodė, kad šis metodas yra perspektyvus ir kitoms gamybos sritims, kuriose lazerio spindulio energija naudojama medžiagoms lydyti ir suketėjusiai metalo mikrostruktūrai gauti iš skystosios būsenos. Taigi, Xia et al. (2021) taikė lazerinio apdorojimo su spindulio skersiniais svyravimais skenavimo metodą nikelio pagrindo superlydiniui, sustiprintam volframo karbidais, nusodinti plakiravimo metu. Xia et al. (2021) atkreipė dėmesį į tai, kad žiedinis lazerio spindulio svyravimas sudaro perlydyto metalo sluoksnius be porų ir be įtrūkių, turinčius kombinuotą lygiaašį stulpelinę mikrostruktūrą su tolygiai paskirstyta armuojančio karbido faze. Dėl to taikant šią technologiją buvo gautos kompozicinės dangos, kurios turėjo didesnę kietumą ir atsparumą dilimui.

1.3. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Atlikus mokslinių literatūros šaltinių analizę buvo nustatyta, kad, taikant įvairias MMK dangų technologijas, galima suformuoti nikelio pagrindo su volframo karbidais skirtingų eksploatacinių savybių dangas, tačiau sunku užtikrinti vienu metu gerą dangos adheziją ir metalo struktūrinį vientisumą, aukštą atsparumą dilimui, elektrocheminei ir aukštatempertūrei korozijai bei geras tribologines savybes. Buvo pastebėta, kad, siekiant užtikrinti gerą atsparumą dilimui, dažnai metalo keraminės dangos sudėtyje didinama keramikos dalis, o tai nulemia galimą suformuotos dangos pleišėjimą ir struktūrinį nevientisumą dėl temperatūrinių įtempių

ir trapios dangos mikrostruktūros. Formuojant MMK tipo dangas, didelį pranašumą dėl savo koncentruoto poveikio turi lazerinio apdorojimo technologija, bet tokio tipo dangų formavimas ištiesi dangas perlydant vien tik lazeriu reikalauja didelio skenavimo dalinio sutapimo koeficiento (dėl Gauso arba parabolės formos lazerio spindulio energijos tankio pasiskirstymo gaminio paviršiuje), tai didina dangos perkaitinimą ir skatina jos pleišėjimo procesą. Šiuo atveju perspektyvu taikyti MMK dangos lazerinį apdorojimą takeliais.

2. Ankstesni moksliniai tyrimai parodė, kad apdorojimas lazeriu vien tik užpurkštos nikelio pagrindo su volframo karbidais dangos dėl koncentruoto lazerio terminio poveikio apdorojamam metalui be lazerio spindulio skersinių svyravimų formuoja Gauso funkcijos formos dangos perlydyto metalo takelius, o dangos ir substrato sulydymo sritis pasižymi dideliu sandaros nevientisumų kiekiu. Visa tai lemia dangos metalo atskiedimą substrato medžiaga, didelį likusios neperlydytos dalies dangos porėtumą ir neleidžia suformuoti ištisinio metalurginio ryšio tarp dangos ir substrato. Šiuo atveju sunku prognozuoti tokios dangos resursą.
3. Taikant įvairias dangų technologijas, galima suformuoti skirtingų eksploatacinių savybių dangas, kurios būtų plačiai pritaikomos įvairiose pramonės srityse, tačiau įvertinus taikomų technologijų privalumus bei trūkumus, tikslinga taikyti dviejų etapų (purškimas ir ištisinis perlydymas elektrinėje krosnyje) kombinuotą dangų technologiją ir galimą papildomą lazerinį dangų apdorojimą. Purkštinės suformuotos MMK dangos perlydymas elektrinėje krosnyje gali užtikrinti gerą išlydytos dangos metalo vilgumą substrato paviršiuje, didesnio intensyvumo dangos ir substrato cheminių elementų savaiminę abipusę difuziją ir aukštą metalurginio tipo dangos adheziją.
4. Lazerinis suformuotų dangų apdorojimas su lazerio spindulio skersiniais svyravimais gali būti vienas iš veiksmingiausių metodų, siekiant padidinti lazerinio apdorojimo technologijos našumą, suformuoti norimos formos ir dydžio, geresnių mechaninių savybių perlydyto metalo takelius keraminėje dangoje. Tai leidžia formuoti kompozicines, kietas, dilimui ir paviršiaus nusidėvėjimui atsparias metalo keramines dangas ir užtikrinti patikimą jų eksploataciją esant elektrocheminės korozijos ir aukštatemperatūros oksidacijos poveikiui. Pagrindiniai technologijos ypatumai yra koncentruotas ir valdomas naudojamosios energijos tankis bei didelis proceso našumas.

Apibendrinus literatūros analizę suformuluoti šie spręstini uždaviniai:

1. Sukurti kombinuotą, 3 etapų (liepsninis purškimas, perlydymas krosnyje ir lazerinis apdorojimas) metalo keraminių dangų technologiją su išankstiniu dangos pakaitinimu, lazerio spindulio skersiniais svyravimais ir lazeriniu perlydymu takeliais.
2. Ištirti lazerinio dangų perlydymo įtaką terminiu liepsniniu būdu suformuotų purkštinių NiCrCoFeCBSi pagrindo su W karbidais keraminių dangų morfologijai, mikrostruktūrai, kietumui, mikrokietumui, atsparumui sausajam slydimo dilimui ir trinties koeficientui.
3. Nustatyti lazerinio apdorojimo lazerio spindulio skersinių svyravimų įtaką NiCrCoFeCBSi pagrindo su WC užpurkštų ir perlydytų elektrinėje krosnyje dangų mikrostruktūrai, fazinei sudėčiai, mikrokietumui, lazeriu perlydytų takelių geometrijai ir topografijai.
4. Ištirti lazerinio apdorojimo parametrų teigiamų poveikių derinį NiCrCoFeCBSi pagrindo su WC užpurkštoms ir perlydytoms krosnyje dangoms bei suformuluoti tokių dangų formavimo rekomendacijas.

Metalo keraminių nikelio volframo dangų formavimo metodika, medžiagos ir tyrimo metodai

Atlikus mokslinių literatūros šaltinių apžvalgą buvo nustatyta, kad, siekiant suformuoti daugiafunkcę MMK dangą, lazerinis užpurkštų dangų apdorojimas su lazerio spindulio skersiniais svyravimais gali būti vienas iš veiksmingiausių metodų, siekiant suformuoti dilimui ir korozijai atsparias metalo keramines dangas. Šiam tikslui pasiekti buvo sudaryta eksperimentinių tyrimų metodika, siekiant nustatyti lazerinio apdorojimo su lazerio spindulio skersiniais svyravimais poveikį purkštinių bei perlydytų krosnyje nikelio pagrindo dangų su volframo karbidine keramika struktūrai ir savybėms. Tyrimo metu buvo atlikti iš anksto liepsniniu purškimo būdu padengtų ir krosnyje perlydytų bandinių lazerinio apdorojimo eksperimentai, naudojant skirtingo amplitudės dydžio (1 mm ir 2 mm) lazerio spindulio skersinius svyravimus ir jų nenaudojant. Siekiant įvertinti dangų lazerinio apdorojimo proceso šilumos mainų poveikį dangos metalo pleišėjimui, buvo atlikti dangų formavimo bandymai be išankstinio dangos pakaitinimo prieš perlydant lazeriu ir naudojant išankstinį pakaitinimą. Ištirta suformuotų dangų morfologija, mikrostruktūra ir fazinė sudėtis, atlikti perlydytų lazeriu dangų paviršiaus profilometrijos matavimai ir perlydytų dangų takelių matmenų bei formos tyrimai, atlikti lazeriu apdorotų dangų metalo kietumo ir mikrokietumo matavimai, atlikti suformuotų dangų tribologijos, korozinio atsparumo ir dilimo bandymai. Tyrimų

ir matavimų rezultatai palyginti su rezultatais, gautais tiriant neperlydytas dangas ir dangas, perlydytas taikant tik tradicinę perlydymo metodiką (perlydymą krosnyje). Lyginamosios analizės pagrindu suformuluotos išvados.

Skyriaus tematika paskelbta viena autorės publikacija (Decker et al., 2022).

2.1. Tyrimams naudotos medžiagos

Skyriuje aprašytos tyrimams naudotos medžiagos: dangos formavimui naudotos purškimo medžiagos, substrato medžiaga ir jo paruošimas. Aprašytos dangoms formuoti naudotos įrangos ir jų parametrai.

2.1.1. Purškimo medžiagos

Lazeriniams perlydymo eksperimentams atlikti termiškai purškiamos dangos buvo nusodinamos taikant liepsninį purškimo būdą ir Ni pagrindo miltelių mišinį (dalelių dydis 38–125 μm): 60 % nikelio pagrindo milteliai (62,2 % Ni; 13,8 % Cr; 11,8 % Co; 7,9 % B + Si; 3,9 % Fe; 0,4 % C) ir 40 % volframo karbidų milteliai.

2.1.2. Substratas ir jo paruošimas

Substratui buvo naudojamas S235 JR markės karštai valcuotas konstrukcinis plienas. Plieno cheminė sudėtis pateikta 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Substrato medžiagos cheminė sudėtis, masės %

Table 2.1. Chemical composition (in wt.%) of substrate material

Medžiaga	C	Mn	P	S	N	Cu	Fe
Plienas S235 JR	0,17	1,40	0,040	0,040	0,012	0,55	Likęs (~97,8)

Karštai valcuoto plieno lakštai mechaniškai buvo supjaustyti į 150×100×8 mm dydžio plokšteles. Substrato paviršius paruoštas terminiam purškimui remiantis literatūros analize ir nurodymais, pateiktais LST EN 13507:2018 „Terminis purškimas. Metalinių dalių ir komponentų paviršių parengiamasis apdorojimas terminiam purškimui“ standarte. Nuo bandinių paviršiaus buvo pašalinti riebalai ir jis buvo nuvalytas izopropilo alkoholiu. Suteikiant substrato paviršiui reikiamą paviršiaus šiurkštį prieš purškimą ir pašalinant valcuotiems plieno paviršiams būdingą oksido plėvelę, buvo atliktas paviršiaus valymas girgždu bei

dar kartą paviršius buvo nuvalytas izopropilo alkoholiu. Prieš terminį purškimą substratas buvo išdžiovintas karšto oro srove.

2.1.3. Purškimo įranga ir purškimo parametrai

Eksperimentams naudotos dangos užpurkštos Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedros Dangų inžinerijos mokslinėje laboratorijoje. Terminis purškimas atliktas naudojant *Rototec 80 (Castolin Eutectic)* purškimo įrangą ir pramoninį robotą manipuliatorių *Motoman 100*.

Pagrindiniai terminio purškimo proceso parametrai pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Terminio purškimo proceso pagrindiniai parametrai

Table 2.2. The main parameters of thermal spray

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 O_2
Purškimo atstumas	170 mm
Purškimo greitis / žingsnis / sluoksniai	250 mm/s / 5 mm / 8 sluoksniai
Užpurkšto sluoksnio storis	~1,2 mm
Acetileno slėgis	0,65 bar
Deguonies slėgis	4 bar

Terminis elektrolankinis liepsninis dangų purškimas atliktas vadovaujantis LST EN ISO 14922:2022 „Terminis purškimas. Kokybės reikalavimai, keliami terminio purškimo dangų gamintojams“ standartu.

2.1.4. Perlydymo elektrinėje krosnyje įranga ir parametrai

Norint sumažinti dangos porėtumą ir padidinti kietumą, gali būti taikomi keli dangų perlydymo būdai: liepsninis dangos perlydymas, indukcinis, perlydymas elektrinėje krosnyje ir apdorojimas (perlydymas) lazeriu. Buvo atlikti tyrimai (Škamat et al., 2019), kurių metu buvo nustatyta, kokią įtaką perlydytoms dangoms daro kiekvienas iš išvardintų dangos perlydymo būdų. Tyrimų rezultatai parodė, kad liepsninis ir indukcinis perlydymas sumažina dangos porėtumą, tačiau taikant šiuos metodus gaunamas labai netolygus dangos perlydymas visame plote. Dangos, apdorotos (perlydytos) lazeriu, pasižymi didžiausiu apdorotos dangos kietumu, tačiau dangų trūkiai yra neišvengiami. Perlydant dangą elektrinėje krosnyje susiformuoja homogeniška mikrostruktūra visame dangos plote. Taip pat

elementų pasiskirstymas sulydymo linijos srityje rodo padidėjusią geležies koncentraciją šalia pagrindo, o tai reiškia, kad vyksta geležies atomų difuzija ir susidaro stiprus metalurginis ryšys. Taip pat ankstesnių tyrimų rezultatai parodė (Škamat et al., 2019), kad, dangas perlydant elektrinėje krosnyje 1300 °C temperatūroje, naudojant 3 min kaitinimo laiką, susidarė ištisinis dangos sluoksnis su mažu porėtumu, volframo karbidų dalelės iš dalies ištirpo nikelio lydinio matricoje ir susidarė stiprus metalurginis ryšys (volframo karbidų lydymosi temperatūra 2870 °C). Buvo pastebėta, kad dalis WC/W₂C dalelių apsilydė ir susidarė kompleksiniai WC/W₂C, pasiskirstę Ni pagrindo matricoje. Ilgesnis kaitinimas (iki 4 min) lėmė intensyvesnį volframo karbidų tirpimą Ni pagrindo metalinėje matricoje ir naujų eutektinių morfologinių fazių susidarymą. Dangoje šalia sulydimo srities nebuvo pastebėta WC/W₂C, o paviršiniuose dangos sluoksniuose mikrostruktūra buvo mažiau perkaitusi ir liko dalis pradinių aglomeruotų WC/W₂C dalelių. Kai danga buvo kaitinama 1 min ir 2 min, dangos sluoksnio cheminė sudėtis (EDS) išliko nepakitusi visame dangos sluoksnyje. Remiantis anksčiau atliktais tyrimų rezultatais ir siekiant pagerinti užpurkštos dangos sukibimą su pagrindu bei sutankinti nusodintą dangos sluoksnį, užpurkšti bandiniai buvo kaitinami (perlydomi) elektrinėje krosnyje (krosnis W-50, 1450 °C) 2,5 min 1300 °C temperatūroje ir po to atvėsunami ore kambario temperatūroje (t. y. 20 °C). Užpurkštų dangų perlydymas elektrinėje krosnyje buvo atliktas Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedros Suvirinimo technologijų laboratorijoje.

2.1.5. Lazerinio apdorojimo įranga ir apdorojimo parametrai

Nusodintų dangų lazerinio perlydymo eksperimentai atlikti naudojant šviesolaidinį lazerį FANUCI® PRO 1500 su vieno modulio optinio pluošto lazerio šaltiniu ir PRO *Wobble* lazerio galvute su judančiu lazerio spinduliu, t. y. turinčia lazerio spindulio skersinių svyravimų funkciją.

Pagrindiniai lazerinio apdorojimo proceso parametrai pateikti 2.3 lentelėje. Viena iš pagrindinių keraminių ir metalo keraminių įvairių dangų technologijų problema yra vietiniai temperatūriniai įtempiai metale, kurių atsiranda perlydant dangą. Jų veikiamas kietas, bet gana trapus dangos metalas pradeda trūkinėti, formuojasi išilginiai ir skersiniai terminiai trūkiai. Vienas iš efektyviausių šios problemos sprendimo būdų (pvz., suvirinimo srityje) yra išankstinis dangos apdorojimo pagrindo pakaitinimas. Pakaitinimo technologijos taikymas prieš nikelio pagrindo lydinų lazerinį aplydimą (angl. *laser cladding*) parodė mažesnę prilydyto sluoksnio pleišėjimo tikimybę (Bidron et al., 2020). Taip pat papildomas substrato pakaitinimas prieš lazerinį aplydimą leidžia tikėtis didesnio nikelio pagrindo lydinų su volframo karbidais (masės 5 %) prilydyto metalo sluoksnio storio

(Liu et al., 2023). Tyrimų metu, siekiant sumažinti metalo keraminės nikelio pagrindo su volframo karbidais dangos pleišėjimą, buvo taikomas išankstinis bandinių pakaitinimas prieš apdorojant lazeriu.

2.3 lentelė. Lazerinio apdorojimo proceso pagrindiniai parametrai

Table 2.3. Main parameters of laser cladding

Pavadinimas	Apibūdinimas
Lazerio spinduliavimo režimas	nuolatinis
Lazerio galia	300 W
Lazerio bangos ilgis	1070 nm
Sufokusuoto lazerio spindulio skersmuo bandinio paviršiuje	1 mm
Lazerio efektyvumas	>25 %, tai yra vidutinis lazerio spindulio galios tankis eksperimentų metu buvo $>9554 \text{ W/cm}^2$, apdirbant lydymosi režimu
Lazerinio apdorojimo greitis	nuo 250 mm/min iki 1000 mm/min
Skersinio svyravimo dažnis	120 Hz
Lazerio spindulio skersinių svyravimų amplitudės	1 mm ir 2 mm (maksimalus atstumas tarp svyruojančio lazerio spindulio ašių)
Apsauginės dujos	argonas (sąnaudos – 15 l/min)

Atlikus literatūros apžvalgą, išsiaiškinta, kad volframo karbido keraminės dangas rekomenduojama kaitinti iki temperatūros, ne aukštesnės nei 500 °C. Esant aukštesnei nei 500 °C temperatūrai, dangoje susidaro trapiosios fazės, kurios sumažina dangos atsparumą dilimui ir struktūrinį vientisumą. Atsižvelgus į tai, tiriamųjų dangų apdorojimo lazeriu eksperimentai buvo atlikti taikant 2.4 lentelėje nurodytus lazerinio apdorojimo parametrus su lazerio spindulio skersiniais svyravimais ir be jų (2.1 pav.), su išankstiniu bandinių pakaitinimu iki 200 °C, iki 400 °C ir be jo (2.2–2.4 pav.). Bandiniams kaitinti buvo naudojamas įrenginys *Heatmasters HM31*, valdomas kompiuteriu, keraminis kaitinimo kilimėlis, vario padėklas temperatūrai stabilizuoti ir izoliacinė medžiaga.

2.4 lentelė. Lazerinio apdorojimo parametrai ir eksperimentų planas**Table 2.4.** Parameters of laser processing and plan of the experiments

Išankstinio pakaitinimo temperatūra, °C	Skersinių svyravimų amplitudė A , mm	Lazerinio apdorojimo greitis v_x , mm/min			
		250	500	750	1000
Užpurkšta, perlydyta krosnyje ir apdorota lazeriu danga					
20 (be išankstinio pakaitinimo)	0 (be skersinių svyravimų)	x	x	x	x
	1	x	x	x	x
	2	x	x	x	x
200	0 (be skersinių svyravimų)	x	x	x	x
	1	x	x	x	x
	2	x	x	x	x
400	0 (be skersinių svyravimų)	x	x	x	x
	1	x	x	x	x
	2	x	x	x	x

Tyrimo metu įvertinus lazerio poveikį purkštinių su paskesniu perlydymu krosnyje Ni-WC dangų apdoroto metalo sandarai, struktūrai, fizikinėms savybėms ir apdoroto metalo takelių formai bei matmenims buvo pagaminti geriausio kokybinių parametrų derinio kompozicinių (taikant apdorojimą lazeriu takeliais) apsauginių MMK dangų bandiniai, kurių eksploatacinės savybės buvo ištirtos.

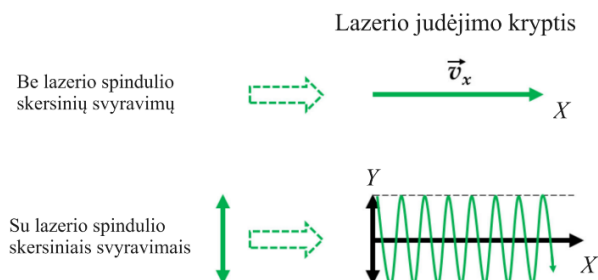
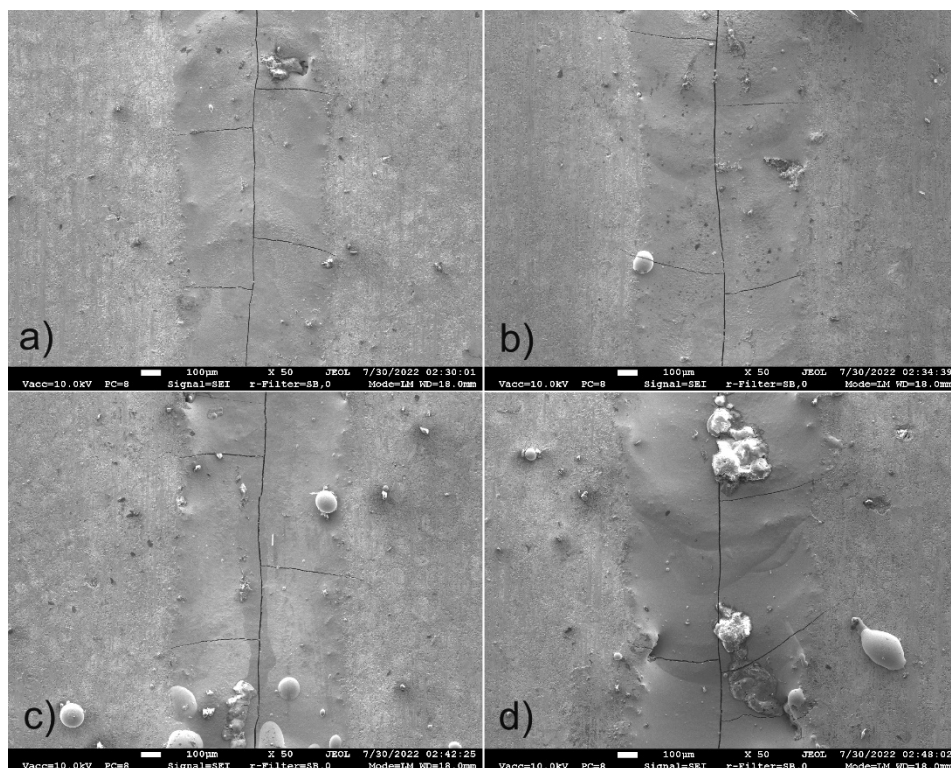
**2.1 pav.** Lazerio spindulio skersinių svyravimų ir gaunamo lazerio spindulio takelio schemos (Černašėjus et al., 2022)

Fig. 2.1. Schematic diagrams of beam oscillating pattern and the resultant track of laser beam (Černašėjus et al., 2022)

Tyrimo metu nustatyta, kad, atliekant nikelio pagrindo su volframo karbidais užpurkštų ir perlydytų krosnyje dangų lazerinį apdorojimą, be išankstinio dangos pakaitinimo, su lazerio spindulio skersiniais svyravimais ir be jų, visuose bandiniuose susidarė skersiniai ir išilginiai įtrūkiai (2.2–2.4 pav.). Išilginiai įtrūkiai (ypač jei jie yra takelio centre) yra kristalizacinio pobūdžio.

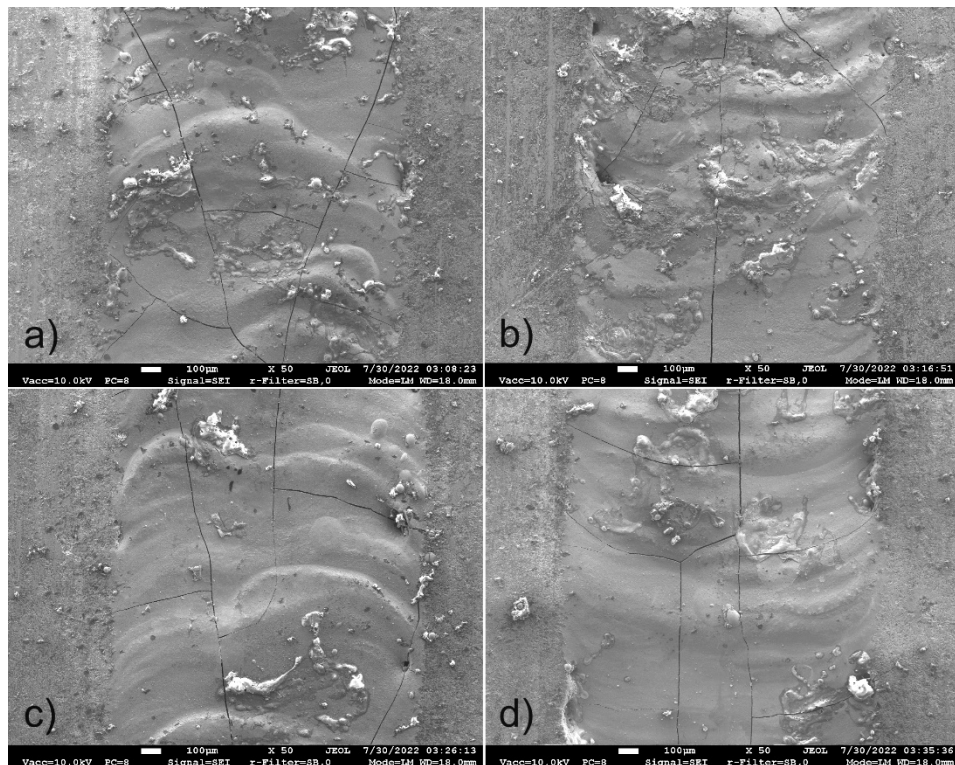


2.2 pav. Lazeriu apdorotų paviršiaus takelių nuotraukos (be išankstinio pagrindo pakaitinimo – 20 °C, be lazerio spindulio skersinių svyravimų – 0 mm, lazerinio apdorojimo greitis: a – 250 mm/min, b – 500 mm/min, c – 750 mm/min, d – 1000 mm/min)

Fig. 2.2. Photographs of laser-treated surface tracks (without preheating the substrate – 20 °C, without laser oscillation – 0 mm, laser processing speed: a – 250 mm/min, b – 500 mm/min, c – 750 mm/min, d – 1000 mm/min)

Įtrūkių atsiranda auštant ir kietėjant perlydytam takeliui arba susidaro terminio poveikio srityje, nevysiškai išsilydžiusioje srityje tarp grūdelių prie išsilydžiusių tarpsluoksnių. Skersiniai įtrūkiai dažniausiai yra terminiai. Kietėdamas perlydytas takelis gali sutrūkinėti dėl fizikinių priežasčių, esant tūrio ir temperatūrų

pokyčiams. Dangų apdorojimo lazeriu greičio įtakos susidariusių dangų įtrūkių pobūdžiui nepastebėta.

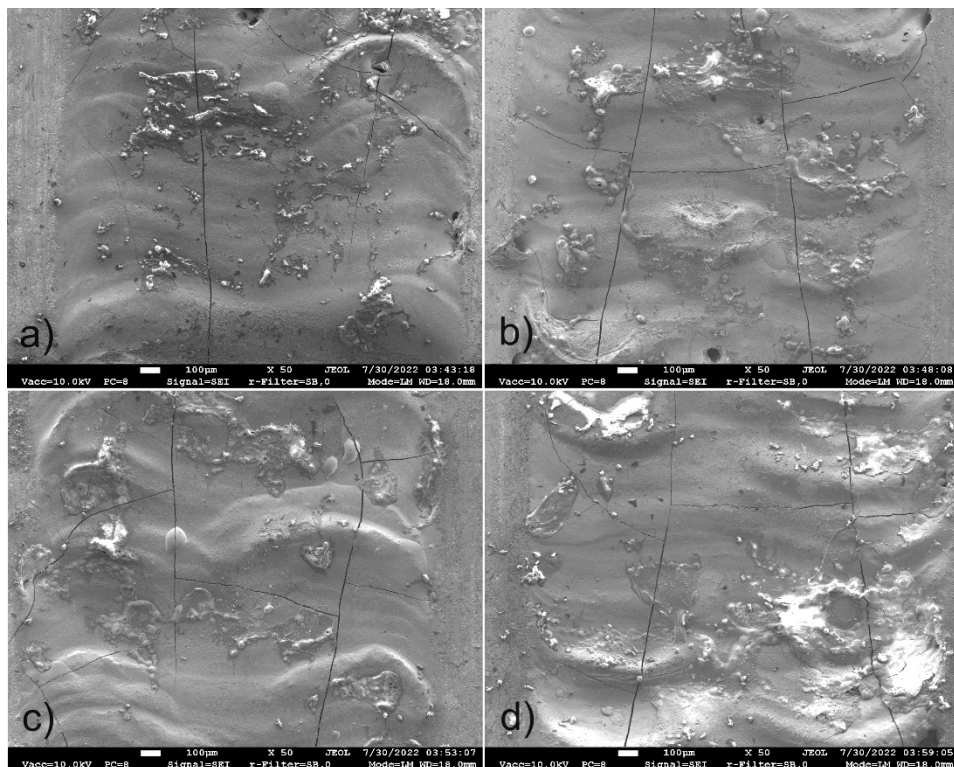


2.3 pav. Lazeriu apdorojų paviršiaus takelių nuotraukos (be išankstinio pagrindo pakaitinimo – 20 °C, lazerio spindulio skersiniai svyravimai – 1 mm, lazerinio apdorojimo greitis: a – 250 mm/min, b – 500 mm/min, c – 750 mm/min, d – 1000 mm/min)

Fig. 2.2. Photographs of laser-treated surface tracks (without preheating the substrate – 20 °C, without laser oscillation – 0 mm, laser processing speed: a – 250 mm/min, b – 500 mm/min, c – 750 mm/min, d – 1000 mm/min)

Lazerio spindulio skersiniai svyravimai akivaizdžiai padidino dangos metalo pleišėjimą (2.3–2.4 pav.), nes lazerio spindulio skersinių svyravimų taikymas padidino dangos apdoroto takelio perlydyto metalo plotį, o tai nulėmė takelio formos koeficiento padidėjimą (takelio pločio ir takelio gylio santykį). Nikelio pagrindo dangų su volframo karbidais lazerinis apdorojimas be išankstinio pakaitinimo ir nenaudojant lazerio spindulio skersinių svyravimų dangos paviršiniame sluoksnyje suformuodavo ištisinį išilginį įtrūkį (tikėtina, kad tai kristalizacinio pobūdžio

įtrūkis) su skersiniais terminiais įtrūkiais, atsišakančiais nuo pagrindinio įtrūkio dažniausiai statmena kryptimi (2.2 pav.).



2.4 pav. Lazериu apdorotų paviršiaus takelių nuotraukos (be išankstinio pagrindo pakaitinimo – 20 °C, lazerio spindulio skersiniai svyravimai – 2 mm, lazerinio apdorojimo greitis: a – 250 mm/min, b – 500 mm/min, c – 750 mm/min, d – 1000 mm/min)

Fig. 2.2. Photographs of laser-treated surface tracks (without preheating the substrate – 20 °C, without laser oscillation – 0 mm, laser processing speed: a – 250 mm/min, b – 500 mm/min, c – 750 mm/min, d – 1000 mm/min)

Tiriamųjų dangų lazerinis apdorojimas su lazerio spindulio skersiniais svyravimais ne tik padidino apdorojamos dangos pleišėjimą, bet ir pakeitė dangos metalo pleišėjimo pobūdį (2.3–2.4 pav.). Taikant dangų lazerinį apdorojimą su lazerio spindulio skersinių svyravimų 2 mm dydžio amplitude, dangos paviršiniame sluoksnyje įprastai susiformuodavo du lygiagretus išilginiai įtrūkiai (panašiu atstumu nuo perlydyto takelio ašies) su skersiniais įtrūkiais tarp jų ir link perlydyto takelio krašto (2.4 pav.).

2.2. Darbe taikomi tyrimo metodai

Daugiafunkcės dangos – tai dangos, kurios yra atsparios dviem arba daugiau išoriniams aplinkos poveikiams, kad apsaugotų padengtą medžiagą pagal tam tikrą funkcinių poreikį. Tyrimo metu planuojama pasiekti kokybinės dangos charakteristikas, kurios leistų užtikrinti dengiamo substrato apsaugą nuo tokių išorinių veiksnių, kaip aukšta aplinkos temperatūra (iki 700 °C), korozinė (elektrocheminės korozijos) terpė ir mechaniniai paviršių dilimo proceso pažeidimai. Siekiama suformuoti daugiafunkcę dangą, pasižyminčią geru atsparumu abrazyviniam dilimui, elektrocheminei korozijai ir aukštatemperatūrei oksidacijai.

Terminiškai suformuotos dangos apibūdinamos tokiais fizikinėmis, technologinėmis bei eksploatacinėmis savybėmis kaip dangos ir substrato paviršiaus sukibimo stipris (adhezija), dangos storis, nelygumų dydis, porėtumas, kietumas, atsparumas dilimui, korozijai ir pan.

Darbe atlikti kompleksiniai užpurkštų ir perlydytų dangų eksperimentiniai tyrimai. Jų metu:

- išanalizuota užpurkštų ir elektrinėje krosnyje bei lazeriu perlydytų dangų mikrostruktūra, nustatytas porėtumo procentinis kiekis, cheminė bei fazinė sudėtis;
- atlikti lazeriu perlydytų takelių geometrijos ir paviršiaus profilometrijos tyrimai;
- atlikti lazeriu perlydyto metalo kietumo ir mikrokietumo tyrimai;
- ištirtos lazeriu perlydyto metalo tribologinės savybės;
- atlikta suformuotų kompozicinių (taikant apdorojimą lazeriu takeliais) metalo keraminių dangų diferencinė terminė analizė, termogravimetrinė analizė, koroziniai tyrimai ir atsparumo abrazyviniam dilimui bandymai.

2.2.1. Mikrostruktūros optinės mikroskopijos tyrimas

Optinės mikroskopijos tyrimai atlikti naudojant optinę mikroskopą *Nikon Eclipse MA200* su integruota skaitmenine vaizdo kamera *Nikon Infinity 2* bei programiniu duomenų apdorojimo paketu. Dangų morfologijos ir struktūros tyrimai atlikti stebint vaizdą pro mikroskopo okuliarą bei kompiuterio monitoriuje. Dangų struktūra tirta taikant 50 ir 100 kartų didinimą.

Bandiniai optinei mikroskopijai paruošti juos užpilant epoksidine derva, šlifuojant, poliruojant ir ėsdinant. Mikrošlifams poliruoti buvo naudojamas skirtingo grūdėtumo šlifavimo popierius (nuo P240 iki P2500). Tolesnis paviršių poliravimas buvo atliekamas naudojant poliravimo audinius ir pastas, kurių grūdėtumas nuo 3 µm iki 0,2 µm. Mikrošlifai po poliravimo buvo nuplauti etilo alkoholio tirpalu ir išdžiovinti karšto oro srautu. Dangų struktūra buvo tiriama po poliravimo

ir po metalo ėsdinimo. Optinės mikroskopijos būdu buvo vertinamas lazeriu apdorotos ir neapdorotos dangos struktūros vientisumas ir porėtumas.

Buvo tiriamas tokių bandinių porėtumas: užpurkštų dangų; užpurkštų ir perlydytų elektrinėje krosnyje dangų; užpurkštų, perlydytų elektrinėje krosnyje ir apdorotų lazeriu dangų. Dangoje įvairaus pavidalo ir dydžio tuštumos bei poros buvo nustatytos iš bandinių skersinių mikrošlifų skaitmeninių nuotraukų, padarytų optiniu mikroskopu su integruota skaitmenine vaizdo kamera. Nuotraukos buvo analizuojamos naudojant *Scion Image* programinę įrangą, o gautiems duomenims apdoroti buvo naudota *Microsoft Office* programų paketo elektroninė skaičiuoklė *Excel*.

2.2.2. Skenuojamoji elektroninė mikroskopija ir rentgeno mikroanalizė

Mikrostruktūrinei dangų analizei buvo naudojamas skenuojantis elektroninis mikroskopas SEM JEOL JSM-7600F (Japonija) su energijos dispersijos spektrometru *IncaEnergy 350* (Jungtinė Karalystė) rentgeno mikroanalizei.

Pagrindiniai elektroninės mikroskopijos bandymų analizės parametrai: greitinančioji įtampa – 10 kV, emisijos srovė – 45 μ A, atstumas iki bandinio paviršiaus – 8 mm, padidinimas nuo 50 iki 1000 kartų, temperatūra – 22 °C, mišrus antrinių ir atgal išsklaidytų elektronų signalas vaizdavimui.

Bandinių mikrostruktūra tirta SEM būdu antrinių elektronų detektoriumi, skenuojant bandinio paviršių elektronų pluoštu. Prieš pradedant analizę, bandinių paviršiai buvo chemiškai nuvalyti, t. y. nuo paviršių pašalinti įvairūs teršalai, likę po šlifavimo ir poliravimo (paskutinis poliravimo etapas atliktas naudojant 0,2 μ m koloidinio silicio dioksido suspensiją). Atskirų lazeriu apdorotų takelių išlydyto takelio geometriniai parametrai (plotis ir gylis) buvo nustatyti naudojant SEM vaizdus: taikant padidinimą x100 bandiniams be lazerio spindulio skersinių svyravimų ir taikant padidinimą x50 su lazerio spindulio skersiniais svyravimais.

Struktūros dedamųjų cheminė sudėtis buvo analizuojama taškinės ir linijinės rentgeno mikroanalizės metodu su energijos dispersijos spektrometru (EDS).

2.2.3. Rentgeno spindulių difrakcijos analizė

Rentgeno spindulių difrakcijos analizė paremta rentgeno spindulių sąveika su bandinio kristalinės gardelės atomais. Rentgeno spindulių difrakcinį vaizdą sudaro smailių plotas, intensyvumas ir difrakcinis kampas. Šie parametrai atspindi medžiagos kristalinę struktūrą: gardelės tipą, kristalų dydžius, jų orientaciją, mikroįtempius ir fazinę sudėtį.

Dangų kokybinė fazinės sudėties analizė atlikta naudojant rentgeno spindulių difraktometrą SMART LAB (Japonija) polikapiliarinės optikos metodu. Bandymų parametrai: 9 kV įtampa, difrakcijos kampo 2θ intervalas – nuo 20° iki 80° , detektoriaus judėjimo žingsnis – $0,02^\circ$, detektoriaus judėjimo greitis – $1^\circ/\text{min}$, temperatūra – 25°C .

Tyrimai atlikti analizuojant lazeriu apdorotų ir neapdorotų bandinių nuvalytus (mechaniniu, ultragarsiniu ir cheminiu būdais) viršutinius paviršius. Analizės rezultatai pateikiami rentgenogramose – kreivėse, kuriose pavaizduotos atspindėjusių rentgeno spindulių intensyvumo priklausomybės nuo detektoriaus kampo. Fazių identifikavimas atliktas dešifruojant rentgenogramas su atitinkama programine įranga.

2.2.4. Dangų paviršiaus šiurkščio matavimas ir paviršiaus topografijos tyrimas

Šiurkštis – tai periodiškai ar neperiodiškai pasikartojantys paviršiaus nelygumai, sudarantys dangos reljefą. Tyrimo metu bandinių šiurkštis buvo vertinamas su profilometru *Mitutoyo SJ-410* (Japonija). Paviršiaus šiurkščio matavimai buvo atlikti remiantis standartu LST EN ISO 12085:2001 „Geometrinis gaminio aprašas (GPS). Paviršiaus reljefas. Profilio metodas. Pagrindiniai parametrai (ISO 12085:1996)“. Šiurkščio matavimo parametrai: bendras matavimo ilgis $L = 3,2$ mm; vertinamos atkarpos ilgis $l = 0,8$ mm, matuojamų atkarpų kiekis – 4, matavimo greitis – $0,5$ mm/s. Profilometrijos metu fiksuoti Ra , Rq , Rz ir $Rz\text{Imax}$ parametrai. Matavimai buvo atlikti 7 kartus (rezultatas apskaičiuotas iš 7 matavimų, atmetant didžiausią ir mažiausią matavimo reikšmės).

Dangos perlydytų takelių paviršiaus nelygumų matavimai buvo atlikti su konturmačiu *Mitutoyo CV-2100* (Japonija). Konturmačio adatos smaigalio spindulys – $25\ \mu\text{m}$. Matavimo metu buvo atliktas lazeriu perlydytų bandinių paviršiaus skersinis skenavimas: matavimo ilgis – 15 mm, matavimo greitis – $0,1$ mm/s, matavimų intervalas – 1 mm. Skersiniai matavimai kiekvienam bandiniui buvo atlikti po 5 kartus. Gauti duomenys buvo apdorojami naudojant *Mitutoyo FORMTRA-CEPAK* programinę duomenų apdorojimo įrangą. Šio tyrimo esmė – rasti žemiausius lazeriu perlydyto takelio nelygumų taškus nušlifuoto paviršiaus atžvilgiu, iš gautų reikšmių rasti aritmetinį vidurkį, apskaičiuoti standartinę paklaidą ir nustatyti priklausomybes.

2.2.5. Kietumo ir mikrokietumo matavimai

Kietumo matavimas buvo atliktas naudojant kietmatį *Mitutoyo HV-100* (Japonija). Matavimai atlikti *Vickers* metodu ant užpurkštų, užpurkštų ir perlydytų

elektrinėje krosnyje bei užpurkštų, perlydytų elektrinėje krosnyje ir apdorotų lazeriu (lazerio spindulio skersiniai svyravimai – 1 mm, apdorojimo greitis – 500 mm/min, išankstinio pakaitinimo temperatūra – 400 °C) dangų paviršinių sluoksnių su 1000 g apkrova (9,807 N) ir 15 s išlaikymu. Prieš atliekant kietumo bandymus bandiniai buvo nušlifuoti ir nupoliruoti iki $Ra \sim 0,46 \mu\text{m}$. Kiekvienam bandiniui matavimai buvo atlikti po 7 kartus. Aritmetiniai vidurkiai ir standartinės paklaidos buvo apskaičiuotos iš 7 matavimų, atmetant didžiausią ir mažiausią matavimo reikšmes.

Mikrokietumo tyrimas buvo atliktas naudojant mikrokietumo matavimo prietaisą *Zwick Roell ZH* (Vokietija). Matavimai atlikti *Vickers* metodu su 200 g apkrova ir 15 s išlaikymu ant šlifutų ir poliruotų bandinių skerspjūvių. Vidutinės mikrokietumo reikšmės buvo apskaičiuotos kaip atskirų matavimų, atliktų per išlydyto takelio plotį ($Av_{\text{horiz.}}$) ir gylį ($Av_{\text{vertic.}}$), aritmetinis vidurkis ir pateiktos reikšmės darbe kartu su vidutiniu mikrokietumu (Av), apskaičiuotu kaip $Av_{\text{horiz.}}$ ir $Av_{\text{vertic.}}$ vidurkis. Darbe pateikiami mikrokietumo pasiskirstymo profiliai per visą dangų plotį, gauti darant įspaudas 50 μm gylyje nuo paviršiaus 100 μm žingsniu.

Mikrokietumo bandymai atlikti remiantis standartu LST EN ISO 4516:2002 „Metalinės ir kitos neorganinės dangos. Vickerso ir Knopo mikrokietumo bandymai (ISO 4516:2002)“.

2.2.6. Tribologinių savybių tyrimas

Dangų tribologinėms savybėms įvertinti buvo atlikti sausojo slydimo *Ball-on-Disc* bandymai. Bandymai buvo atlikti naudojant *Microtest* tribometrą. Prieš bandymą bandinio paviršius buvo nušlifuotas iki $Ra \sim 0,46 \mu\text{m}$. Tribologijos tyrimo sąlygos buvo tokios: slydimo atstumas – 200 m; slydimo greitis – 200 suk./min; trajektorijos spindulys – 0,7 mm; apkrova – 20 N; eksperimento temperatūra – 22 ± 1 °C; indentorius – 6 mm skersmens rutuliukas, pagamintas iš grūdinto nerūdijančio plieno AISI 52100. Bandinių tribologinės savybės ir atsparumas dilimui įvertinti dviejų kūnų sausos trinties dilimo bandymais. Tyrimo metu buvo vertintas bandinių masės praradimas. Bandinių masei išmatuoti prieš tribologinį tyrimą ir po jo buvo naudojamos 0,00001 g tikslumo analitinės svarstyklės *Precisa XR 205SMR*, o nusidėvėjimo greitis buvo apskaičiuotas masės nuostolių padalijus iš slydimo atstumo ir išreiškus $\mu\text{g/m}$. Siekiant eliminuoti pradinio šiurkščio įtaką bandinių paviršiaus trinties koeficiento rezultatams, pirmieji 20 metrų slydimo atstumo bandymo duomenys nebuvo vertinami. Vidutinės bandymų reikšmės darbe pateikiamos su standartiniu nuokrypiu.

Papildomai buvo matuotas bandinių paviršiaus tūrio praradimas po dilimo bandymų arba dilimo takelių tūris. Keturiuose statmenuose apskrito dilimo takelio skerspjūviuose buvo išmatuoti bandinių takelių profiliai ir apskaičiuoti takelių

skerspjūvių plotai. Iš gautų rezultatų buvo apskaičiuotas aritmetinis to pačio dilimo takelio skerspjūvio ploto vidurkis. Dilimo takelių profiliui matuoti buvo naudojamas profilometras *Mitutoyo SJ-410* (Japonija). Gautų duomenų analizei buvo naudota *Microsoft Office* programų paketo elektroninė skaičiuoklė *Excel*. Tribologiniai tyrimai buvo atlikti bandiniams su užpurkšta danga, bandiniams su užpurkšta ir perlydyta krosnyje danga ir bandiniams su užpurkšta, perlydyta krosnyje ir apdorota lazeriu danga (apdorojimo greitis – 500 mm/min, lazerio spindulio skersiniai svyravimai – 2 mm, išankstinio pakaitinimo temperatūra – 400 °C).

2.2.7. Abrazyvinio dilimo bandymai

Abrazyvinio dilimo bandymams atlikti buvo naudojama diskinė trinties mašina *2101 TP* (Rusija). Prieš dilimo bandymą ir po kiekvieno dilimo bandymo visi bandiniai buvo pasverti. Bandiniai buvo sveriami analitinėmis svarstyklėmis *RADWAG AS 60/220.R2 PLUS*, kurių tikslumas – 0,00001 g (matuojant iki 60 g). Dilimo bandymams naudojami bandiniai, kurių matmenys yra 20×10×9,4 mm.

Abrazyvinio dilimo bandymai buvo atliekami bandiniams su užpurkšta danga, bandiniams su užpurkšta ir perlydyta krosnyje danga ir bandiniams su užpurkšta, perlydyta krosnyje danga ir apdorota lazeriu danga (lazerinio apdorojimo greitis – 500 mm/min, lazerio spindulio skersiniai svyravimai – 1 mm, skenavimo žingsnis – 3,3 mm, išankstinio pakaitinimo temperatūra – 400 °C). Siekiant išvengti įtrūkių, atsirandančių dėl lazerinio apdorojimo terminio poveikio ir temperatūrinių įtempių Ni-WC metalo keraminės dangos metale, bandiniams buvo taikoma lazerinio skenavimo metodika atskirais takeliais su 3,3 mm žingsniu tarp takelių centrų. Prieš atliekant dilimo bandymus, bandinių paviršiai buvo nušlifuoti, taip eliminuojant bandinių paviršiaus nelygumų įtaką dilimo bandymo rezultatams. Dilimo bandymams pasirinktas SiC šlifavimo popierius P220 (dalelių dydis apie 58 μm), o kiekvienam bandymui buvo imamas naujas popieriaus lapas. Darant abrazyvinio dilimo bandymus, naudojami kiekvienam bandymui 2 bandiniai. Kiekvienas bandinys trinamas 5 kartus po 10 minučių, kiekvieną kartą nustatant bandinio masės praradimą analitinėmis svarstyklėmis. Bandymai atliekami 24 °C temperatūroje. Dilimo mašinos disko sukimosi dažnis – 168 sūk./min, vardinė bandinių prispaudimo jėga – 35 N.

2.2.8. Korozinio atsparumo analizė

Terminių purškimo užpurkštos, perlydytos elektrinėje krosnyje ir apdorotos lazeriu (lazerinio apdorojimo greitis – 500 mm/min, lazerio spindulio skersiniai svyravimai – 1 mm, išankstinio pakaitinimo temperatūra – 400 °C, skenavimo

žingsnis – 3,3 mm) nikelio pagrindo su volframo karbidais dangos korozinis atsparumas buvo vertinamas potenciodinaminės poliarizacijos matavimais. Tyrimai buvo atlikti Fizinių ir technologijos mokslų centre (FTMC), Medžiagotyros ir korozijos laboratorijoje. Analizė buvo atlikta naudojant potenciostatą / galvanostatą *Autolab PGSTAT302* (Olandija), kurio atitikties įtampa – 30 V, dažnių juostos plotis – 1 MHz. Matavimai atlikti naudojant trijų elektrodų elektrocheminę įtampų eilę: darbinis elektrodas – skirtingais būdais apdorotas nikelio pagrindo su volframo karbidais dangos bandinys (terminiu purškimu užpurkštas; terminiu purškimu užpurkštas ir perlydytas elektrinėje krosnyje; terminiu purškimu užpurkštas, perlydytas elektrinėje krosnyje ir apdorotas lazeriu bandinys), pagalbinis elektrodas yra platinos viela, o lyginamasis atskaitos elektrodas – Ag/AgCl. Bandinių paviršiai buvo nušlifuoti ir nupoliruoti (poliravimo pastos dalelių dydis iki 0,2 μm).

Korozijos bandymai buvo atlikti agresyvioje rūgštinėje terpėje: tirpalas – 1 M H_2SO_4 , bandymų patalpos temperatūra – 22 °C, elektrocheminių matavimų trukmė buvo 60 min. Korozijos tyrimo metu buvo stabilizuotas korozijos potencialas ir paskleistas potencialas į anodinę ir katodinę puses. Naudojant atitinkamą duomenų apdorojimo programinę įrangą buvo nustatytas korozijos potencialas ir korozijos srovė.

2.2.9. Termogravimetrinė analizė

Termogravimetrinė analizė (TGA) yra terminės analizės metodas, taikomas bandinio masės pokyčiams, priklausomai nuo temperatūros arba laiko, matuoti. Tai suteikia informacijos apie fizikinius reiškinius, tokius kaip absorbcija ir desorbcija, ir cheminius reiškinius, tokius kaip terminis skilimas ir aukštatemperatūre oksidacija. Atliekant termogravimetrinę analizę, bandinys nuolat sveriamas kaitinant oro terpėje. Daugelyje kietųjų medžiagų kaitinant vyksta reakcijos, kurių metu susidaro dujiniai šalutiniai produktai. TGA metu šie šalutiniai produktai pašalinami ir registruojami likusios bandinio masės pokyčiai.

Tyrimai buvo atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybinių medžiagų instituto Kompozitinių medžiagų laboratorijoje. Nikelio pagrindo su volframo karbidine keramika dangų termogravimetrinė analizė buvo atliekama vienalaikiu termobalansiniu prietaisu LINSEIS STA PT-1600 (Vokietija), kurį sudaro skaitmeninės svarstyklės ir bandinių laikiklis su integruota termopora. Bandiniai prieš TGA ir DTA tyrimus buvo nuplauti ultragarsinėje vonelėje su acetonu ir išdžiovinti laboratorinėje krosnyje 80 °C temperatūroje. Aliuminio oksido tiglio su 60–80 mg bandiniais buvo kaitinami oro aplinkoje iki 1000 °C temperatūros. Kaitinimo greitis buvo 10 °C/min. Kaitinamų bandinių masės skirtumas buvo matuojamas ir užrašomas kaip masės pokyčio priklausomybė nuo kaitinimo temperatūros. Termogravimetrinė analizė buvo atliekama bandiniams su užpurkšta

danga, bandiniams su užpurkšta ir perlydyta krosnyje danga ir bandiniams su užpurkšta, perlydyta krosnyje danga ir apdorota lazeriu danga (apdorojimo greitis – 500 mm/min, lazerio spindulio skersiniai svyravimai – 1 mm, skenavimo žingsnis – 3,3 mm, išankstinio pakaitinimo temperatūra – 400 °C).

2.2.10. Diferencinė terminė analizė

Atliekant diferencinę terminę analizę (DTA), bandinys ir inertinis palyginamasis bandinys (etalonas) kaitinami vienodomis sąlygomis ir termoporomis matuojama jų temperatūrų skirtumo priklausomybė nuo temperatūros. Jeigu esant tam tikrai temperatūrai prasideda cheminis ar fizinis procesas, bandinio temperatūra tampa atitinkamai aukštesnė ar žemesnė už etalono temperatūrą. Tiriamojo bandinio ir etalono temperatūrų skirtumas matuojamas priklausomai nuo temperatūros etalone, taip gaunama DTA kreivė.

NiCrCoFeCBSi pagrindo su volframo karbidine keramika dangų diferencinė terminė analizė buvo atlikta naudojant LABSYS evo DTA/DSC – SETARAM (Prancūzija) tyrimų platformą. Aliuminio oksido tiglio su 60–80 mg masės bandiniais buvo kaitinamas oro terpėje nuo 25 °C iki 1000 °C temperatūros. Kaitinimo greitis – 10 °C/min. Temperatūros skirtumas tarp bandinių ir etalono buvo matuojamas ir užrašomas kaip priklausomybė nuo kaitinimo temperatūros.

Diferencinė terminė analizė buvo atliekama bandiniams su užpurkšta danga, bandiniams su užpurkšta ir perlydyta krosnyje danga ir bandiniams su užpurkšta, perlydyta krosnyje danga ir apdorota lazeriu danga (apdorojimo greitis – 500 mm/min, lazerio spindulio skersiniai svyravimai – 1 mm, skenavimo žingsnis – 3,3 mm, išankstinio pakaitinimo temperatūra – 400 °C).

2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Siekiant suformuoti korozijai bei dilimui atsparią metalo keraminę dangą, sukurta nuosekli nikelio pagrindo su volframo karbidais dangos formavimo technologija, susidedanti iš liepsninio purškimo, perlydymo elektrinėje krosnyje ir lazerinio apdorojimo su skersiniais spindulio svyravimais.
2. Eksperimentinių tyrimų metu buvo pastebėta, kad tiriamosios dangos apdorojimas lazeriu lemia didelių temperatūrinių įtempių atsiradimą dangos metalo ir išilginių bei skersinių įtrūkių formavimosi procesą. Siekiant sumažinti lazerio spindulio šiluminį poveikį dangos metalui, buvo taikomas apdorojamų bandinių išankstinis pakaitimas iki 200 °C ir iki 400 °C temperatūros.

3. Optinė mikroskopija, skenuojamoji elektroninė mikroskopija, rentgeno mikroanalizė, rentgeno spindulių difrakcijos analizė, paviršiaus profilometrija, kietumo ir mikrokietumo tyrimas bei tribologinių savybių tyrimas leido ištirti lazeriu apdorotų nikelio pagrindo su volframo karbidais dangų morfologijos, paviršiaus topografijos, metalo struktūros ir fazinės sudėties ypatumus bei fizikines savybes, priklausančias nuo išankstinio dangos pakaitinimo ir lazerinio apdorojimo parametrų.
4. Abrazyvinio dilimo, potenciodinaminės poliarizacijos, termogravimetrinės ir diferencinės terminės analizės bandymai leido įvertinti suformuotų kompozicinių (taikant apdorojimą lazeriu takeliais) apsauginių metalo keraminių Ni-WC dangų kokybines charakteristikas: atsparumą elektrocheminei ir aukštatemperatūrei korozijai bei eksploatacinį resursą esant abrazyvinio dilimo procesams.

Lazerinio apdorojimo poveikio dangų struktūrai ir savybėms tyrimai

Atlikus mokslinių literatūros šaltinių analizę, buvo nustatyta, kad, taikant įvairias MMK dangų lazerinio formavimo technologijas aplydant, galima suformuoti ni-kelio pagrindo su volframo karbidais skirtingų eksploatacinių savybių dangas. Ty-rimo metu siekiama įvertinti lazerinio apdorojimo taikymo galimybę modifikuo-jant jau suformuotas purkštiniu būdu ir perlydytas krosnyje MMK dangas siekiant pagerinti tokių dangų eksploatacines savybes. Skyriuje pateikiami ir analizuojami NiCrCoFeBSi+40 % su volframo karbidais užpurkštų, užpurkštų ir perlydytų elektrinėje krosnyje bei užpurkštų, perlydytų elektrinėje krosnyje ir lazeriu apdo-rotų dangų sandaros bei savybių tyrimo rezultatai. Skyriaus tematika paskelbtos dvi autorės publikacijos (Černašėjus et al., 2022; Decker et al., 2023).

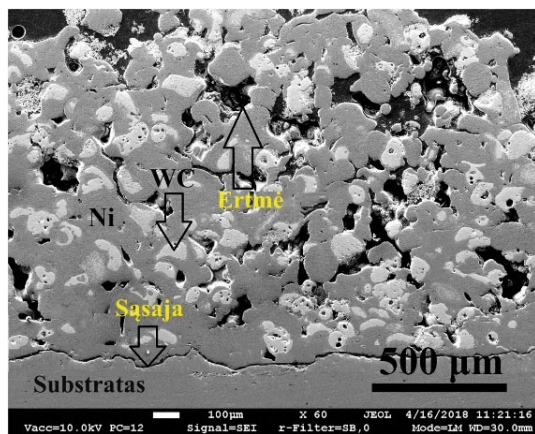
3.1. Lazerinio apdorojimo poveikis dangų sandarai ir savybėms

Skyriuje pateikiamas ir analizuojamas lazerinio apdorojimo poveikis dangų san-darai ir savybėms. Pateikiami ir aptariami: užpurkštų ir elektrinėje krosnyje per-lydytų bei lazeriu apdorotų dangų sandaros ir mikrostruktūros tyrimų rezultatai; lazerinio apdorojimo poveikis perlydytų dangų fazinei sudėčiai; dangų paviršiaus

šiurkščio matavimų ir paviršiaus topografijos tyrimo rezultatai; dangų metalo kietumo, mikrokietumo, tribologinių savybių, abrazyvinio dilimo, korozinio atsparumo, termogravimetrinės ir diferencinės terminės analizės rezultatai.

3.1.1. Užpurkštų ir elektrinėje krosnyje perlydytų dangų sandaros ir mikrostruktūros tyrimai

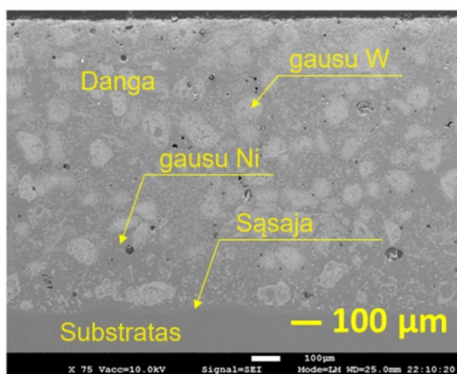
Užpurkšta danga turi tolygią mikrostruktūrą su daugybe tuštumų ir tarpų tarp tiškalų, ryškią sulydymo liniją tarp užpurkšto sluoksnio ir substrato bei atitinkamai prastą sukibimą. Terminio purškimo metu dalis miltelių dalelių tik šiek tiek išsilydė ir dangos skerspjūvyje jos matomos kaip atskirtos dalelės, išlaikiusios savo pirminę formą. Suformuotos dangos skerspjūvio mikrostruktūros nuotraukoje (3.1 pav.) tarp užpurkšto dangos sluoksnio ir substrato galima matyti ryškią sulydymo liniją, tai reiškia, kad užpurkštos dangos tiškai dėl nepakankamos įkaitinimo temperatūros turėjo prastą vilgumą ir suformavo sukibimą su substratu daugiausia tik mechaninio pobūdžio. Todėl tikėtina, kad tik užpurkšta danga nepasieks aukštų adhezijos jėgos reikšmių. Neišlydytos arba iš dalies išlydytos WC/W₂C dalelės yra tolygiai pasiskirsčiusios suformuotos dangos nikelio matricoje.



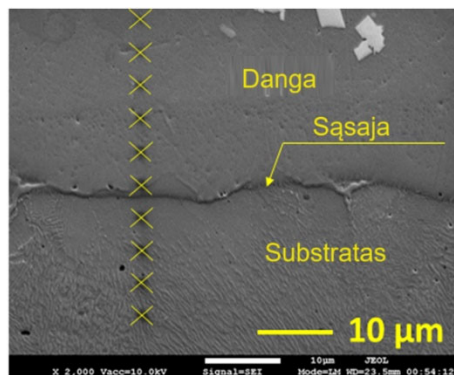
3.1 pav. Užpurkštos dangos mikrostruktūra
Fig. 3.1. Microstructure of as-sprayed coating

Šiame tyrime lazerinio apdorojimo eksperimentai buvo atlikti su terminiu purškimu užpurkštomis ir perlydytomis elektrinėje krosnyje dangomis (3.2 pav., a). Dangos perlydimas elektrinėje krosnyje (tai yra vienas iš įprastų dangų perlydymo būdų) buvo atliekamas siekiant pagerinti užpurkštos dangos sukibimą su

substratu ir sumažinti dangos sluoksnio porėtumą. Danga buvo kaitinama iki 1300 °C temperatūros 2,5 min ir po to atvėsinama kambario temperatūroje (20 °C). Dangos storis po perlydymo krosnyje sumažėjo nuo 1,2–1,3 mm iki 0,9–1,1 mm. Po perlydymo proceso dangoje susidarė monolitinis metalo sluoksnis su akivaizdžiai sumažėjusiu porėtumu (nuo ~19,6 % neperlydytoje dangoje iki ~3,6 % elektrinėje krosnyje perlydytoje dangoje); volframo karbido dalelės buvo iš dalies ištirpusios nikelio lydinio matricoje. Dėl lydymosi proceso lazerinio apdorojimo metu dalis nikelio pagrindo dangos metale susidariusių fazių pasižymėjo geru pagrindo paviršiaus vilgumu bei sudarė ištisinę tarpų ir porų neturinčią sąsają (3.2 pav., b).



(a)



(b)

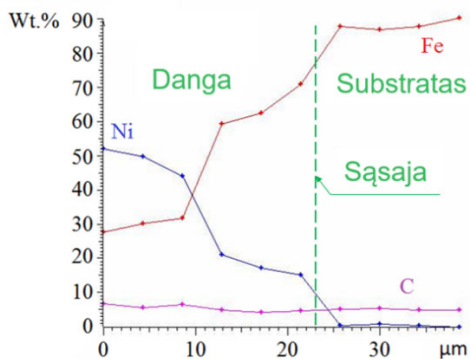
3.2 pav. Elektrinėje krosnyje perlydytos dangos SEM mikrostruktūros nuotraukos:

a) bendras perlydytos krosnyje dangos vaizdas; b) padidintas dangos ir substrato sąsajos sritys vaizdas su pažymėtais EDS analizės taškais

Fig. 3.2. SEM micrographs of the coating remelted in a furnace:

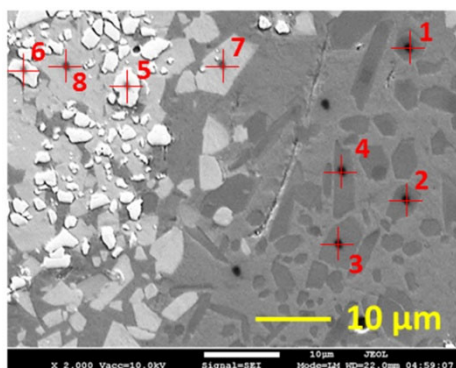
(a) general view of the remelted coating; and (b) enlarged view of interface zone with marked points of EDS analysis

Elementų pasiskirstymas sulydymo linijos srityje parodė padidėjusią geležies koncentraciją dangoje šalia sąsajos, o tai rodo, kad įvyko geležies atomų difuzija ir susidarė stiprus dangos ir substrato metalurginis ryšys (3.3 pav.). Tipiška užpurkštos ir perlydytos krosnyje dangos mikrostruktūra, pasižyminti įvairiomis susidariusiomis fazėmis, pavaizduota 3.4 paveiksle, a. Suformuotos dangos metalo mikrostruktūrą sudaro mažiausiai trijų tipų kietosios fazės, pasiskirsčiusios dvifazėje metalinėje matricoje, susidedančioje iš γ -Ni kieto tirpalo ir Ni-B eutektikos (3.4 pav., b).

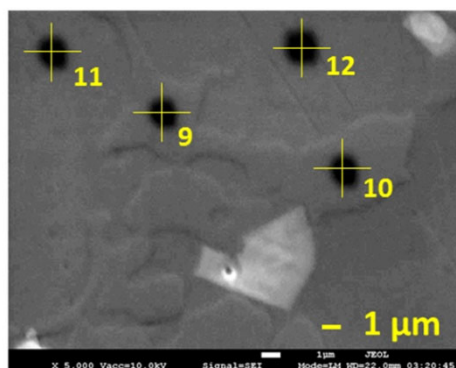


3.3 pav. Elementų pasiskirstymo per sąsają tarp dangos ir substrato grafikas

Fig. 3.3. Graph of elements distribution across the interface between the coating and substrate



(a)



(b)

3.4 pav. Elektrinėje krosnyje perlydytos dangos SEM mikrostruktūros nuotraukos:

a) dangos mikrostruktūra, atspindinti įvairių tipų metalo struktūros fazių ir kietųjų interpusių pasiskirstymą su pažymėtais EDS analizės taškais; b) padidintas metalo matricos mikrostruktūros vaizdas su pažymėtais EDS analizės taškais

Fig. 3.4. SEM micrographs of the coating remelted in a furnace: (a) microstructure of the coating representing the presence of different types of hard precipitates with marked points of EDS analysis; and (b) enlarged view of metal matrix microstructure with marked points of EDS analysis

Remiantis perlydytos krosnyje dangos rentgeno mikroanalize (3.1 lentelė), dangos kietajame tirpale, be nikelio, yra geležies, chromo, kobalto ir nikelyje ištirpusio silicio. Pastebėtos kietosios fazės yra nevisiškai ištirpusios volframo karbidų dalelės, daug chromo turintys karbidai (arba, galbūt, karbaboridai), kuriuose yra nedidelis chromo atomus pakeičiantys nikelio (~4 masės %) ir geležies

(~2 masės %) atomų kiekis ir kompleksiniai karbidai, kuriuose gausu nikelio (~20 masės %) ir chromo (~15 masės %), taip pat volframo (~8 masės %), silicio (~4,5 masės %) ir kobalto (~2,5 masės %).

Atsižvelgiant į tai, kad EDS paprastai rodo didesnę anglies ir boro koncentraciją nei tikroji, C+B atomų ir metalo atomų santykis stebimuose karbiduose yra mažesnis, nei galima matyti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Elementinė mikrostruktūros fazių sudėtis dangoje, perlydytoje krosnyje (EDS, masės %)

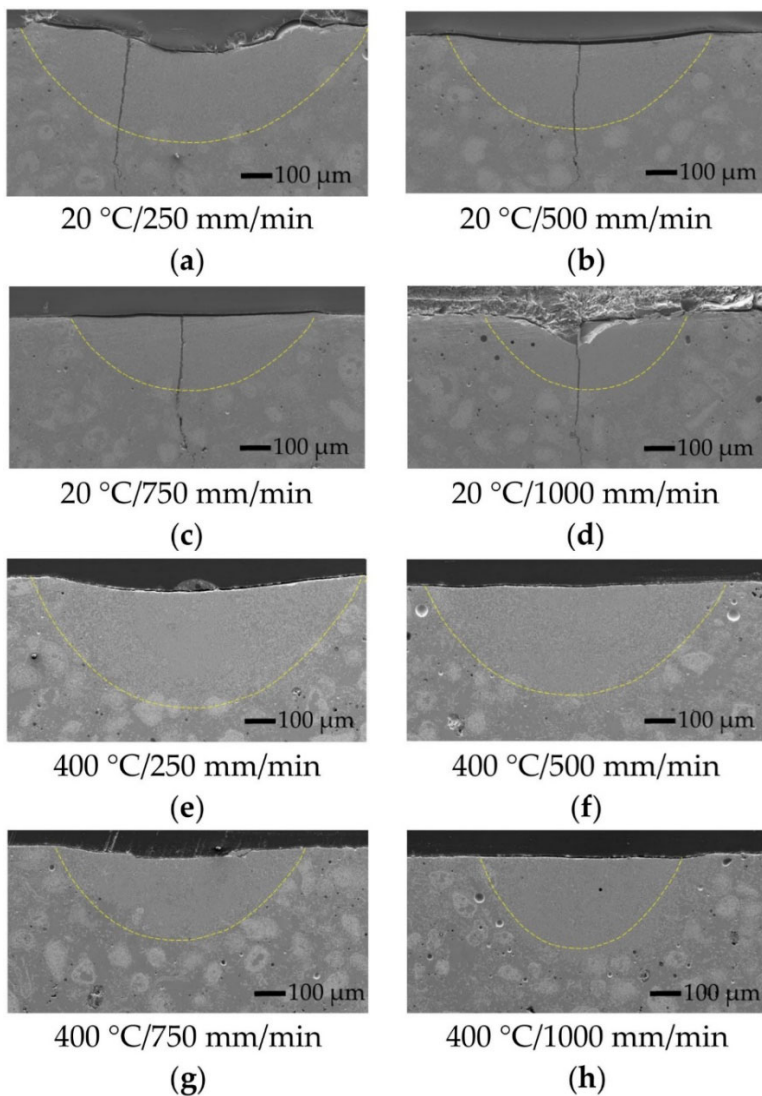
Table 3.1. Elemental composition of phases in coating remelted in furnace (EDS, at. %)

Ele- men- tas	Cr gausi fazė				WC		W, Cr gausi fazė		γ -Ni		Ni-B eutektika	
	T.1	T.2	T.3	T.4	T.5	T.6	T.7	T.8	T.9	T.10	T.11	T.12
B	10,65	9,55	12,28	10,42	1,16	–	10,28	2,41	0,25	6,47	26,41	25,56
C	36,02	38,58	39,22	39,83	57,78	69,47	40,95	40,89	23,28	22,21	21,57	21,65
Si	0,02	–	–	–	–	–	3,90	4,47	2,06	2,09	–	–
Cr	45,59	45,12	38,59	41,54	–	–	14,20	15,74	7,30	7,15	4,77	4,00
Fe	2,34	2,17	2,19	1,33	1,06	0,83	1,30	2,97	11,29	10,75	5,52	5,23
Co	–	0,40	2,34	1,88	–	–	2,15	2,49	6,82	4,68	3,95	4,60
Ni	5,36	3,81	4,42	4,16	0,47	0,47	19,46	22,86	48,59	46,26	37,68	38,88
W	0,02	0,37	0,97	0,84	39,53	29,23	7,76	8,19	0,40	0,39	0,13	0,07
Suma	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Atitinkamai Cr_3C_2 (arba) Cr_7C_3 tipo karbidai (kur Cr atomai iš dalies pakeisti Ni, Fe, Co ir W atomais) gali būti priskirti prie M_2C arba M_7C_3 tipo karbidų, kur M yra daugiausia Ni, Cr ir W.

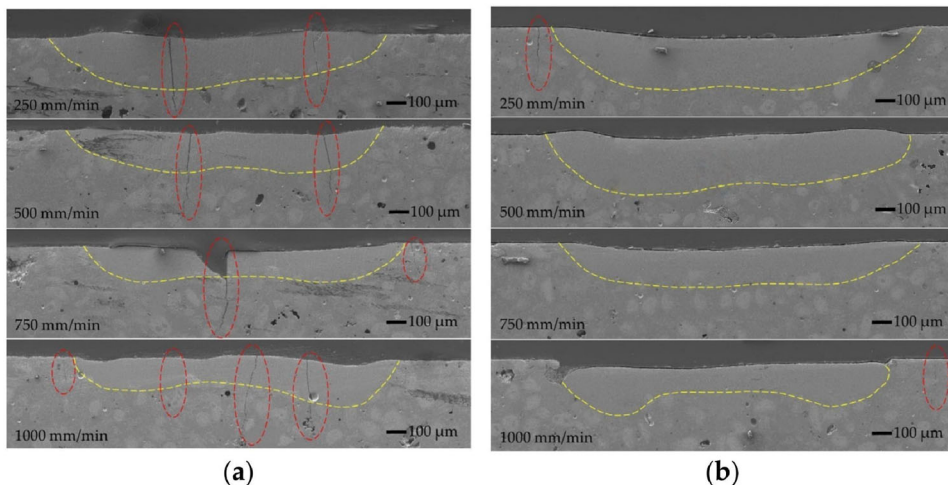
3.1.2. Lazериu apdorotų dangų sandaros tyrimai

Ekspirimentinių tyrimų metu buvo nustatyta, kad dangos perlydymas elektrinėje krosnyje (prieš apdorojimą lazeriu) suformavo gerą metalurginį ryšį tarp užpurkštos dangos ir pagrindo. Be to, lazerinio apdorojimo metu nereikėjo naudoti ištisinio dangos perlydymo per visą dangos storį, siekiant užtikrinti gerą dangos ir pagrindo sukibimą dalinio substrato lydymosi procese. Visi dangos paviršiuje lazeriu perlydyti takeliai buvo suformuoti naudojant lazerio spindulio skersinius svyravimus ir jų nenaudojant, be substrato perlydymo proceso (3.5–3.7 pav.).



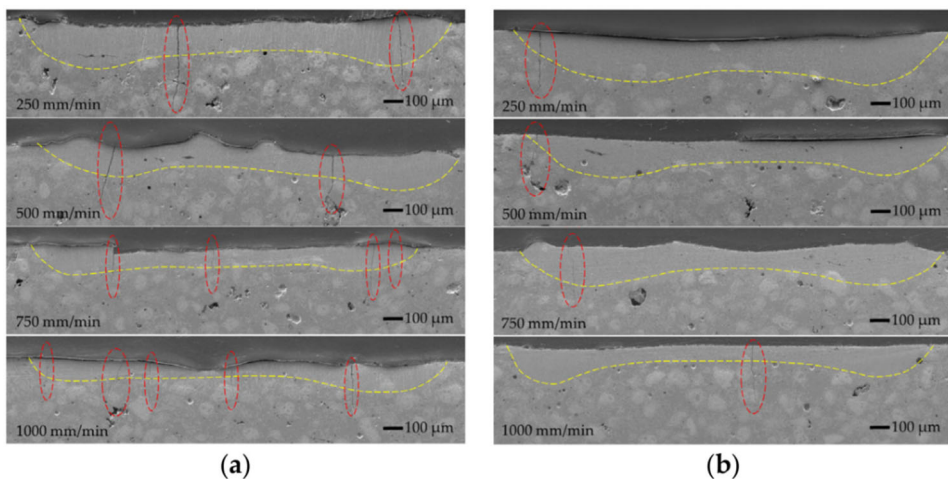
3.5 pav. Dangos perlydytų takelių, gautų be lazerio spindulio skersinių svyravimų ir be išankstinio pakaitinimo (a–d) ir su išankstiniu pakaitinimu (e–h), skerspjuvio skenuojamosios elektroninės mikroskopijos nuotraukos

Fig. 3.5. Cross-sectional SEM of non-oscillated molten pools obtained without (a–d) and with (e–h) preheating



3.6 pav. Dangos perlydytų takelių, gautų naudojant 1 mm skersinius lazerio spindulio svyravimus be išankstinio pakaitinimo (a) ir su išankstiniu pakaitinimu (b), skerspjūvio skenuojamosios elektroninės mikroskopijos nuotraukos

Fig. 3.6. Cross-sectional SEM of molten pools oscillated with 1 mm amplitude without (a) and with (b) preheating



3.7 pav. Dangos perlydytų takelių, gautų naudojant 2 mm lazerio spindulio skersinius svyravimus be išankstinio pakaitinimo (a) ir su išankstiniu pakaitinimu (b), skerspjūvio skenuojamosios elektroninės mikroskopijos nuotraukos

Fig. 3.7. Cross-sectional SEM micrographs of molten pools oscillated with 2 mm amplitude without (a) and with (b) preheating

Dangos lazerinio apdorojimo metu gauti perlydyto metalo takeliai, susidarantys nenaudojant lazerinio spindulio skersinių svyravimų, su išankstiniu pakaitinimu ir be jo, pavaizduoti 3.5 paveiksle.

Visi lazeriu apdoroti bandiniai be išankstinio pakaitinimo pasižymėjo pleišėjimu ir įtrūkių susidarymu (3.5–3.7 pav.). Lazeriu apdorotuose dangos sluoksniuose susidaro išilginiai ir skersiniai (takelio ašies atžvilgiu) trūkiai dėl trijų pagrindinių priežasčių: dėl intensyvaus vietinio suformuotos dangos paviršinio sluoksnio kaitinimo ir aušinimo proceso metale susidaro temperatūriniai įtempiai (Kadolkar et al., 2007); dėl to, kad perlydyto metalo mikrostruktūroje yra kietųjų trapių fazių, tokių kaip karbidai ir boridai (Liu et al., 2015); ir dėl to, kad dangos matricoje yra žemos lydymosi temperatūros fazių, tokių kaip Ni-B eutektika. Iš suvirinimo teorijos gerai žinoma, kad vietinis (netolygus) kaitinimas skatina liekamųjų tempimo įtempių (temperatūrinių įtempių) susidarymą, kurie didėja dangai auštant ir kietėjant metalui. Esant dideliems liekamiesiems įtempiams, žemą lydymosi temperatūrą turinčios trapios eutektinės fazės dėl jų riboto plastiškumo negali atlaikyti tempimo įtempių, esančių metale. Eutektinėms fazėms dar nesukietėjus, besikristalizuojančiame metale dėl liekamųjų įtempių susiformuoja trūkiai. NiCrCoFeCBSi/WC lydinių sistemose kietųjų ir eutektinių fazių buvimas dangos metale neišvengiamas. Todėl temperatūrinių įtempių mažinimas yra pagrindinis būdas sumažinti pleišėjimą lazeriu apdorotuose sluoksniuose. Skenuojamosios elektroninės mikroskopijos tyrimo rezultatai parodė, kad lazerio spindulio skersiniai svyravimai nepagerino sąlygų, o priešingai, įtrūkių skaičius išaugo didėjant išlydyto takelio pločiui. Kaip pastebėjo kiti autoriai (Farahmand et al., 2015, Guo et al., 2012, Hu et al., 2021, Shi et al., 2018, Xu et al., 2014, Zhou et al., 2008), iš anksto pakaitintuose bandiniuose temperatūros gradientas tarp išlydyto takelio ir šaltesnės bandinio dalies, stabdančios laisvą perlydyto takelio metalo susitraukimą jo kietėjimo metu, sumažėja, dėl to sumažėja ir temperatūriniai įtempiai, todėl lazeriu apdorotuose sluoksniuose atsiranda mažiau įtrūkių arba jų nebūna. Anksčiau minėtuose darbuose naudotos pakaitinimo temperatūros svyravo nuo 200 °C iki 1173 °C. Pateikti rezultatai taip pat parodė, kad pakaitinimas gali sumažinti perlydyto metalo kietumą, tai gali pabloginti suformuotos dangos atsparumą dilimui ir eksploatacinį resursą.

Kadangi aukštoje temperatūroje volframo karbidas skyla į volframą ir anglį, volframo karbido keraminės medžiagos dangoje rekomenduojama naudoti, kai gaminio darbinės temperatūros diapazonas yra iki 500 °C temperatūros. Aukštesnėje nei 500 °C temperatūroje volframo karbido keraminėje medžiagoje susidaro trapios fazės, kurios sumažina dangos atsparumą dilimui ir struktūrinį vientisumą. Esant 500–600 °C temperatūrai gali prasidėti volframo karbidų oksidacija.

Atsižvelgiant į kitų mokslininkų naudotą išankstinio pagrindo pakaitinimo temperatūrų diapazoną (200 °C–1173 °C) ir į volframo karbido keraminių dangų

darbinių temperatūrų diapazono rekomendacijas (iki 500 °C), šiame tyrime pasirinktos dvi pakaitinimo temperatūros – 200 °C ir 400 °C (3.8 pav.).



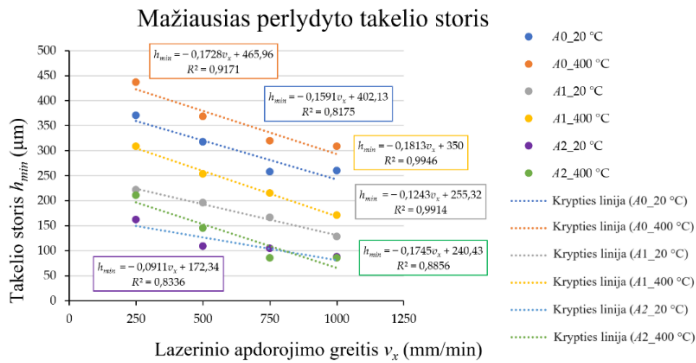
3.8 pav. Lazeriu apdorotų paviršiaus takelių nuotraukos: a) be išankstinio pagrindo pakaitinimo – 20 °C, b) su išankstiniu pagrindo pakaitinimu iki 200 °C, c) su išankstiniu pagrindo pakaitinimu iki 400 °C (be lazerio spindulio skersinių svyravimų – 0 mm, lazerinio apdorojimo greitis – 1000 mm/min)

Fig. 3.8. Photos of the tracks of the laser-treated surfaces: (a) without substrate preheating – 20 °C, (b) with substrate preheating up to 200 °C, and (c) and with substrate preheating up to 400 °C (without laser oscillation – 0 mm, laser processing speed – 1000 mm/min)

Nikelio pagrindo su 40 % volframo karbidais dangos lazerio apdorojimo metu naudojant 200 °C išankstinį substrato pakaitinimą perlydyto metalo sluoksnyje daugiausia susidarė skersiniai trūkiai, tačiau buvo pastebėta ir išilginių trūkių. Lyginant lazerinį apdorojimą be išankstinio substrato pakaitinimo (3.8 pav., a) su 200 °C išankstiniu substrato pakaitinimu (3.8 pav., b), galima pastebėti, kad substrato pakaitinimas iki 200 °C neleido efektyviai sumažinti dangos pleišėjimo, nors vyraujančių trūkių tipas (skersiniai arba išilginiai) pasikeitė, o jų kiekis šiek tiek sumažėjo. Ryškesnis ir matomas trūkių susidarymo sumažėjimas buvo pasiektas bandinius pakaitinus iki 400 °C temperatūros (3.8 pav., c).

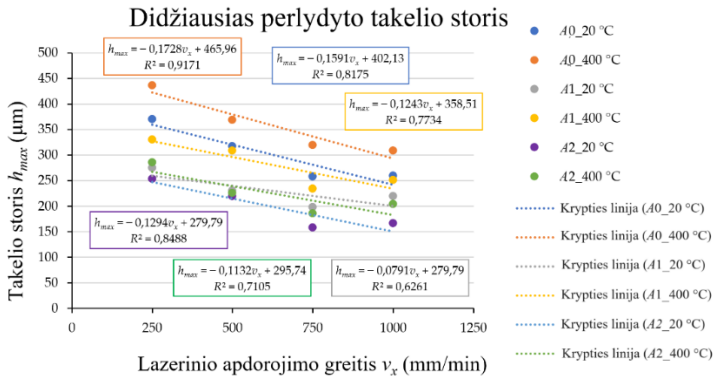
Sluoksniai be įtrūkių buvo gauti be lazerio spindulio skersinių svyravimų, o sluoksniuose, pagamintuose naudojant lazerio spindulio skersinius svyravimus, įtrūkių skaičius buvo žymiai mažesnis, ypač naudojant 1 mm dydžio lazerio spindulio skersinius svyravimus (3.5–3.7 pav.).

Lazerinis dangos apdorojimas, nenaudojant lazerio spindulio skersinių svyravimų ir be išankstinio pakaitinimo, esant mažiausiam lazerinio apdorojimo greičiui – 250 mm/min, pasižymėjo didžiausiu lazerio spindulio galios tankiu ir suformavo ~1155 μm pločio ir ~370 μm storio dangos perlydytą sluoksnį (3.9–3.11 pav.).



3.9 pav. Mažiausio dangos perlydytų takelių storio priklausomybės nuo lazerinio apdorojimo greičio, lazerio spindulio skersinių svyravimų amplitudės ir išankstinio pakaitinimo temperatūros; išlydytiems takeliams be skersinių svyravimų $h_{\min} = h_{\max}$; A0 – 0 mm skersiniai svyravimai; A1 – 1 mm skersiniai svyravimai; A2 – 2 mm skersiniai svyravimai

Fig. 3.9. Minimum depth of the molten pools in dependence on laser operating speed, applied oscillation amplitude and preheating temperature; for non-oscillated molten pools $h_{\min} = h_{\max}$; A0 – 0 mm oscillation amplitude (no oscillation); A1 – 1 mm oscillation amplitude; A2 – 2 mm oscillation amplitude

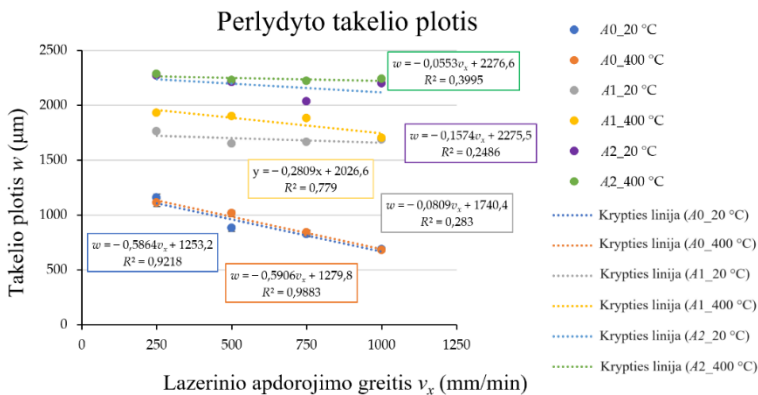


3.10 pav. Didžiausio dangos perlydytų takelių storio priklausomybės nuo lazerinio apdorojimo greičio, lazerio spindulio skersinių svyravimų amplitudės ir išankstinio pakaitinimo temperatūros; išlydytiems takeliams be skersinių svyravimų $h_{\min} = h_{\max}$; A0 – 0 mm skersiniai svyravimai; A1 – 1 mm skersiniai svyravimai; A2 – 2 mm skersiniai svyravimai

Fig. 3.10. Maximum depth of the molten pools in dependence on laser operating speed, applied oscillation amplitude and preheating temperature; for non-oscillated molten pools $h_{\min} = h_{\max}$; A0 – 0 mm oscillation amplitude (no oscillation); A1 – 1 mm oscillation amplitude; A2 – 2 mm oscillation amplitude

Padidinus lazerinio apdorojimo greitį iki 1000 mm/min, dangos metale išlydyto takelio plotis ir storis laipsniškai sumažėjo iki ~685 μm ir ~260 μm , tai yra atitinkamai ~41 % ir ~30 %.

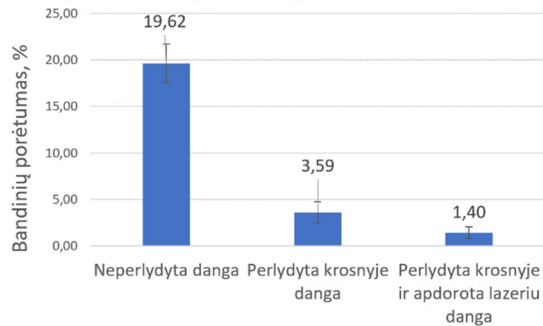
Ėmus taikyti lazerio spindulio skersinius svyravimus, kurių amplitudė lygi lazerio spindulio skersmeniui (1 mm) ir dvigubam lazerio spindulio skersmeniui (2 mm), išlydyto takelio plotis padidėjo atitinkamai ~1,5–2,5 ir 2–3,2 karto, o išlydyto takelio didžiausias storis (dėl lazerio galios tankio sklaidos) sumažėjo atitinkamai ~16–27 % ir ~31–39 % priklausomai nuo lazerinio apdorojimo greičio. Dangos išlydyto takelio centrinės dalies storis sumažėjo dar labiau – apie 3 kartus. Perlydyto metalo takelio geometrijos tyrimas taip pat parodė, kad tolygesnis lazerio galios tankio pasiskirstymas dangos išlydyto takelio skerspjūvyje (3.6 pav.) buvo pasiektas taikant 1 mm amplitudės skersinius svyravimus. Pastebėta, kad, padidinus lazerio spindulio skersinių svyravimų amplitudę iki 2 mm, didesnė lazerio galia susitelkia dangos perlydyto takelio pakraščiuose, kadangi lazerio spindulio skersinio svyravimo dažnis yra pastovus (120 Hz), o lazerio spindulio skersinių svyravimų amplitudė yra dvigubai didesnė (2 mm). Tokiu būdu yra suformuojamas nelygią formą ir nevienodą storį turintis perlydyto metalo takelis (3.7 pav.). Bandinių išankstinis pakaitinimas prieš apdorojimą lazeriu iki 400 °C temperatūros didelės įtakos išlydytų takelių pločiui neturėjo, tačiau lėmė išlydyto takelio storio padidėjimą iki ~40 %.



3.11 pav. Dangos perlydyto takelio pločio (matuojama plačiausioje takelio dalyje) priklausomybė nuo lazerio apdorojimo greičio, lazerio spindulio skersinių svyravimų ir išankstinio pakaitinimo temperatūros; A0 – 0 mm skersiniai svyravimai; A1 – 1 mm skersiniai svyravimai; A2 – 2 mm skersiniai svyravimai

Fig. 3.11. Width of the molten pool (measured in the widest part of the pool) in dependence on laser operating speed, applied oscillation amplitude and preheating temperature; A0 – 0 mm oscillation amplitude (no oscillation); A1 – 1 mm oscillation amplitude; A2 – 2 mm oscillation amplitude

Atliekant nikelio pagrindo su 40 % volframo karbidais užpurkštų, užpurkštų ir perlydytų elektrinėje krosnyje bei užpurkštų, perlydytų elektrinėje krosnyje ir apdorotų lazeriu dangų sandaros ir morfologijos tyrimą pastebėta, kad dangų perlydimas krosnyje sumažino dangos metalo porėtumą nuo ~19,6 % iki ~3,6 % (3.12 pav.).



3.12 pav. Bandinių porėtumo priklausomybė nuo apdorojimo būdo

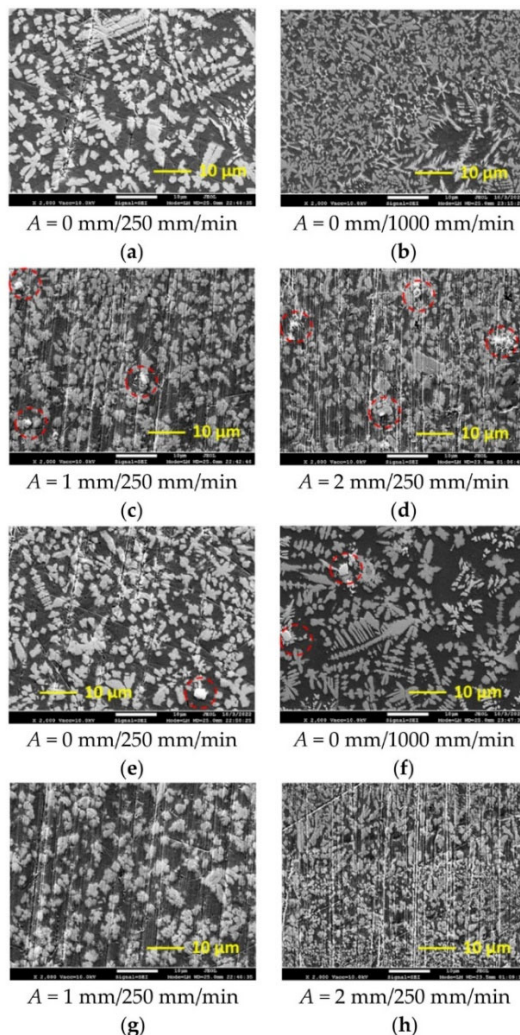
Fig. 3.12. Dependence of sample porosity on processing method

Papildomas užpurkštos ir perlydytos elektrinėje krosnyje dangos apdorojimas lazeriu dar labiau sutankino dangos metalą ir sumažino jo porėtumą iki ~1,4 %.

3.1.3. Lazeriu apdorotų dangų mikrostruktūros tyrimo rezultatai

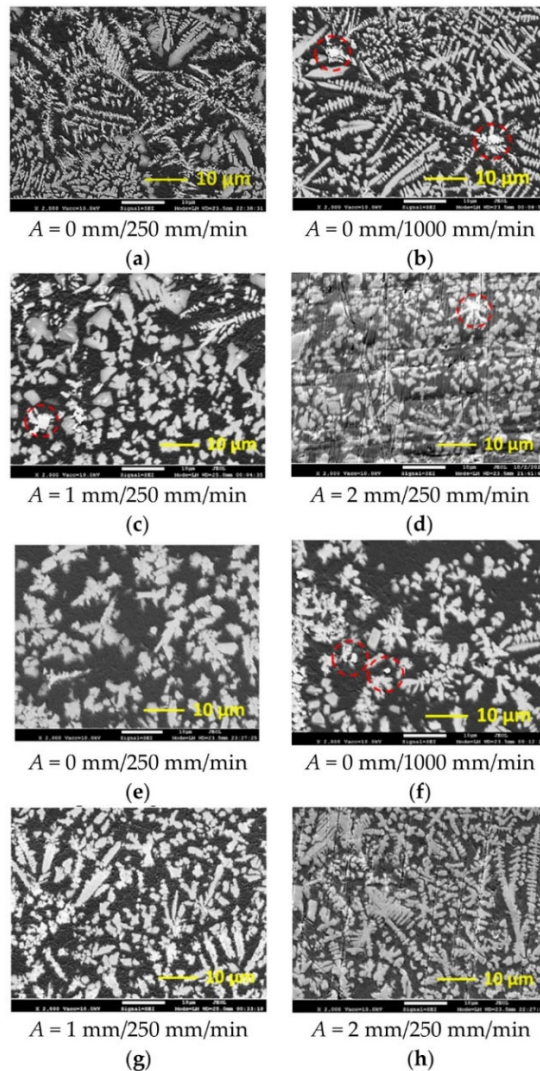
Lazeriu apdorotų sluoksnių mikrostruktūros formavimąsi lemia greiti dangos metalo aušinimo ir kietėjimo procesai, kurie paprastai suformuoja smulkią mikro- ir (arba) nanodydžio metalo mikrostruktūrą. Šiame tyrime taikomi nikelio pagrindo su volframo karbidais lazerinio apdorojimo parametrai taip pat leido suformuoti tolygią perlydyto metalo mikrostruktūrą (3.13 ir 3.14 pav.). Lazerinio apdorojimo metu dangos temperatūros gradientas G ir metalo kristalizacijos greitis R lydalo kietėjimo srityje lemia susikristalizavusio metalo mikrostruktūrą. Parametras GR (t. y. aušinimo greitis) lemia perlydyto metalo mikrostruktūros dalelių dydį, o santykis G/R lemia mikrostruktūros morfologiją. Kuo didesnis aušinimo greitis GR , t. y. kuo trumpesnis lydalo kietėjimo laikas, tuo smulkesnė susidaro perlydyto metalo mikrostruktūra. Yra žinoma, kad sumažėjus parametrai G/R , metalo sandara yra panašesnė į lygiaušio metalo mikrostruktūrą.

Metalo lydymosi procesui lazeriu paprastai būdingos didelės GR ir G/R parametų reikšmės. Todėl visi šio tyrimo metu lazeriu apdoroti bandiniai turėjo tolygią perlydyto metalo mikrostruktūrą (3.13 ir 3.14 pav.). Tačiau netolygus galios tankio pasiskirstymas lazerio spindulyje lemia netolygų dangos paviršiaus kaitinimą, o lazerio apdorojimo greičio kitimas keičia dangos lydalo aušinimo greitį.



3.13 pav. Dangos perlydytų takelių centrinių (a–d) ir kraštinių (e–h) dalių mikrostruktūra, gauta lazeriu apdorojant dangą be išankstinio pakaitinimo: (a), (b), (e) ir (f) – be skersinių svyravimų; (c) ir (g) – su 1 mm skersiniais svyravimais; (d) ir (h) – su 2 mm skersiniais svyravimais; raudonais apskritimais pažymėtos neištirpusios WC dalelės

Fig. 3.13. Microstructure of the middle (a–d) and edge parts (e–h) of the molten pools obtained by laser-remelting without preheating: (a), (b), (e) and (f) – without oscillation; (c) and (g) – with 1 mm oscillation amplitude; (d) and (h) – with 2 mm oscillation amplitude; with red circles the non-melted WC particles are marked



3.14 pav. Dangos perlydytų takelių centrinių (a–d) ir kraštinių (e–h) dalių mikrostruktūra, gauta lazeriu apdorojant dangą su išankstiniu pakaitinimu iki 400 °C: (a), (b), (e) ir (f) – be skersinių svyravimų; (c) ir (g) – su 1 mm skersiniais svyravimais; (d) ir (h) – su 2 mm skersiniais svyravimais; raudonais apskritimais pažymėtos neištirpusios WC dalelės

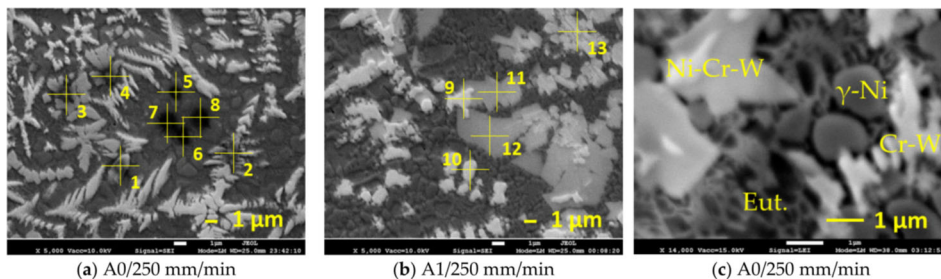
Fig. 3.14. Microstructure of central (a–d) and side parts (e–h) of the molten pools obtained by laser-remelting with preheating at 400 °C: (a), (b), (e) and (f) – without oscillation; (c) and (g) – with 1 mm oscillation amplitude; (d) and (h) – with 2 mm oscillation amplitude; with red circles the non-melted WC particles are marked

Pradėjus taikyti lazerio spindulio skersinius svyravimus, išlydyto metalo vonelės formavimosi greitis didėja dėl papildomo lazerio spindulio šoninio judėjimo. Bandinio išankstinis pakaitinimas sumažina G ir R reikšmes; todėl parametras GR turėtų sumažėti, o G/R santykio reikšmė priklauso nuo G ir R parametrų verčių. Dėl to skirtingomis sąlygomis lazeriu apdorotuose bandiniuose galima pastebėti suformuotos dangos perlydyto metalo mikrostruktūros morfologijos ir dydžio skirtumus. 3.13 paveiksle, a, e, pavaizduota dangos susikristalizavusio perlydyto takelio metalo smulki lygiaašė dendritinė mikrostruktūra, gauta naudojant 250 mm/min lazerio apdorojimo greitį, užtikrinanti didžiausią lazerio spindulio galios tankį į apdorojamąją dangą. Esant ilgesniam dangos kaitinimui ir mažesniam aušinimo greičiui, kurį užtikrina 250 mm/min lazerio apdorojimo greitis, buvo gauta labai panaši metalo mikrostruktūra perlydyto takelio centre ir kraštinėse dalyse; tačiau prie perlydyto takelio krašto galima pastebėti šiek tiek trumpesnius ir plonesnius dendritus (3.13 pav., e) bei nevisiškai ištirpusias volframo karbidų daleles. Tai gali būti susiję su žemesne metalo lydalo temperatūra ir greitesniu aušinimu žemiau temperatūros, kurioje gali vykti volframo karbidų tirpimas dangos metalo matricoje. Lazerio apdorojimo greičio padidinimas keturis kartus (iki 1000 mm/min) padidino GR parametro reikšmę ir lėmė mikrostruktūros smulkėjimą perlydyto takelio centre (3.13 pav., b). Esant tokiam lazerio apdorojimo greičiui, labiau matomas metalo kaitinimo ir kietėjimo proceso sąlygų skirtumas tarp perlydyto takelio centro ir kraštinių dalių (3.13 pav., b, f). Bandinių lazerinio apdorojimo metu, įvedus lazerio spindulio skersinį svyravimą, dangos lydalo vonelė įgyja papildomą šoninį judėjimą tam tikru greičiu, neskaitant pagrindinio takelio formavimo greičio apdorojimo kryptimi. Dėl to svyruojančios lydalo vonelės formavimo greitis yra didesnis nei nesvyruojančios vonelės greitis, t. y. R parametras turėtų padidėti. Dėl lazerio galios tankio persiskirstymo lydalo vonelės skerspjūvyje sumažėja lydymosi temperatūra, tai patvirtina ir nevisiškai ištirpusios W karbidų dalelės (3.13 pav., c, d). Kadangi šiuo atveju temperatūros skirtumas metale sumažėjo, G parametras turėtų taip pat sumažėti. Dėl to dangos metalo mikrostruktūros dedamųjų dydis perlydyto takelio centrinėje dalyje vizualiai nepasikeitė, lyginant su bandiniais, apdorotais be lazerio spindulio skersinių svyravimų. Perlydytos dangos metale nebuvo pastebėta pailgų dendritų, susidarę trumpi ir lygiašiai metalo dendritai. Tai gali būti susiję su lydalo maišymosi efektu, kurio metu vyksta dendritų suskaidymas, kuris susidarė dėl lazerio spindulio skersinių svyravimų. Taip pat reikia pažymėti, kad, esant 1 mm lazerio spindulio skersiniams svyravimams, perlydytame takelyje buvo gauta tolygesnė metalo mikrostruktūra, o, padidinus skersinius svyravimus iki 2 mm, padidėjo mikrostruktūros netolygumas.

Bandinių išankstinis pakaitinimas iki 400 °C temperatūros prieš apdorojimą lazeriu sumažino dangos temperatūros gradientą G . Atitinkamai sumažėjo tiek G/R , tiek GR parametrai. Iš anksto pakaitintuose, lazeriu apdorotuose bandiniuose

buvo pastebėti perlydyto metalo mikrostruktūros pokyčiai: susiformavo stambesnė ir labiau išsivysčiusi dendritinė morfologijos metalo sandara.

EDS mikroanalizė parodė, kad visi dangos bandiniai, gauti apdorojant lazeriu, turėjo panašią fazinę sudėtį (3.15 pav. ir 3.2 lentelė).



3.15 pav. Dangos perlydyto metalo mikrostruktūros SEM vaizdai, gauti atliekant lazerinį apdorojimą be skersinių svyravimų (a) ir su 1 mm skersiniais svyravimais (b), esant 250 mm/min lazerio greičiui; 1–13 – EDS analizės taškai (3.2 lentelė); (c) – padidintas mikrostruktūros vaizdas po ėsdinimo, kai matomos keturios pagrindinės struktūros sudedamosios dalys: γ -Ni – nikelio kietojo tirpalo grūdėliai; Eut. – eutektika;

Ni-Cr-W – Ni, Cr, W turintys karbidai; Cr-W – Cr, W turintys karbidai

Fig. 3.15. SEM images of the microstructure obtained without oscillation (a) and with oscillation amplitude $A = 1$ mm (b) at 250 mm/min laser speed; 1–13 – points of EDS analysis (Table 3); (c) – enlarged view of microstructure after etching showing four main constituents of the structure: γ -Ni – grains of nickel-based solid solution; Eut. – eutectic; Ni-Cr-W – Ni, Cr, W-rich carbides; Cr-W – Cr, W-rich carbides

3.2 lentelė. Elementinė fazių sudėtis lazeriu perlydytose dangose (EDS, masės %)

Table 3.2. Elemental composition of phases in laser-remelted coatings (by EDS, at. %)

Elementas	Cr gausi fazė				Ni, Cr gausi fazė					γ -Ni		Ni-B eutektika	
	T.1	T.2	T.9	T.10	T.3	T.4	T.11	T.12	T.13	T.5	T.6	T.7	T.8
B	8,59	6,52	0,20	3,00	5,06	8,89	7,35	1,71	13,69	5,34	3,46	18,28	17,04
C	46,47	50,65	57,80	57,78	36,35	34,77	38,78	38,19	38,66	20,80	20,88	19,32	20,14
Si	–	–	–	–	2,83	2,93	3,34	4,35	1,42	2,91	3,16	2,25	3,17
Cr	22,55	22,98	22,64	19,00	12,59	13,07	12,89	16,43	8,16	6,52	4,55	4,25	3,20
Fe	4,00	2,08	0,77	2,00	5,06	3,71	3,38	3,51	4,01	8,46	8,94	5,68	5,13
Co	2,14	0,36	0,26	0,94	3,93	3,17	3,03	3,26	3,07	6,10	6,21	5,21	5,01
Ni	2,69	1,86	1,43	1,72	26,16	25,54	21,57	23,59	19,29	48,82	51,62	44,65	46,06
W	13,55	15,55	19,94	18,39	8,03	7,93	9,67	8,96	11,71	1,06	1,18	0,36	0,24
Suma	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Metalo matricą sudarė γ -Ni kietasis tirpalas su jame ištirpusiais Co, Cr, Fe, Si, W elementais ir Ni-B-Si pagrindo eutektinė fazė, kurioje taip pat buvo šiek

tiek Co, Cr ir Fe elementų. Buvo nustatytos dviejų tipų kietosios fazės: Cr, W gausūs karbidai su didesne anglies koncentracija (kurie SEM vaizduose atrodo beveik balti (3.15 pav., a, b, 1, 2, 9, 10 taškai) ir Ni, Cr, W turintys karbidai su mažesne anglies koncentracija, taip pat turintys Co, Fe ir Si (kurie SEM vaizduose atrodo šviesiai pilki (3.15 pav., a, b, 3, 4, 11, 12 taškai).

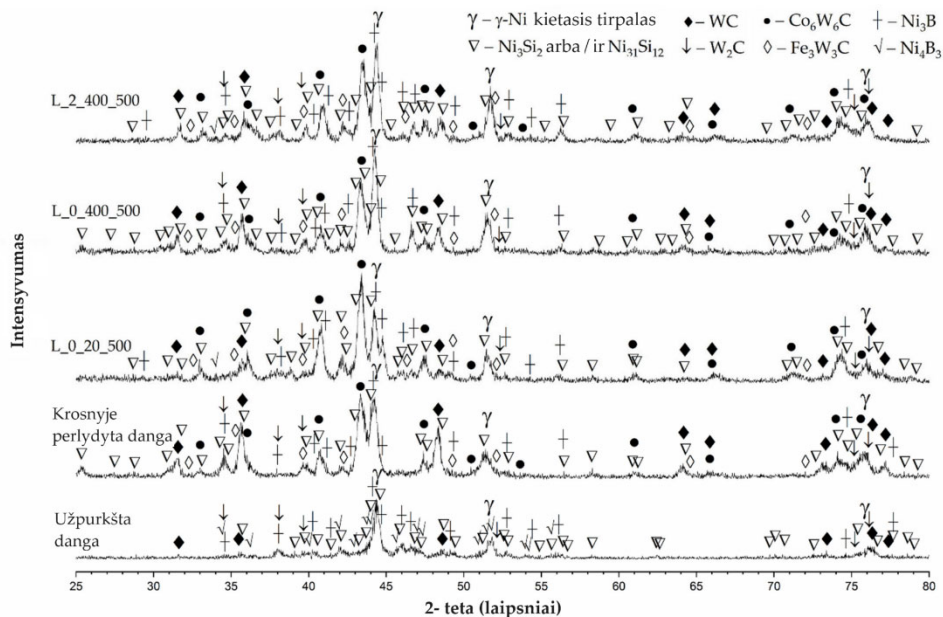
Be to, dangos metalo EDS mikroanalizės 13 taške metalinių elementų santykis skyrėsi nuo 3, 4, 11 ir 12 EDS taškų, o tai parodo, kad metalo mikrostruktūroje gali būti dar vieno tipo karbidas. Taip pat pažymėtina, kad lazeriu perlydytuose dangos sluoksniuose buvo pastebėti nevysišškai ištirpusių WC karbidų dalelių likučiai. Padidintas apdorotos lazeriu dangos metalo mikrostruktūros vaizdas parodė keturias pagrindines matomas metalo struktūros sudedamąsias dalis: γ -Ni kietojo tirpalo grūdelius (3.15 pav., c, „ γ -Ni“), tipiškos eutektinės morfologijos plotus (3.15 pav., c, „Eut.“) ir dviejų tipų kietuosius intarpus, greičiausiai karbidus (3.15 pav., c, „Ni-Cr-W“ ir „Cr-W“).

3.1.4. Lazerinio apdorojimo poveikis perlydytų dangų fazinei sudėčiai

3.16 paveiksle pavaizduotos užpurkštos nikelio pagrindo su volframo karbidais dangos, krosnyje perlydytos dangos ir lazeriu perlydytosios dangos rentgenografinės kreivės. Bandinys L_0_20_500 – perlydytas lazeriu be skersinių svyravimų ir be išankstinio pakaitinimo, lazerio apdorojimo greitis 500 mm/min; bandinys L_0_400_500 – perlydytas lazeriu be skersinių svyravimų ir su išankstiniu pakaitinimu iki 400 °C, lazerio apdorojimo greitis 500 mm/min; bandinys L_2_400_500 – perlydytas lazeriu, su 2 mm skersiniais svyravimais ir su išankstiniu pakaitinimu iki 400 °C, lazerio apdorojimo greitis yra 500 mm/min.

Remiantis rentgeno spindulių difrakcijos analizės rezultatais, pagrindiniai atspindžiai, pastebėti purškiamos nikelio pagrindo su 40 % volframo karbidais dangos rentgenografinėje diagramoje, yra priskiriami γ -Ni kietojo tirpalo fazei, turinčiai paviršiuje centruotą kubinę gardelę, kurios parametras $a = 3,545 \text{ \AA}$, ir volframo karbido fazei (W_2C) ir sudėtingai Ni-B-Si eutektikai. Eutektiką sudaro Ni_3B , Ni_4B_3 , Ni_3Si_2 ir $Ni_{31}Si_{12}$, kurie atitiko purškimui naudojamų miltelių mišinio fazinę sudėtį (Škamat et al., 2019). Reikėtų pažymėti, kad užpurkštos dangos rentgenografinių kreivių smailių intensyvumas buvo mažesnis, palyginti su smailėmis, esančiomis perlydytoje dangoje, o tai gali būti susiję su dideliu užpurkštos dangos porėtumu, susidariusiu purškimo metu. Žemos lydymosi temperatūros eutektinių fazių lydymosi procesas, dalinis W karbidų dalelių ištirpimas nikelio pagrindo matricoje ir WC rišiklio Co pagrindu įmaišymas į išlydytą Ni pagrindo takelį vyko perlydant krosnyje. Šiuo atveju dangos lydalo kristalizacijos proceso greitis buvo mažesnis nei dangos kietėjimo greitis terminio purškimo ir naudojamų Ni

pagrindų miltelių gamybos išpurškiant metu. Dėl to pasikeitė fazių sudėtis. Patebta papildomų intensyvių atspindžių, priskiriamų $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ tipo karbidui.



3.16 pav. Užpurkštos dangos, krosnyje perlydytos dangos ir lazeriu perlydytos dangos rentgenografinės kreivės

Fig. 3.16. X-ray curves of as-sprayed coatings, coating remelted in the furnace and laser post-processed coatings

Remiantis Calderon et al. (2019), šie papildomi intensyvūs atspindžiai būdingi WC-Co sistemoms ir gali būti susiję su padidėjusia kobalto koncentracija perlydytame metalė, nes ištirpsta WC dalelių rišiklis Co pagrindu. Be to, buvo pastebėti mažai intensyvūs atspindžiai $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, Ni_4B_3 , Ni_3B fazei būdingos smailės atspindžiai. SEM/EDS analizė atskleidė chromo karbidų buvimą krosnyje perlydytose dangose. Tačiau nebuvo pastebėta atspindžių, kurie galėtų būti priskirti šioms junginiams, o tai galima paaiškinti mažu jų kiekiu, kurio nepakako, kad būtų galima nustatyti rentgenografinės analizės metu. Lazeriu perlydytų dangų rentgenografinės kreivės reikšmingai nesiskyrė nuo krosnyje perlydytų dangų. Reikėtų atkreipti dėmesį į matomą pagrindinių atspindžių (2 teta kampai $\sim 35,9^\circ$, $\sim 48,7^\circ$ ir $\sim 73,4^\circ$) intensyvumo sumažėjimą, priskiriamą WC fazei. Tai galima paaiškinti dideliu WC dalelių ištirpimu, nes mikroskopinė analizė parodė tik labai nedaug stambių WC likučių lazeriu perlydytose dangose. Remiantis rentgenografine, SEM ir EDS analizių rezultatais, galima daryti prielaidą, kad kietieji

intarpai susidarė $M_{12}C$, M_6C , M_2C (kur M yra daugiausia Ni, Cr ir W) tipo karbidams kartu su W karbidų likučiais.

3.1.5. Lazериu apdorotų dangų paviršiaus šiurkščio matavimų ir paviršiaus topografijos tyrimo rezultatai

Siekiant sumažinti suformuotų nikelio pagrindo su volframo karbidais dangų mechaninio apdirbimo laiką ir sąnaudas bei parenkant metalo keraminių dangų formavimo technologiją, svarbu įvertinti lazerinio apdorojimo režimų parametrų įtaką perlydyto takelio paviršiaus reljefui ir mikronelygumams. Taikant įvairias MMK dangų technologijas visuomet yra siekiama suformuoti glotnesnius ir mažiausias didžiausių mikronelygumų reikšmes turinčius dangos paviršius. Formuojant tokio tipo dangas yra norima pasiekti glotnaus mechaninio apdirbimo (tekinimo arba frezavimo) šiurkščio parametrus ($Rz \sim 25\text{--}50 \mu\text{m}$).

Lazериu perlydytų takelių paviršiaus nelygumų gylio matavimų rezultatai pateikti 3.17 ir 3.18 paveiksluose, kuriuose galima matyti paviršiaus didžiausio nelygumų gylio priklausomybes nuo lazerinio apdorojimo greičio, substrato išankstinio pakaitinimo temperatūros ir lazerio spindulio skersinių svyravimų dydžio.

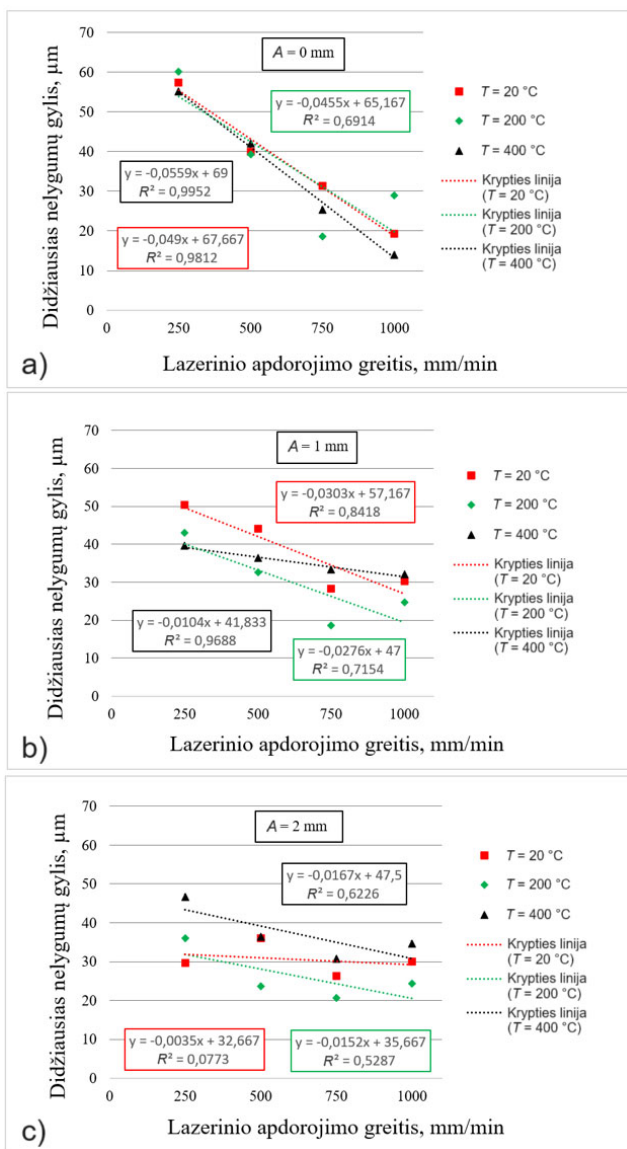
Lazериu apdorotų metalo keraminių dangų perlydyto takelio paviršiaus didžiausias nelygumų gylis mažėja, didinant lazerinio apdorojimo greitį ir perlydant dangą be skersinių lazerio spindulio svyravimų ir su jais 20°C temperatūroje ir su išankstiniu substrato pakaitinimu iki 400°C temperatūros (3.17 pav.). Didinant lazerinio apdorojimo greitį iki 750 mm/min , pastebėtas didžiausio nelygumų gylio akivaizdus mažėjimas. Padidinus lazerinio apdorojimo greitį iki 1000 mm/min be išankstinio pakaitinimo ir naudojant 200°C temperatūros išankstinį substrato pakaitinimą, buvo pastebėtas didžiausio nelygumų gylio nežymus padidėjimas. Esant 250 mm/min lazerinio apdorojimo greičiui, didžiausias nelygumų gylis gali būti siejamas su besikeičiančiu lydalo vonelės tūriu ir intensyviais skysto metalo tekėjimo procesais. Lazериu galia, tenkanti dangos ploto vienetui, yra didžiausia, kadangi lazerio spindulio galios pasiskirstymas nėra tolygus, didžiausias lazerio spindulio galios tankis yra pakankamai didelis, kad dalį vonelės lydalo išgarintų ir centrinėje vonelės dalyje susiformuotų kraterio formos vonelės paviršius. Lazериu apdorojimo metu apie garų susidarymą galima spręsti iš bandinių paviršiuje susidariusių nuosėdų, kurios greičiausiai susiformavo išgaravus, o vėliau dangos paviršiuje susikristalizavus daliai išlydytos dangos metalo. Esant didesniam lazerio spindulio galios tankiui ir mažesniai apdorojimo greičiui, dangos paviršiuje susidaro šlakas, nes aukštesnė įkaitinto metalo temperatūra lemia spartesnius silicio ir boro oksidų susidarymo procesus. Didinant lazerio apdorojimo greitį, mažėja lazerio galia, tenkanti dangos ploto vienetui, todėl išlydytos medžiagos išgarinama mažiau ir didžiausias nelygumų gylis taip pat mažėja. Iš tyrimo

rezultatų matyti, kad, esant 750 mm/min lazerinio apdorojimo greičiui, išgarinamas dangos kiekis turi minimalią įtaką dangos mikronelygumams. Toliau didinant lazerinio apdorojimo greitį, nelygumų gylis vėl didėja, nes išlydyto takelio storis stipriai mažėja ir pasiekiamą riba, kai ties išlydomos ar neišlydomos dangos riba esančios stambesnės mikrostruktūros fazės (neišlydytos ir neištirpusios volframo karbido dalelės) lemia ir didesnių nelygumų susidarymą apdorojamos dangos paviršiuje. Nelygumai lydalo vonelės dugne kuria turbulentinį skysčio judėjimą, o mažas lydalo tūris lemia greitą išlydyto dangos metalo kristalizaciją ir nehomogeniško perlydyto takelio paviršiaus formavimąsi. Apdorojant dangą lazeriu ir nenaudojant lazerio spindulio skersinių svyravimų, nebuvo pastebėtas perlydyto takelio paviršiaus nelygumų didėjimas, didinant išankstinio pakaitinimo temperatūrą dėl didesnio perlydyto metalo storio ir mažesnio dangos formuojamojo takelio pločio.

3.18 paveiksle matyti, kad, įvedant ir toliau didinant lazerio spindulio skersinius svyravimus, esant 20 °C temperatūrai ir 250 mm/min lazerio apdorojimo greičiui, perlydyto takelio didžiausias nelygumų gylis mažėja. Didinant lazerio spindulio skersinius svyravimus, mažėja įvedamoji lazerio galia, tenkanti dangos ploto vienetui, todėl perlydymo metu išgaruoja mažiau medžiagų, o cheminės oksidacijos reakcijos būna ne tokios aktyvios. Dangas apdorojant be išankstinio pakaitinimo ir esant 1000 mm/min lazerinio apdorojimo greičiui, lazerio spindulio skersiniai svyravimai padidina didžiausią nelygumų gylį, nes dėl didesnės lazerio spindulio skersinių svyravimų amplitudės susidaro plonesnis dangos lydalo sluoksnis.

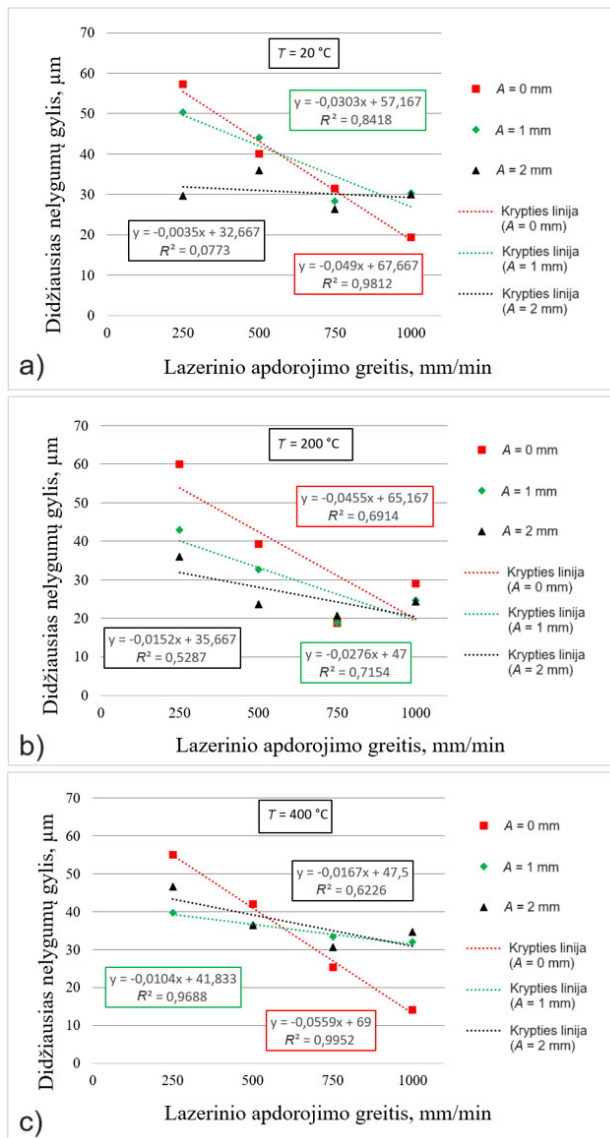
Lazerinio apdorojimo metu naudojant 200 °C išankstinio pakaitinimo temperatūrą ir įvedant bei toliau didinant skersinių svyravimų amplitudę, esant 250–500 mm/min lazerinio apdorojimo greičiams, matomas takelio nelygumų didžiausio gylio sumažėjimas. Esant 750 mm/min lazerinio apdorojimo greičiui, lazerio spindulio skersinių svyravimų dydis formuojamos dangos takelio paviršiaus mikronelygumams įtakos neturi. Taikant tokį lazerinio apdorojimo greitį, pasiekiamas minimalus metalo garavimo efektas ir gana didelis vonelės lydalo tūris, kad išlydytos dangos sulydymo linijos forma neturėtų įtakos.

Taikant 400 °C išankstinio pakaitinimo temperatūrą ir 250 mm/min bei 500 mm/min lazerinio apdorojimo greičius, lazerio spindulio skersinių svyravimų įvedimas sumažina takelio paviršiaus nelygumų gylį. Toliau didinant lazerinio apdorojimo greitį, dėl mažesnio išlydyto metalo sluoksnio storio didėja dangos paviršiaus nelygumai, atsirandantys dėl lazerio spindulio skersinių svyravimų.



3.17 pav. Lazериu perlydytų takelių didžiausio nelygumų gylio priklausomybė nuo lazerio apdorojimo greičio, taikant skirtingas išankstinio pakaitinimo temperatūras ir esant pastoviems lazerio spindulio skersiniams svyravimams: a) 0 mm; b) 1 mm; c) 2 mm

Fig. 3.17. Dependence of the maximum depth of irregularities of the laser remelted tracks on the laser remelting speed using different preheating temperatures and with constant oscillations of the laser beam: (a) 0 mm; (b) 1 mm; and (c) 2 mm



3.18 pav. Lazериu perlydytų takelių didžiausio nelygumų gylis priklausomybė nuo lazerio apdorojimo greičio, esant skirtingiems lazerio spindulio skersiniams svyravimams ir pastoviai išankstinio pakaitinimo temperatūrai: a) 20 °C; b) 200 °C; c) 400 °C

Fig. 3.18. Dependence of the maximum roughness depth of the laser remelted tracks on the laser remelting speed using different laser beam oscillations and at a constant preheating temperature: (a) 20 °C; (b) 200 °C; and (c) 400 °C

Esant 400 °C išankstinio pakaitinimo temperatūrai ir lazerinio spindulio 1 mm svyravimų amplitudei, pastebėta minimali dangos paviršiaus didžiausio nelygumų gylio kitimo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio, tai leidžia geriau užtikrinti nikelio pagrindo dangos su volframo karbidais lazerio apdorojimo poveikio dangos takelių nelygumams prognozavimą, o dangos paviršiaus didžiausių nelygumų reikšmių sklaida yra 30–40 μm dydžio. Tai atitinka glotnaus mechaninio apdirbimo (tekinimo arba frezavimo) šiurkščio parametrus.

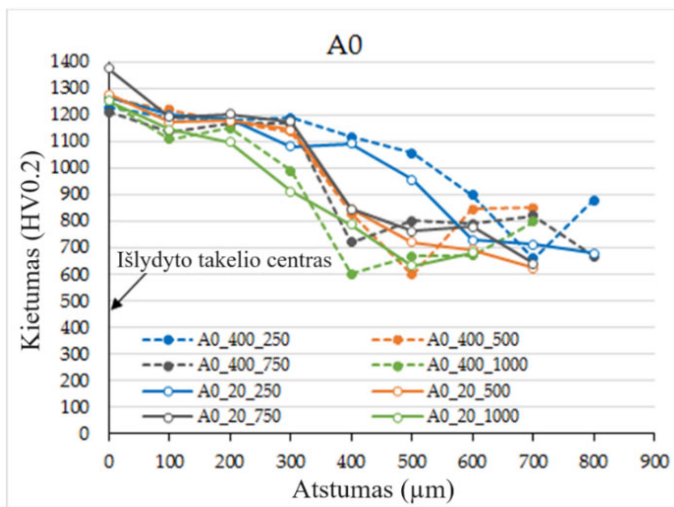
Temperatūros padidėjimas leido padidinti perlydytos dangos storį, dėl to stambios karbidų dalelės nepaveikė apdorojamo dangos paviršiaus. Tikėtina, kad jei ir toliau didintume lazerinio apdorojimo greitį, pasiekus kritinį vonelės storį, pastebėtume dangos paviršiaus nelygumų gylį padidėjimą.

3.1.6. Lazeriu apdorotų dangų metalo kietumo ir mikrokietumo tyrimo rezultatai

Tiriamųjų bandinių mikrokietumo tyrimo rezultatai pateikti 3.19–3.21 paveiksluose. Užpurkštos dangos metalo mikrokietumas nebuvo įvertintas dėl labai prastos dalelių sanglaudos, didelio dangos porėtumo ir labai didelio atskirų dalelių cheminės sudėties ir savybių nevienodumo. Perlydytų krosnyje dangų vidutinis mikrokietumas buvo ~670 HV_{0,2}, o atskiros vertės svyravo plačiame diapazone nuo 530 HV_{0,2} iki 810 HV_{0,2}. Tai susiję su netolygiu kietųjų fazių pasiskirstymu metalinėje dangos matricoje (mikromasteliu) ir jų dideliu dydžiu, lyginant su indentoriaus įspaudu. Perlydžius lazeriu, dangų mikrokietumas gerokai padidėjo: vidutinis lazeriu perlydytų dangų mikrokietumas, priklausomai nuo lazerinio apdorojimo režimo parametrų, svyravo nuo ~1030 HV_{0,2} iki ~1310 HV_{0,2}, o tai yra 54–96 % didesnis nei krosnyje perlydytų dangų mikrokietumas. Didžiausiu mikrokietumu (1170–1310 HV_{0,2}) pasižymėjo dangos, perlydytos nenaudojant lazerio spindulio skersinių svyravimų ir be išankstinio pakaitinimo. Iš anksto pakaitintus substratą iki 400 °C, mikrokietumas sumažėjo nežymiai (iki 1150–1230 HV_{0,2}). Įvedus lazerio spindulio skersinius svyravimus, buvo nustatytas papildomas mikrokietumo sumažėjimas, kurio negalima paaiškinti vien morfologiniu ir dangos metalo struktūros dedamųjų dydžio skirtumu. Atsižvelgiant į verčių sklaidą, ryškių mikrokietumo priklausomybių nuo lazerinio apdorojimo parametrų nebuvimą ir išlydyto takelio storio mažėjimą, naudojant skersinius svyravimus, galima teigti, kad WC dalelių koncentracija lazeriu perlydomame paviršiniame sluoksnyje gali lemti galutinį dangos metalo mikrokietumą. Nustatyta, kad krosnyje perlydytoje dangoje W karbidų pasiskirstymas submakroskopinėje skalėje yra vienodas, o mikroskopinėje skalėje jis nebuvo itin tolygus. Didėjant lazerinio apdorojimo metu išlydyto takelio tūriui, W karbidų pasiskirstymo poveikis tampa mažiau išreikštas, o, esant mažesniai ar seklesniai išlydytam takeliui,

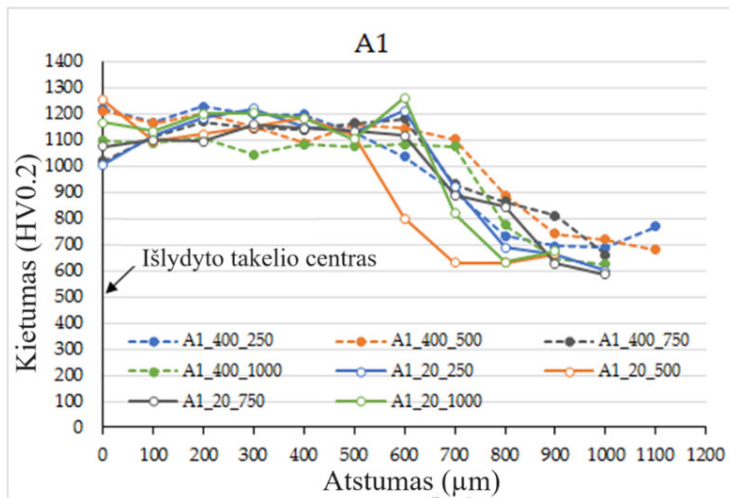
mikrokietai gali sumažėti arba padidėti. Tikėtina, kad, šiek tiek padidinus lazerio galią bei naudojant skersinius svyravimus, susidarytų gilesnis išlydytos dangos takelis su didesniu tūriu ir stabilesniu kietumu.

Lazeriu apdorotų bandinių mikrokietai pasiskirstymas buvo tiriama išlydyto takelio storio ir pločio kryptimi. Kaip matyti iš 3.19 paveikslo, nenaudojant lazerio spindulio skersinių svyravimų, išlydyto takelio mikrokietai buvo didžiausias viduryje ir mažėjo išlydyto takelio kraštų link. Perlydyti dangos takeliai, gauti naudojant lazerio spindulio skersinius svyravimus, pasižymėjo tolygesniu mikrokietai pasiskirstymu metale su nedideliu kietumo šuoliu kraštuose. Mažiau išreikštas kietumo šuolis, esant 1 mm skersiniams svyravimams, ir labiau išreikštas, esant 2 mm skersiniams svyravimams (3.20 ir 3.21 pav.), kuris gerai koreliuoja su lazerio galios tankio pasiskirstymu dangos paviršiuje, stebimas vertinant dangos lydalo vonelės formą. Esant 2 mm skersiniams lazerio spindulio svyravimams, stebimas labiau matomas vietinis mikrokietai kritimas (iki 900–950 HV_{0,2}), kuris gali būti susijęs su per mažu išlydyto takelio storio ir ryškesniu WC pasiskirstymo nevienodumo poveikiu.



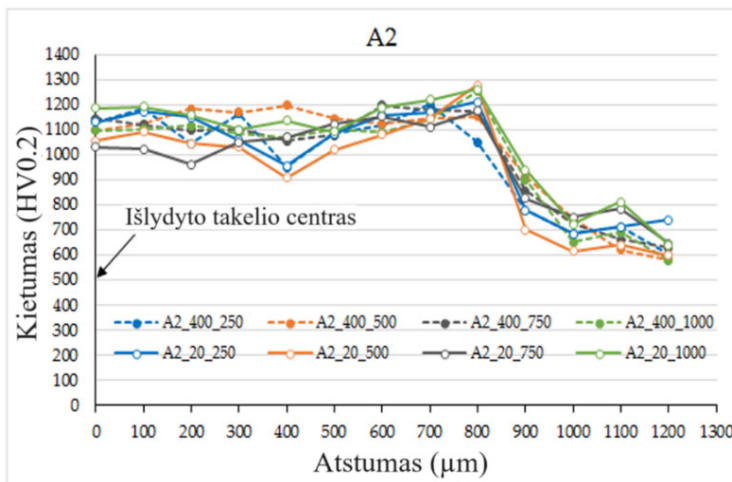
3.19 pav. Mikrokietai HV_{0,2} pasiskirstymas per perlydyto takelio plotį, naudojant lazerio spindulį be skersinių svyravimų

Fig. 3.19. Distribution of microhardness HV_{0.2} across the width of the molten pool without laser beam oscillation



3.20 pav. Mikrokietaumo HV0,2 pasiskirstymas per perlydyto takelio plotį, naudojant 1 mm lazerio spindulio skersinius svyravimus

Fig. 3.20. Distribution of microhardness HV0.2 across the width of the molten pool using 1 mm laser beam oscillation

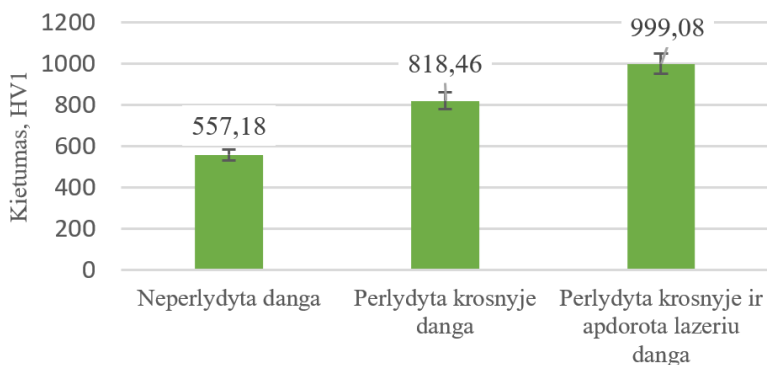


3.21 pav. Mikrokietaumo HV0,2 pasiskirstymas per perlydyto takelio plotį naudojant 2 mm lazerio spindulio skersinius svyravimus

Fig. 3.21. Distribution of microhardness HV0.2 across the width of the molten pool using 2 mm laser beam oscillation

Naudojant lazerio spindulio skersinius svyravimus dangos lazerinio apdorojimo metu ir gaunant platesnį (bet seklesnį) perlydytą takelį, taip pat atsižvelgiant į takelio formą, įtrūkių susidarymo galimybę ir mikrokietumo bandymų rezultatus (reikšmių pasiskirstymo vienodumą), galima pastebėti, kad, naudojant 1 mm skersinius lazerio spindulio svyravimus, 250–750 mm/min lazerinio apdorojimo greitį ir išankstinį pakaitinimą iki 400 °C, buvo gauti geriausi rezultatai: platus ~1880–1930 μm pločio perlydyti takeliai, dangos metalo mikrokietumas siekia nuo ~1100 HV0,2 iki 1200 HV0,2, gauti minimalūs įtrūkiai.

Siekiant įvertinti tiriamųjų metalo keraminių dangų kietumo charakteristiką, makrolygmenyje buvo atliktas kietumo tyrimas Vikerso būdu, naudojant 5 kartus didesnę 1000 g apkrovą. Dangos paviršiaus metalo kietumo bandymams buvo naudojami trijų tipų bandiniai: užpurkšti, užpurkšti ir perlydyti elektrinėje krosnyje ir užpurkšti, perlydyti elektrinėje krosnyje ir apdoroti lazeriu. Lazeriu apdoroti bandiniai buvo parinkti atsižvelgus į optimalius (įvertinus perlydyto dangos metalo pleišėjimo tikimybę, mikrokietumo pasiskirstymą takelio metale, perlydyto metalo takelio formą ir matmenis) lazerinio apdorojimo parametrus: lazerio spindulio skersiniai svyravimai 1 mm, lazerinio apdorojimo greitis – 500 mm/min, išankstinis pagrindo pakaitinimas – 400 °C. Kietumo matavimo rezultatai pateikti 3.22 paveiksle.



3.22 pav. Bandinių dangos paviršiaus kietumo tyrimo rezultatai
Fig. 3.22. Results of the surface hardness test of the coatings samples

Lazeriu apdorotų bandinių nikelio pagrindo su 40 % volframo karbidų dangos metalas buvo 79 % kietesnis, lyginant su tik terminiu būdu užpurkštos dangos metalu, ir 22 % kietesnis, lyginant su užpurkšta ir perlydyta krosnyje danga. Po perlydymo elektrinėje krosnyje dangos kietumas padidėjo dėl medžiagos tankio padidėjimo, porėtumo sumažėjimo ir perlydyto metalo fazinės sudėties pokyčio. Papildomas dangos perlydymas lazeriu dar labiau sumažino porų kiekį dangos

metale, o porėtumas sumažėjo iki $\sim 1,4\%$. Terminiu purškimu užpurkštos dangos papildomas apdorojimas lemia tolygesnę perlydyto metalo mikrostruktūrą – po perlydymo krosnyje volframo karbido dalelės yra iš dalies ištirpusios nikelio kietojo tirpalo matricioje, o perlydant lazeriu tos pačios karbidų dalelės yra praktiškai ištirpusios, dėl to susiformuoja smulkesnė struktūra, kuri lemia dar labiau homogenišką dangos sluoksnį su tolygiau pasiskirsčiusiais kietaisiais tarpais ($\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$, $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, M_2C , M_6C ir M_{12}C , kur M yra daugiausia Ni, Cr ir W).

3.1.7. Lazeriu apdorotų dangų tribologinių savybių tyrimo rezultatai

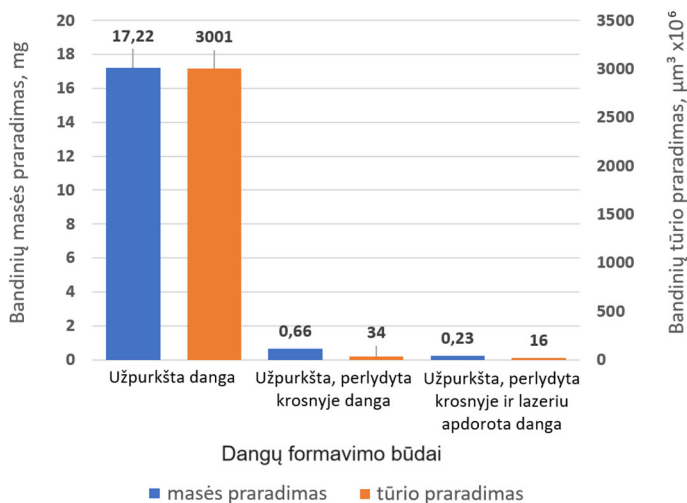
Tribologinis tyrimas sausomis slydimo sąlygomis buvo atliktas trimis bandinių serijoms – užpurkštomis dangoms, užpurkštomis ir krosnyje perlydytomis dangoms, užpurkštomis, krosnyje perlydytomis ir lazeriu apdorotoms dangoms. Buvo naudojama *ball on plate* bandymo schema. Tam, kad būtų pakankamai perlydyto dangos takelio paviršiaus ploto slydimo bandymui, buvo pasirinktos dangos, gautos naudojant 2 mm lazerio spindulio skersinius svyravimus. Buvo išbandyti bandiniai, kurie buvo perlydyti lazeriu 500 mm/min greičiu ir pasižymintys vidutiniu kietumu ($\sim 1150 \text{ HV}_{0,2}$). Tiriamųjų dangų sausojo slydimo bandymų rezultatai pateikti 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Sausojo slydimo tyrimų rezultatai

Table 3.3. Results of the dry sliding wear tests

Bandinys	Trinties koeficientas	Dangos masės praradimas, mg	Kontrakūno masės praradimas, mg	Dangos nusidėvėjimo greitis, $\mu\text{g}/\text{m}$	Dangos atsparumas dilimui, m/mg
Užpurkšta danga	$0,54 \pm 0,039$	$17,22 \pm 2,83$	$1,397 \pm 0,143$	$86,1 \pm 14,16$	$11,8 \pm 2,0$
Perlydyta krosnyje danga	$0,42 \pm 0,016$	$0,663 \pm 0,006$	$0,403 \pm 0,138$	$3,32 \pm 0,029$	$301,5 \pm 2,61$
Perlydyta lazeriu danga su išankstiniu pakaitinimu	$0,33 \pm 0,028$	$0,233 \pm 0,025$	$0,367 \pm 0,083$	$1,17 \pm 0,126$	$863,7 \pm 91,7$

Siekiant tiksliau įvertinti dangų nusidėvėjimą bandymo metu, bandinių nusidėvėjimas buvo vertinamas atsižvelgiant į bandinių masės praradimą ir tūrio praradimą. Tiriamųjų bandinių tūrio praradimas buvo vertinamas pagal dangos paviršiuje esančio išdilusio pėdsako plotą. Analizuojant tiriamųjų bandinių masės ir tūrio praradimų reikšmes galima pastebėti, kad tikslesnis yra masės praradimo vertinimo metodas (3.23 pav.). Tai galima paaiškinti išdilusio pėdsako ploto matavimo paklaida, kuri atsiranda dėl to, kad pėdsako profilis buvo matuotas tik keturiuose statmenuose pjūviuose, nors lazeriu apdorotų bandinių abiejų nusidėvėjimo vertinimo variantų rezultatai koreliuoja gan gerai. Dangos nusidėvėjimo greitis buvo apskaičiuotas, bandinių masės pokytį dalinant iš bandymo slydimo kelio. Nusidėvėjimo greičiui atvirkštinė charakteristika yra dangos atsparumas dilimui.

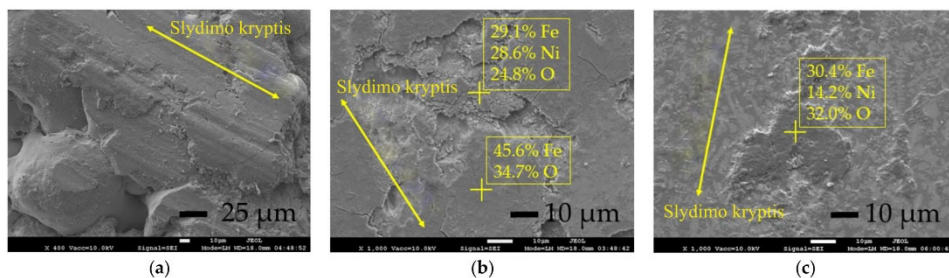


3.23 pav. Bandinių masės ir lazeriu perlydytų takelių tūrio išdilimo rezultatai

Fig. 3.23. Mass of samples and volume wear results of laser-remelted tracks

Tiriamųjų bandinių dviejų kūnų sausojo slydimo bandymų nusidėvėjimo pėdsakų vaizdai pateikti 3.24 paveiksle. Kaip matyti iš 3.24 paveikslo, a, bandymo metu įvyko gausus tik užpurkštos dangos paviršiaus sluoksnių atskirų dalių atsiluoksniavimas, kurį iš anksto nulėmė prastas dangos dalelių sukibimas (kohezija), dėl to smarkiai sumažėjo bandinių masė ir padidėjo dangos trinties koeficientas. Po perlydymo krosnyje buvo pagerintas dangos dalelių sukibimas, padidėjo perlydyto metalo kietumas ir gautas vientisos sandaros dangos sluoksnis. Todėl dangos bandinių masės nuostoliai ir trinties koeficientas smarkiai sumažėjo atitinkamai ~26 kartus ir ~22 %, o dangos metalo nusidėvėjimo mechanizmas pasikeitė.

Iš 3.24 paveikslo, b, galima matyti, kad sausojo slydimo bandymo pėdsako paviršiuje buvo trapios dangos metalo trupėjimo požymių (susijusių su netolygiu kietųjų fazių pasiskirstymu, pasireiškusiu jų sankauptų srityse), o lygiame ploname sluoksnyje matėsi metalo įtrūkiai ir delaminacija. Remiantis EDS analize, dangos paviršinį sluoksnį sudarė geležies oksidas: 45,6 masės % Fe ir 34,7 masės % O. Dangos bandinio pėdsako paviršiuje esančiuose nusidėvėjimo produktuose taip pat padidėjo Fe ir O koncentracija. Taigi galima daryti prielaidą, kad slydimo bandymo metu dangos paviršiuje daugiausia susikaupė kontrakūno (plieninio rutulio) nusidėvėjimo produktai, kurie vėliau buvo pakartotinai plastiškai deformuoti, suformavo trapų metalo sluoksnį ir galiausiai šis trapus metalo sluoksnis dalimis atsislukošniavo. Po šio dangos paviršiaus sluoksnio atsislukošniavimo susidarė nelygus dangos paviršius.



3.24 pav. Sausojo slydimo bandymų pėdsakų SEM vaizdai: užpurkštų dangų (a), užpurkštų ir perlydytų krosnyje (b) ir lazeriu apdorotų (c), elementų koncentracijos pažymėtuose taškuose pateiktos masės % (pagal EDS)

Fig. 3.24. SEM images of wear tracks after two body dry sliding tests of as-sprayed (a), sprayed and remelted in the furnace (b) and laser processed (c) coatings: the concentrations of elements in marked points are given in wt. % (by EDS)

Papildomas dangos perlydimas lazeriu suformavo itin smulkią mikrostruktūrą ir padidino kietumą ~72 %. Dėl to dangos atsparumas sausajam slydimo dilimui padidėjo ~2,9 karto, o trinties koeficientas sumažėjo ~1,3 karto. Lazeriu apdorotos dangos bandinio nusidėvėjimo pėdsako paviršius buvo labai lygus, jame buvo nusidėvėjimo produktų, daugiausia sudarytų iš geležies oksidų, tačiau nepastebėta dangos metalo ištrupėjimo požymių. Tai susiję su tolygesniu kietųjų in-tarpų ($\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$, $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, M_2C , M_6C ir M_{12}C , kur M yra daugiausia Ni, Cr ir W), įsiterpusių į dangos metalo nikelio matricą, pasiskirstymu (3.24 pav., c). Nustatyta, kad šiuo atveju dangos nusidėvėjimo procesas buvo labai tolygus, neprarandant stambių dangos dalelių. Tokį apdorotos lazeriu dangos nusidėvėjimo mechanizmą patvirtino ir sumažėjęs bandinių masės nuostolis bei mažesnis perlydytos dangos trinties koeficientas.

3.1.8. Kompozicinių dangų abrazyvinio dilimo bandymo rezultatai

Tyrimo metu, įvertinus lazerio poveikį purkštinių su vėlesniu perlydymu krosnyje Ni-WC dangų apdoroto metalo struktūrai, kietumui ir mikrokietumui, takelių formai, matmenims ir paviršiaus nelygumams, buvo pagaminti geriausio kokybinių parametrų derinio kompozicinių (taikant apdorojimą lazeriu takeliais) apsauginių MMK dangų bandiniai, kurių eksploatacinės savybės (atsparumas abrazyviniam dilimui, elektrocheminei korozijai ir aukštatemperatūrei oksidacijai) buvo ištirtos. Vertinant skirtingų eksperimentinių bandymų rezultatus, buvo nustatytas geriausias Ni-WC metalo keraminių dangų lazerinio apdorojimo kokybinių parametrų derinys, kuris leido užtikrinti plačius ir vienodo storio perlydyto metalo takelius su gana plokščiu dugnu (takelio formos koeficientas yra $\sim 6,7$), su vienoda mikrostruktūra, didesniu struktūriniu vientisumu, su vienodu mikrokietumo pasiskirstymu (apie 1200 HV0,2) apdoroto metalo takelyje, su nedideliais takelio paviršiaus mikronelygumais ($\sim 32\text{--}40\text{ }\mu\text{m}$): lazerinio apdorojimo greitis – 500 mm/min, lazerio spindulio skersiniai svyravimai – 1 mm, išankstinio pakaitinimo temperatūra – 400 °C. Anksčiau atlikti tyrimai (Bartkowski et al., 2021, Karmakar et al., 2021, Škamat et al., 2019, Guo et al., 2018, Farahmand et al., 2014) parodė, kad, atliekant ištisinį lazerinį apdorojimą (lazerinį aplydymą / perlydymą), o ypač naudojant volframo karbidus, dangos metale sunku išvengti kieto suformuoto dangos sluoksnio pleišėjimo netgi naudojant išankstinį substrato pakaitinimą. Metalų keraminės dangos pleišėjimo tikimybę galima sumažinti atliekant ne ištisinį suformuotos dangos lazerinį apdorojimą, o apdorojimą takeliais, keičiant kiekvieno takelio apdorojimo kryptį (Xu et al., 2021) ir taikant substrato pakaitinimą (Zhou et al., 2008). Ni-WC metalo keraminės dangas apdorojant lazeriu atskirais takeliais ir parenkant skenavimo žingsnį (atstumas tarp takelių centrų), būtina įvertinti formuojamos dangos terminius liekamuosius įtempius, dangos standumą (pasipriešinimas išoriniam poveikiui) ir eksploatacinį resursą. Mažinant lazerinio apdorojimo skenavimo žingsnį yra didinamas dangos apdoroto metalo plotas ir eksploatacinis resursas, bet kartu yra stipriai didinama kieto dangos metalo pleišėjimo tikimybė ir mažinamas proceso našumas. Buvo nustatyta, kad, atliekant metalų lazerinį apdorojimą takeliais ir mažinant skenavimo žingsnį (skenavimo žingsnis mažesnis nei apdoroto takelio plotis), labai mažai didėja suformuoto sluoksnio standumas, todėl tai nėra efektyvu (Kapustynskyi, 2023). Įvertinus anksčiau atliktus tyrimus, Ni-WC metalo keraminių dangų lazeriniam apdorojimui takeliais, keičiant kiekvieno takelio apdorojimo kryptį, buvo parinktas 3,3 mm skenavimo žingsnis, kuris, esant 500 mm/min lazerinio apdorojimo greičiui, 1 mm lazerio spindulio skersiniams svyravimams ir 400 °C išankstinio pakaitinimo temperatūrai, leidžia užtikrinti apie 57 % bandinio paviršiaus apdorojimą lazeriu.

Dangų atsparumo abrazyviniam dilimui bandymai buvo atlikti diskinėje trinties mašinoje trims bandinių serijoms – užpurkštoms dangoms, užpurkštoms ir

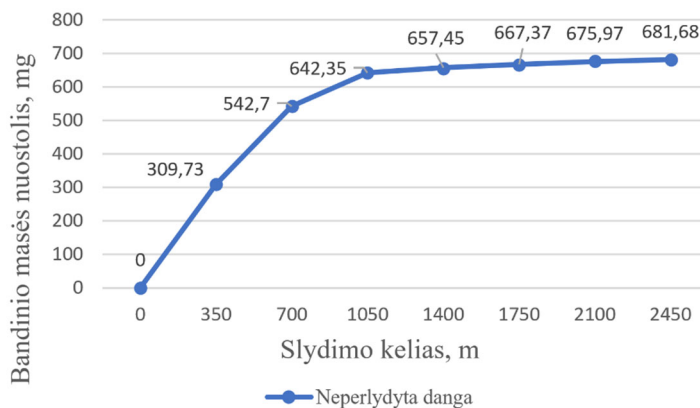
krosnyje perlydytoms dangoms, užpurkštoms, krosnyje perlydytoms ir lazeriu apdorotoms dangoms (lazerinio apdorojimo greitis – 500 mm/min, lazerio spindulio skersiniai svyravimai – 1 mm, skenavimo žingsnis – 3,3 mm, išankstinio pakaitinimo temperatūra – 400 °C). Rezultatai pateikti 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. Dangų atsparumo abrazyviniam dilimui tyrimo rezultatai

Table 3.4. Results of the research of resistance to abrasive wear of coatings

Bandinys	Bandinio masės nuostolis (slydimo kelias 2450 m), mg	Dangos dilimo greitis, $\mu\text{g}/\text{m}$	Dangos atsparumas dilimui, m/mg
Neperlydyta danga	681,68 $\pm$ 99,59	278,24 $\pm$ 40,65	3,63 $\pm$ 0,53
Perlydyta krosnyje danga	9,71 $\pm$ 0,68	3,96 $\pm$ 0,28	252,94 $\pm$ 17,68
Perlydyta krosnyje ir apdorota lazeriu danga	4,98 $\pm$ 0,48	2,03 $\pm$ 0,20	494,27 $\pm$ 47,72

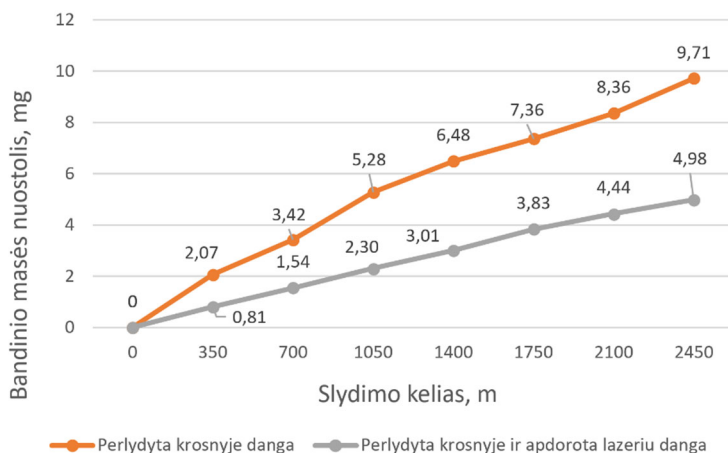
Užpurkštos dangos bandinio didžiausias masės nuostolis įvyko per pirmuosius 1000 abrazyvinio slydimo kelio metrų (3.25 pav.).



3.25 pav. Užpurkštų dangų atsparumo abrazyviniam dilimui tyrimo rezultatai

Fig. 3.25. Research results of the resistance to abrasive wear of sprayed coatings

Kaip matyti iš anksčiau atliktų užpurkštos dangos morfologijos ir sandaros SEM tyrimų (3.1 pav.), užpurkštos dangos paviršinis sluoksnis turi didelį nevienetisumą ir porų kiekį, o giliau esantis sulydymo linijos srities dangos sluoksnis yra tankesnis. Esant abrazyvinei trinčiai, nudilusios dangos dalelės veikia kaip papildomas bandymo abrazyvas ir dėl to prasideda spartus dangos nusidėvėjimas. Bandymo metu per pirmuosius 1000 metrų abrazyvinio slydimo kelio išdilo apie 51 % pradinio dangos storio, arba apie 410 μm . Antrame bandymo etape (nuo 1000 abrazyvinio slydimo metrų) matyti mažesnis bandinio dangos masės praradimas, t. y. dangos masės praradimo procesas stabilizavosi.

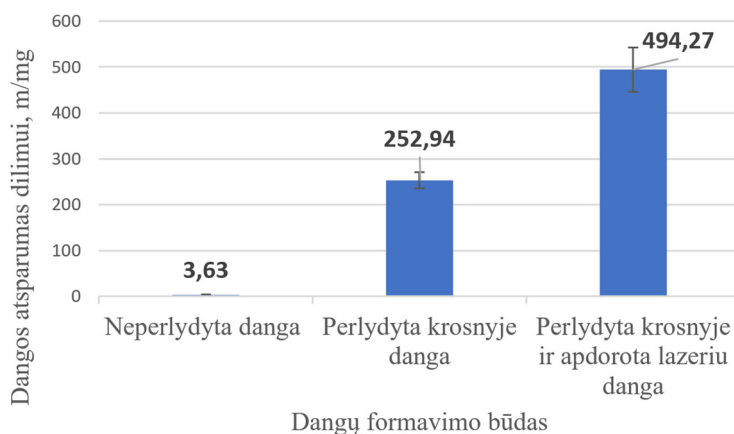


3.26 pav. Perlydytų krosnyje ir perlydytų krosnyje bei lazeriu apdorotų dangų atsparumo abrazyviniam dilimui tyrimo rezultatai

Fig. 3.26. Abrasive wear test results of furnace remelted, and furnace remelted, and laser-processed coatings

Analizuoiant perlydytos krosnyje dangos ir perlydytos krosnyje bei apdorotos lazeriu dangos abrazyvinio dilimo rezultatus (3.26 pav.), galima pastebėti, kad abiejų bandinių masės nuostolis didėja tolygiai, tačiau jo prieaugis yra žymiai mažesnis, lyginant tik su užpurkštos dangos bandinių nuostolio didėjimu (3.25 pav.). Tai rodo, kad šios abi dangos turi labai didelį atsparumą abrazyviniam dilimui, lyginant su užpurkšta danga, o tokių dangų eksploatacinis resursas yra lengviau prognozuojamas ir apskaičiuojamas dėl tolygaus dangos nusidėvėjimo proceso. Tačiau iš 3.26 grafiko galima pastebėti, kad užpurkšta ir krosnyje perlydyta danga turi beveik dvigubai (1,95 karto) didesnius masės nuostolius, lyginant su kompozicine perlydyta krosnyje ir lazeriu apdorota danga.

Tiek abrazyvinio dilimo bandymų rezultatai, tiek ir sausojo slydimo bandymų tyrimo rezultatai parodė analogišką skirtingai apdorotų dangų atsparumo dilimui didėjimo tendenciją, t. y. dangų atsparumas dilimui priklauso nuo smulkesnės ir labiau homogeniškos perlydyto metalo mikrostruktūros formavimo, kietųjų in-tarpų ($\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$, $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, M_2C , M_6C ir M_{12}C , kur M yra daugiausia Ni, Cr ir W) atsiradimo apdoroto takelio metale ir nuo dangos kietumo charakteristikos. Lyginant abrazyvinio dilimo bandymų ir sausojo slydimo tyrimo rezultatus (3.3 lentelė ir 3.27 pav.) su dangos paviršiaus kietumo matavimų metu gautomis reikšmėmis (3.22 pav.), matyti, kad, didėjant dangų paviršiaus kietumui, proporcingai didėja ir atsparumas dilimui.



3.27 pav. Bandinių atsparumo abrazyviniam dilimui tyrimo rezultatai
Fig. 3.27. Results of the test of wear resistance of the samples

Tai gali būti siejama su dangos sutankėjimu ir porėtumo sumažėjimu po perlydymo elektrinėje krosnyje ir po lazerinio apdorojimo, kurio metu stambūs volframo karbidai iš dalies arba visiškai ištirpo ir susiformavo smulki dangos metalo mikrostruktūra su tolygiai pasiskirsčiusiais kompleksiniais karbidais. Taikant kombinuotą dangų technologiją, dangų kietumas buvo padidintas apie 79 %, o tai leido padidinti atsparumą abrazyviniam dilimui net apie 136 kartus, lyginant su tik užpurkšta danga, ir apie 2 kartus, lyginant su užpurkšta ir krosnyje perlydyta danga.

3.1.9. Kompozicinių dangų korozinio atsparumo analizė

Terminiškai užpurkštų metalo keraminių dangų atsparumas korozijai priklauso nuo metalinės dangos matricos legiravimo elementų kompozicijos. Tiriamųjų

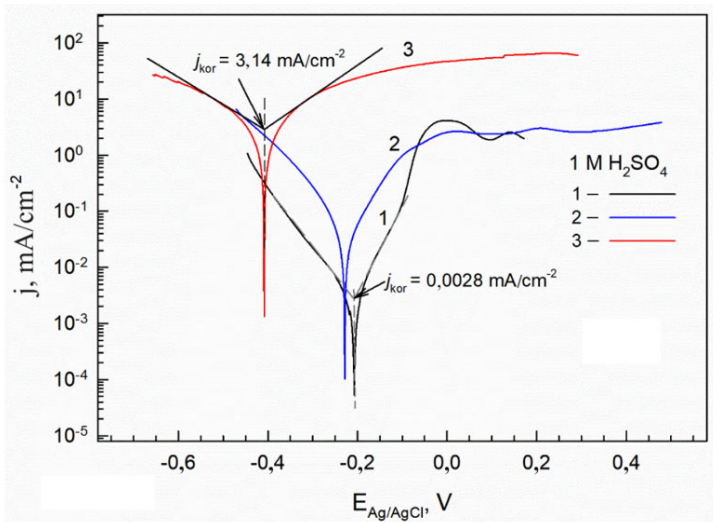
NiCrCoFeCBSi pagrindo su volframo karbidine keramika dangų atsparumą korozijai daugiausia užtikrina Ni buvimas ir jo kiekis dangos metalinėje matricoje. Nikelio atsparumas korozijai yra susijęs su plono įvairių tipų nikelio oksidų sluoksnio susidarymu, kuris veikia kaip kliūtis, apsauganti nuo tolesnės korozijos. Ploni, įvairių tipų metalo oksidai sudaro sluoksnį, kuris apsaugo dangą nuo korozijos. Eksperimentų metu suformuotos metalo keraminės kompozicinės dangos buvo perlydytos elektrinėje krosnyje ir apdorotos lazeriu. Siekiant patikrinti, ar skirtingi tiriamųjų dangų technologijos etapai neturi neigiamo poveikio antikorozinėms dangų savybėms, buvo atlikti potenciodinaminės poliarizacijos matavimai. Šie matavimai atlikti 1M H₂SO₄ tirpale su trijų tipų bandiniais: terminiu purškimu užpurkštais; terminiu purškimu užpurkštais ir perlydytais elektrinėje krosnyje bei terminiu purškimu užpurkštais, perlydytais elektrinėje krosnyje ir apdorotais lazeriu (lazerio spindulio skersiniai svyravimai – 1 mm, lazerinio apdorojimo greitis – 500 mm/min, lazerinio skenavimo žingsnis – 3,3 mm). Tiriamųjų dangų antikorozinių tyrimų rezultatai su Tafelio priklausomybėmis pateikti 3.28 paveiksle.

Elektrinėje krosnyje perlydytos bandinio dangos poliarizacijos kreivės smailė susidarė, esant –0,228 V potencialui (3.28 pav., 2 kreivė), o tik užpurkštos dangos, esant –0,408 V potencialui (3.28 pav., 3 kreivė). Šiame taške prasidėjo aktyvaus tirpimo stadija, t. y. staigiai pradėjo didėti anodinė srovė. Tolimesnis potencialo didinimas praktiškai neturi įtakos korozijos srovei. Ji nustoja didėti, o dangos paviršius pereina į pasyvią būseną. Elektrinėje krosnyje perlydytos ir lazeriu apdorotos bandinio dangos poliarizacijos kreivės forma skiriasi nuo kitų bandinių kreivių formų. Apibendrinant, galima teigti, kad lazerinis dangos apdorojimas turi įtakos MMK dangų korozijos proceso pobūdžiui. Šiuo atveju, didinant potencialą, staigiai didėja anodinė srovė (3.28 pav., 1 kreivė). Toliau didinant potencialą, anodinė srovė įgauna mažėjančios amplitudės bangavimą. Tokios netipinės poliarizacijos kreivės susidarymo priežastims nustatyti reikėtų atlikti išsamesnius korozijos procesų tyrimus.

Užpurkštos nikelio pagrindo dangos su volframo karbidine keramika perlydymas elektrinėje krosnyje padidino dangos korozinį potencialą ir sumažino korozinės srovės tankį nuo 3,14 mA/cm⁻² iki 0,0449 mA/cm⁻². Papildomas perlydymas lazeriu dar šiek tiek padidino dangos atsparumą korozijai ir sumažino korozinės srovės tankį iki 0,0028 mA/cm⁻². Iš 3.5 lentelės duomenų galima pastebėti, kad bandiniai, kurie buvo perlydyti elektrinėje krosnyje ir apdoroti lazeriu, turėjo ne tik mažesnę korozinės srovės tankį, bet ir mažesnę masės nuostolį, kuris siekė tik 0,06 mg.

Atliekant tiriamųjų dangų antikorozinių savybių tyrimą 1M H₂SO₄ tirpale ir lyginant bandinių korozinį atsparumą, nustatyta, kad taikant svorio pokyčio metodą galima pastebėti, jog užpurkštų dangų perlydymas elektrinėje krosnyje dėl

mažiau porėtos ir labiau homogeniškos dangos struktūros sumažino bandinio masės nuostolį apie 272 kartus, o papildomas apdorojimas lazeriu šiek tiek padidino masės nuostolius (3.5 lentelė).



3.28 pav. Elektrodų Tafelio priklausomybės (1M H₂SO₄ terpė): 1 – užpurkšta, perlydyta krosnyje ir apdorota lazeriu danga; 2 – užpurkšta ir perlydyta krosnyje danga; 3 – užpurkšta danga

Fig. 3.28. Tafel dependences of electrodes (1M H₂SO₄ solution): 1 – sprayed, remelted in the furnace and laser processed coating; 2 – sprayed and remelted coating in the furnace; 3 – sprayed coating

3.5 lentelė. Elektrodų korozijos srovės

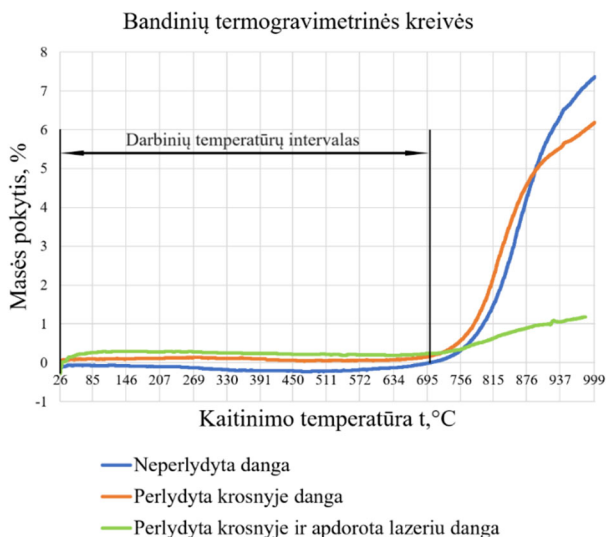
Table 3.5. Electrode corrosion currents

Elektrodas	Tirpalas	Elektrodo atviros grandinės potencialas, E_{ocp} , V _{Ag/AgCl}	Korozinės srovės tankis, j_{corr} , mA/cm ²	Bandinio masės pokytis (sumažėjimas), mg
1. Užpurkšta, perlydyta krosnyje ir apdorota lazeriu danga	1M H ₂ SO ₄	-0,197	0,0028	0,060± 0,010
2. Užpurkšta ir perlydyta krosnyje danga	1M H ₂ SO ₄	-0,228	0,0449	0,023±0,012
3. Užpurkšta danga	1M H ₂ SO ₄	-0,408	3,14	6,257±0,031

Tai galima paaiškinti tuo, kad užpurkštos ir perlydytos krosnyje dangos papildomas apdorojimas lazeriu takeliais suformuoja smulkesnės dendritinės sandaros metalo mikrostruktūros ruožus dangoje, o tai gali padidinti potencialo skirtumus tarp atskirų metalo ruožų.

3.1.10. Kompozicinių dangų termogravimetrinės ir diferencinės terminės analizės rezultatai

Nikelio pagrindo dangos pasižymi aukšta lydymosi temperatūra ir dideliu atsparumu aukštatemperatūrei oksidacijai. Siekiant įvertinti tiriamosios nikelio pagrindo su volframo karbidais kompozicinės dangos atsparumą aukštatemperatūrei korozijai, buvo atliktos termogravimetrinė (TGA) ir diferencinė terminė analizė (DTA). Gauti rezultatai pavaizduoti 3.29 ir 3.30 paveiksluose.

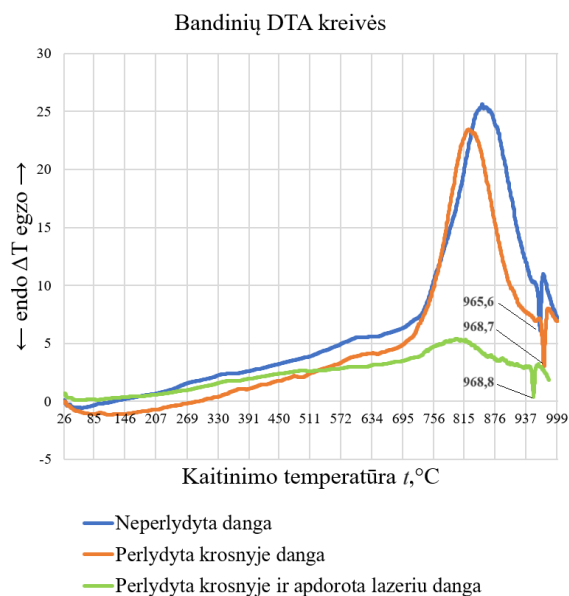


3.29 pav. Dangų termogravimetrinės kreivės
Fig. 3.29. Thermogravimetric curves of coatings

Tiriamųjų bandinių TGA kreivių pradžioje (3.29 pav.) matomas labai nežymus pradinis bandinių masės praradimas (ne daugiau nei 0,2 %). TGA bandymų metu kaitinant bandinius, nuo bandinių paviršiaus galėjo pasišalinti visos lengvosios paviršiaus frakcijos. Termogravimetrinės analizės rezultatai rodo, kad neperlydyta ir perlydyta krosnyje danga turi darbinės temperatūros diapazoną nuo 26 °C iki maždaug 700 °C temperatūros. Nuo 700 °C temperatūros matomas labai staigus termogravimetrinių kreivių kilimas, kuris rodo prasidėjusį intensyvų bandinių

masės augimą, kuris, labiausiai tikėtina, kad yra susijęs su prasidėjusia dangų aukštatemperatūre oksidacija. Perlydytos krosnyje ir apdorotos lazeriu dangos darbinės temperatūros diapazonas siekia iki maždaug 750 °C temperatūros, o tuomet termogravimetrinė kreivė pradeda kilti į viršų – bandinių masės prieaugis yra nedidelis. Esant 980 °C temperatūrai, siekia tik ~1,17 % (užpurkštų dangų ~7,08 %, užpurkštų ir perlydytų krosnyje dangų ~5,96 %). Todėl galima daryti išvadą, kad tokios dangos metalas ore oksiduojasi mažesniu intensyvumu negu užpurkštų arba užpurkštų ir perlydytų krosnyje dangų. Greičiausiai taip yra dėl smulkesnės ir labiau homogeniškos perlydyto lazeriu dangos metalo mikrostruktūros formavimosi proceso.

Diferencinės terminės analizės rezultatai (3.30 pav.) rodo, kad neperlydytą dangą, perlydytą krosnyje dangą ir perlydytą krosnyje bei apdorotą lazeriu dangą kaitinant atitinkamai iki 965,6 °C, 968,7 °C ir 968,8 °C temperatūrų pastebėti staugūs visų dangų masių pokyčiai. Tai rodo, kad šiose temperatūrose prasidėjo dangos metalo eutektinių fazių lydymosi procesai, greičiausiai tai boridinės eutektikos, kurios dangose buvo nustatytos rentgenografinės analizės metu.



3.30 pav. Dangų DTA kreivės
Fig. 3.30. DTA curves of coatings

Termogravimetrinės ir diferencinės terminės analizės rezultatai patvirtina prielaidą, kad užpurkšta, perlydyta elektrinėje krosnyje ir apdorota lazeriu danga

yra atspari aukštatemperatūrei oksidacijai ir turi iki 750 °C darbinės temperatūros diapazoną.

3.2. Trečiojo skyriaus išvados

1. Perlydant užpurkštas NiCrCoFeCBSi pagrindo su volframo karbidais dangas elektrinėje krosnyje 1300 °C temperatūroje 2,5 min, susidaro beveik monolitinis sluoksnis (~670 HV_{0,2} mikrokietumo) su mažu likutiniu porėtumu (~3,6 %), pagerėja dangos sanglauda ir atsiranda stiprus metalurginis ryšys (dėl abipusės cheminių elementų difuzijos tarp dangos ir substrato) tarp dangos ir pagrindo, o tai lemia gerą dangos ir substrato adheziją. Papildomas suformuotos dangos apdorojimas lazeriu dar labiau sutankina dangos metalą ir sumažina jo porėtumą iki ~1,4 %. Sumažėjęs porėtumas pagerina keraminių dangų sluoksnių mechanines savybes, įskaitant kietumą, tamprumą ir standumą. Mažas porų tankis dangose sušlėtina korozinių terpių prasiskverbimą į dangų vidų, o vėliau ir į substratą, t. y. pagerina atsparumą korozijai. Mažas porėtumas padidina dangų atsparumą oksidacijai aukštoje temperatūroje, nes deguonis nebegali difunduoti per poras į pagrindą.
2. NiCrCoFeCBSi pagrindo su volframo karbidais dangų lazerinio apdorojimo metu, apdorojant dangas be skersinių lazerio spindulio svyravimų, suformuotų takelių plotis ir storis priklausė nuo lazerinio apdorojimo greičio. Įvedus 1 mm ir 2 mm skersinius lazerio spindulio svyravimus, išlydyto takelio plotis padidėjo atitinkamai ~1,5–2,5 ir 2–3,2 karto, o didžiausias išlydyto takelio storis sumažėjo atitinkamai ~16–27 % ir ~31–39 %, priklausomai nuo lazerinio apdorojimo greičio. Bandinių išankstinis pakaitinimas iki 400 °C temperatūros prieš apdorojimą lazeriu reikšmingos įtakos išlydyto takelio pločiui neturėjo, tačiau išlydyto takelio storis padidėjo iki ~40 %. Naudojant išankstinį pagrindo pakaitinimą iki 400 °C, lazeriu perlydyto takelio storio praradimas esant 2 mm lazerio spindulio skersiniams svyravimams yra visiškai kompensuojamas, o esant 1 mm lazerio spindulio skersiniams svyravimams takelio storis netgi padidinamas. Perlydytų takelių pločio padidėjimas taikant lazerinį apdorojimą su skersiniais svyravimais leidžia apdoroti didesnę formuojamos dangos plotą ir taip padidinti technologijos našumą. Suformuotos dangos takelių storis lemia dangos eksploatacinį resursą.
3. Dangas perlydant lazeriu, esant 9554 W/cm² galios tankiui ir 250–1000 mm/min lazerinio apdorojimo greičiui, be išankstinio pagrindo pa-

kaitinimo visuose gautuose bandiniuose susidarė įtrūkiai. Lazerio spindulio skersinių svyravimų įvedimas padidino įtrūkių dydį ir kiekį. Dangos išankstinis pakaitinimas iki 400 °C temperatūros neleido įtrūkiams susidaryti bandiniuose be skersinių lazerio spindulio svyravimų ir ryškiai sumažino įtrūkių kiekį bandiniuose su lazerio spindulio skersiniais svyravimais. Remiantis tyrimų rezultatais, reikia pažymėti, kad išankstinis pakaitinimas iki 400 °C žymiai pagerino dangos struktūrinį vientisumą, todėl formuojant MMK tipo dangas jis yra būtinas.

4. Vertinant skirtingų eksperimentinių bandymų rezultatus (be lazerio spindulio skersinių svyravimų, su lazerio spindulio skersiniais svyravimais 1 mm ir 2 mm, be išankstinio pagrindo pakaitinimo ir su išankstiniu pagrindo pakaitinimu iki 200 °C ir 400 °C), gautas geriausias rezultatas yra: naudojant 1 mm lazerio spindulio skersinius svyravimus, 500–750 mm/min lazerinio apdorojimo greičius ir iš anksto bandinį pakaitinus iki 400 °C temperatūros. Naudojant šiuos parametrus, susidaro platus ir vienodo storio perlydyto metalo takelis su gana plokščiu dugnu, su vienoda mikrostruktūra ir mikrokietumo pasiskirstymu. Perlydytos lazeriu dangos paviršiaus topografija pasižymi nedideliais mikronelygumais (~32–40 μm), kurie yra metalų glotnaus mechaninio apdirbimo (tekinimo ir frezavimo) lygio ir todėl reikalauja trumpesnio galutinio dangos mechaninio apdirbimo.
5. Skirtingais dangų lazerinio apdorojimo parametrais perlydytų sluoksnių mikrostruktūros morfologija ir atskirų fazių dydis šiek tiek skyrėsi, tačiau parodė panašią fazinę sudėtį. Tikėtina, kad kietuosius tarpus, susidariusius dangose po perlydymo lazeriu, daugiausia sudarė $M_{12}C$ tipo karbidai ir mažesniu kiekiu M_6C ir M_2C karbidai (kur M yra Ni, Cr ir W) kartu su W karbidų likučiais, tolygiai pasiskirsčiusiais metalinėje matricoje, susidedančioje iš γ -Ni kietojo tirpalo su jame ištirpusiais Co, Cr, Fe, Si, W elementais ir kompleksine Ni-B-Si eutektika. Galima teigti, kad lazerinis dangos apdorojimas nesukėlė reikšmingų fazinių pokyčių metale ir todėl negali pabloginti dangos metalo savybių.
6. Užpurkštos ir perlydytos elektrinėje krosnyje dangos lazerinis apdorojimas dangos paviršiaus metalo kietumą padidino ~79 %, lyginant su užpurkšta danga, ir ~22 %, lyginant su užpurkšta ir perlydyta krosnyje danga. Lazeriu apdorotų dangų mikrokietumas svyravo nuo ~1030 HV_{0,2} iki ~1310 HV_{0,2}, t. y. iki ~2 kartų didesnis nei tik krosnyje perlydytų dangų. Bandinių išankstinis pakaitinimas praktiškai nepablogino apdoroto lazeriu dangos metalo mikrokietumo. Įvedus skersinius lazerio spindulio svyravimus, mikrokietumas sumažėjo ~8 %. Tai reiškia, kad purkštinių ir perlydytų krosnyje dangų apdorojimas lazeriu be su skersinių

lazerio spindulio svyravimų ir su jais žymiai padidina dangos metalo kietumą, o išankstinis pagrindo pakaitinimas neigiamos įtakos bandinių kietumui neturėjo.

7. Po apdorojimo lazeriu termiškai užpurkštos ir krosnyje perlydytos dangos atsparumas sausajam slydimo dilimui padidėjo ~2,9 karto, o trinties koeficientas sumažėjo ~1,3 karto, lyginant su krosnyje perlydytomis dangomis. Abrazyvinio dilimo tyrimais nustatyta, kad kompozicinė MMK danga turi ~2,0 kartus mažesnius masės nuostolius nei užpurkšta ir perlydyta krosnyje danga. Galima teigti, kad suformuotos metalo keraminės dangos lazerinis apdorojimas padidino dangos metalo atsparumą sausajam slydimo ir abrazyviniam dilimui bei pagerino tribologines dangos savybes.
8. Kompozicinių metalo keraminių dangų antikoroziinių savybių tyrimai 1M H₂SO₄ tirpale parodė, kad tiriamųjų dangų perlydymas krosnyje stipriai pagerino suformuotų dangų antikorozines savybes (korozinės srovės tankis sumažėjo nuo 3,14 mA/cm⁻² iki 0,0449 mA/cm⁻²). Papildomas lazerinis dangų apdorojimas dar labiau sumažino korozinės srovės tankį iki 0,0028 mA/cm⁻² ir padidino suformuotos dangos atsparumą elektrocheminei korozijai, todėl šios dangos gali būti pritaikytos gaminiams, kurie yra veikiami korozinės aplinkos.
9. NiCrCoFeCBSi pagrindo su volframo karbidine keramika dangų TGA ir DTA tyrimų rezultatai parodė, kad suformuotų kompozicinių metalo keraminių dangų darbinių temperatūrų intervalas siekia iki 750 °C, o, kaitinant dar labiau, lazeriu apdorotos dangos bandinių masės prieaugis yra mažiausias ir, esant 980 °C temperatūrai, siekia tik ~1,17 %, todėl tokias dangas galima eksploatuoti aukštatemperatūrine oksidacija pasižyminčioje aplinkoje.

Bendrosios išvados

1. Terminiu liepsniniu būdu suformuotų purkštinių dangų lazerinis apdorojimas yra efektyvus NiCrCoFeCBSi pagrindo su WC metalo keraminių dangų formavimo būdas, dėl kurio apdorotoje dangoje formuojasi mažo porėtumo savita smulkiadispersė tolygi metalo mikrostruktūra, dėl to padidėja dangos kietumas ir mikrokietumas, pagerėja atsparumas sausajam slydimo dilimui ir sumažėja trinties koeficientas.
2. NiCrCoFeCBSi pagrindo su WC užpurkštų ir perlydytų krosnyje dangų lazerinis apdorojimas, naudojant lazerio spindulio skersinius svyravimus iki 2 mm beveik neturi įtakos perlydyto metalo mikrostruktūrai, fazinei sudėčiai, dangos metalo mikrokietumui ir leidžia suformuoti didesnio pločio ir mažesnio storio perlydyto metalo takelius su mažesniu takelio paviršiaus nelygumų gyliu, todėl šios dangos reikalauja mažesnio mechaninio apdirbimo.
3. Išankstinis, prieš lazerinį apdorojimą, NiCrCoFeCBSi pagrindo su WC dangų pakaitinimas iki 400 °C temperatūros:
 - užkirto kelią įtrūkių susidarymui bandiniuose, apdorotuose be lazerio spindulio skersinių svyravimų, ir ryškiai sumažino įtrūkių kiekį bandiniuose su skersiniais svyravimais;
 - neturėjo reikšmingos įtakos dangos metalo perlydyto takelio pločiui, tačiau išlydyto takelio storis padidėjo iki ~40 %;

- nepablogino apdorotos lazeriu dangos metalo mikrokietumo.
4. NiCrCoFeCBSi pagrindo su WC užpurkštų ir perlydytų krosnyje dangų lazeriniam apdorojimui rekomenduojama naudoti 1 mm lazerio spindulio skersinius svyravimus, 500 mm/min lazerinio apdorojimo greitį ir 400 °C pakaitinimo temperatūrą. Naudojant išvardintus parametrus suformuojami platūs (apie 2310 µm) ir negilūs perlydyto metalo takeliai su plokščiu dugnu, vienoda mikrostruktūra ir kietumo pasiskirstymu bei nedideliu (iki 35 µm) takelio paviršiaus nelygumų gyliu.

Rekomendacijos

1. Norint suformuoti geresnio struktūrinio vientisumo, kokybės ir didesnio darbinio resurso NiCrCoFeCBSi pagrindo su WC dangas, rekomenduojama prieš dangų apdorojimą lazeriu dengiamą gaminį iš anksto pakaitinti iki 400 °C temperatūros.
2. Rekomenduojama taikyti šiame darbe aprašytą kombinuotą metalo keraminių dangų technologiją, kuri leido sukurti kompozicinę NiCrCoFeCBSi pagrindo su WC dangą, pasižyminčią gera metalurginio tipo adhezija, mažu porėtumu iki ~1,4 % ir dideliu apdoroto dangos sluoksnio mikrokietumu iki 1310 HV0,2. Suformuota kompozicinė daugiafunkcė danga turi gerą atsparumą abrazyviam dilimui, elektrocheminei korozijai 1M H₂SO₄ terpėje, aukštatemperatūrei oksidacijai ir užtikrina patikimą padengtų detalių eksploataciją iki 750 °C temperatūros.

Literatūra ir šaltiniai

- Ai, Y., Yu, L., Huang, Y., & Liu, X. (2022). The investigation of molten pool dynamic behaviors during the “ ∞ ” shaped oscillating laser welding of aluminum alloy. *International Journal of Thermal Sciences*, 173, 107350. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107350>
- Amado, J. M., Tobar, M. J., Yáñez, A., Amigó, V., & Candel, J. J. (2011). Crack free tungsten carbide reinforced Ni (Cr) layers obtained by laser cladding. *Physics Procedia*, 12(Part A), 338–344. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.043>
- Amirjan, M., & Sakiani, H. (2019). Effect of scanning strategy and speed on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted IN718 nickel-based superalloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103, 1769–1780. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03545-0>
- Angelastro, A., Campanelli, S. L., Casalino, G., & Ludovico A. D. (2013). Optimization of Ni-Based WC/Co/Cr composite coatings produced by multilayer laser cladding. *Advances in Materials Science and Engineering*, 615464. <https://doi.org/10.1155/2013/615464>
- Anoop, N. S., & Narendra, B. D. (2009). Laser machining of structural ceramics – A review [Department of Materials Science Engineering, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, United States]. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.11.010>
- Armada, S., Schmid, R., Equey, S., Fagoaga, I., & Espallargas, N. (2013). Liquid-Solid Self-Lubricated Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 22, 10–17. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11666-012-9847-x>

Audronis, M., Leyland, A., Show, M., Kiryukhantsev-Korneev, Ph.V., Shtansky, D. V., & Levashov, E. A. (2007). The Structure and Mechanical Properties of Ti-Si-B Coatings Deposited by DC and Pulsed-DC Unbalanced Magnetron Sputtering. *Plasma Processes and Polymers*, 4(S1), S687–S692. <https://doi.org/10.1002/ppap.200731706>

Azadi, M., Aghdam, A. S. R., & Ahangarani, Sh. (2016). Mechanical behavior of TiN/TiC-n multilayer coatings and Ti (C, N) multicomponent coatings produced by PACVD. *Strength of Materials*, 48(2). <https://link.springer.com/article/10.1007/s11223-016-9763-2>

Babiak, Z., Wenz, T., & Engl, L. (2006). Fundamentals of thermal spraying, flame and arc spraying. In F.W. Bach, A. Laarmann, T. Wenz (Eds.), *Modern Surface Technology*. <https://doi.org/10.1002/3527608818.ch8>

Balachninaite, O., Bargelis, A., Dementjev, A., Jonušas, R., Račiukaitis, G., & Sirutkaitis, V. (2008). *Lazerinė technologija*. Vilniaus universiteto leidykla.

Balachninaite, O., Barkauskas, M., Čiburys, A., Paipulas, D., Pipinytė, I., Sirutkaitis, V., & Vengelis, J. (2016). *Lazeriai ir jų taikymai. Laboratoriniai darbai*. Vilniaus universiteto leidykla.

Baran, Ö., Bidev, F., Çiçek, H., Kara, L., Efeoglu, I., & Küçükömeroğlu, T. (2014). Investigation of the friction and wear properties of Ti/TiB₂/MoS₂graded-composite coatings deposited by CFUBMS under air and vacuum conditions. *Surface & Coatings Technology*, 260, 310–315. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.07.033>

Barnes, D., Johnson, C., Snell, R., & Best, S. (2012). Using scratch testing to measure the adhesion strength of calcium phosphate coatings applied to poly (carbonate urethane) substrates. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 6, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.10.010>

Bass, M., Van, E. W., Williams, D. R., & Wolfe, W. L. (1995). *Handbook of optics. Devices, Measurements and Properties* (2nd ed.). Optical Society of America. https://cdn.preterhuman.net/texts/science_and_technology/physics/Optics/Handbook%20of%20Optics%20%20second%20edition%20vol.%202%20-%20Bass%20M.pdf

Bidron, G., Doghri, A., Malot, T., Fournier-dit-Chabert, F., Thomas, M., & Peyre, P. (2020). Reduction of the hot cracking sensitivity of CM-247LC superalloy processed by laser cladding using induction preheating. *Materials Processing Technology*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116461>

Bartkowski, D., Matysiak, W., & Wojtko, K. (2018). Stellite-6 surface layers reinforced with hard and refractory WC particles produced on steel for metal forming. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, The 10th International Symposium Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering*, 393. <https://iop-science.iop.org/article/10.1088/1757-899X/393/1/012093>

Bartkowski, D., Bartkowska, A., Jurči, P. (2021). Laser cladding process of Fe/WC metal matrix composite coatings on low carbon steel using Yb: YAG disk laser. *Optics & Laser Technology*, 136, 106784. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106784>

Busuttill, P. (1997, September 9). *Laser Welding Apparatus and Method for High Temperature Gradient Cooling Alloys* (US Patent 5665255A). <https://patents.google.com/patent/CA2201309A1/en>

Bührer, A. G. (2019, October 15). Pulver- und Draht-Flammspritzen. Wie funktioniert das Flammspritzen? <https://www.buehrer-ag.ch/pulver-und-draht-flammspritzen/>

Calderon, R. O., Edtmaier, C., & Schubert, W. -D. (2019). Novel binders for WC-based cemented carbides with high Cr contents. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 85, 105063. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.105063>

Cao, Q., Fan, L., Chen, H., Hou, Y., Dong, L., & Ni, Z. (2022). Wear behavior of laser cladded WC-reinforced Ni-based coatings under low temperature. *Tribology International*, 176, 107939. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107939>

Chen, J., Li, M., Li, K., Zhang, W., Yang, Zh., Zhao, C., Ma, J., & Liu, W. (2023). Crack-ing mechanisms in additively manufactured pure tungsten from printing single tracks, thin walls and cubes. *Materials & Design*, 234, 112363. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112363>

Chen, L., Mi, G., Zhang, X., & Wang, C. (2021). Effects of sinusoidal oscillating laser beam on weld formation, melt flow and grain structure during aluminum alloys lap welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 298, 117314. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117314>

Chen, L., Wang, Sh. Q., Du, Y., Zhou, Sh. Z., Gang, T., Fen, J. C., Chang, K. K., Li, Y. W., & Xiang, X. (2010). Machining performance of Ti–Al–Si–N coated inserts. *Surface and Coatings Technology*, 205(2), 582–586. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.07.043>

Chim, Y. C., Ding, X. Z., Zeng, X. T., Zhang, S. (2009). Oxidation resistance of TiN, CrN, TiAlN and CrAlN coatings deposited by lateral rotating cathode arc. *Thin Solid Films*, 517(17), 4845–4849. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.03.038>

Choi, H. S., Park, B., & Lee, J. J. (2007). CrB2 coatings deposited by inductively coupled plasma assisted DC magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 202(4–7), 982–986. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.06.020>

Cuppoletti, J. (2011). *Nanocomposites with Unique Properties and Applications in Medicine and Industry*. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/books/1046>

Čekanavičius, D. (2007). *Prietaiso medžiagų kietumui ir dangų adhezijai matuoti charakteristikų tyrimas* [Magistro tezės]. Kaunas, Akademija. 67 p.

Davis, J. R. (2000). *ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and their Alloys*. ASM International, Novelty. <https://sciarium.com/file/62666/>

Davis, J. R., & Davis and Associates. (2004). *Handbook of Thermal Spray Technology*.

Deschuyteneer, D., Petit, F., Gonon, M., Cambier, F. (2015). Processing and characterization of laser clad NiCrBSi/WC composite coatings – Influence of microstructure on hardness and wear. *Surface and Coatings Technology*, 283, 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.10.055>

- Eliseev, P. G., Krokhin, O. N., & Zavestovskaya, I. N. (2005). Nonlinear absorption mechanism in ablation of transparent materials by high power and ultrashort laser pulses. *Applied Surface Science*, 248(1–4), 313–315. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.03.063>
- England, G. (2008). *Thermal Spray Coating*. Independent metallurgist and consultant to the thermal spray coating industry. <http://www.gordonengland.co.uk/>
- Erfanmanesh, M., Abdollah-Pour, H., Mohammadian-Semnani, H., & Shoja-Razavi, R. (2018) Kinetics and oxidation behavior of laser clad WC-Co and Ni/WC-Co coatings. *Ceramics International*, 44(11), 12805–12814. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.087>
- Erne, M., & Kolar., D. (2012). Thermal spraying of oxide ceramic and ceramic metallic coatings. In *Ceramic Coatings – Applications in Engineering*. <https://www.intechopen.com/chapters/29755>; <https://doi.org/10.5772/29739>
- Espallargas, N., & Armada, S. (2013). Self-lubricated coatings obtained by thermal spray methods. *International application published under the patent cooperation treaty (PCT)*, (WO 2013/058660 Al). <https://link.springer.com/article/10.1007/s11666-012-9847-x>
- Espallargas, N., Armada, S. (2015). A new type of self-lubricated thermal spray coatings: Liquid lubricants embedded in a metal matrix. *Journal of Thermal Spray Technology*, 24, 222–234. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11666-014-0152-8>
- Fang, J. Y., Li, Z. X., Jiang, J. -M., & Shi, Y. W. (2007, June). Difference in particle characteristics and coating properties between spraying metallic and ceramic powder cored wires. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 17(3), 537–542. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(07\)60129-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(07)60129-0)
- Farahmand, P., Liu, Sh., Zhang, Zh., & Kovacevic, R. (2014). Laser cladding assisted by induction heating of Ni–WC composite enhanced by nano-WC and La₂O₃. *Ceramics International*, 40(10), Part A, 15421–15438. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.06.097>
- Farahmand, P., & Kovacevic, R. (2015). Corrosion and wear behavior of laser clad Ni–WC coatings. *Surface and Coatings Technology*, 276, 121–135. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.039>
- Fathi, A., Toyserkani, E., Khajepour, A., & Durali, M. (2006). Prediction of melt pool depth and dilution in laser powder deposition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39, 2613–2623. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/39/12/022>
- Fauchais, P., & Vardelle, A. (2007). Thermal Spray Coatings. In *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, Thermal Spray Coatings*. <https://www-researchgate.net/publication/229592283>
- Fedrizzi, L., Rossi, S., Cristel, R., & Bonora, P. L. (2004). Corrosion and wear behaviour of HVOF cermet coatings used to replace hard chromium. *Electrochimica Acta*, 49(17), 2803–2814. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.01.043>

- Fiala, P., Hepp, R., & Zikin, A. (2017). Alloyed Carbides Beyond WC as a New Material Platform for Solving Challenges in Hardfacing. In *ITSC 2017 Proceedings of the Conference in Düsseldorf*, Beitrags-Nr. 5453. <https://dl.asminternational.org/itsc/proceedings-abstract/ITSC%202017/83775/408/24048>
- Fu, X., Ma, W., Duan, Sh., Wang, Q., & Lin, J. (2019). Electrochemical corrosion behavior of Ni-Fe-Co-P alloy coating containing Nano-CeO₂ particles in NaCl solution. *Materials*, 12(16), 2614; <https://doi.org/10.3390/ma12162614>
- Gao, Y., Xiong, D., Wang, C., & Chen, Y. (2009). Influences of laser powers on microstructure and properties of the coatings on the AZ91HP magnesium alloy. *Acta Metallurgica Sinica*, 22, 167–173. [https://doi.org/10.1016/S1006-7191\(08\)60085-X](https://doi.org/10.1016/S1006-7191(08)60085-X)
- Gargasas, J. (2011). *Terminiškai purkštų dangų tyrimai ultragarsiniais metodais* [Daktaro disertacija, Vilniaus Gedimino technikos universitetas].
- Gell, M. (2001). Development and implementation of plasma sprayed nanostructured ceramic coatings. *Surface and Coatings Technology*, 146–147, 48–54. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01470-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01470-0)
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-56127-7>
- Girerd, T., Madrigal, A., Clare, A., & Norton, A. (2022). Lissajous curve oscillations in laser welding. *Procedia CIRP*, 111, 562–565. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.08.150>
- Gonzalez, R. (2007). Microstructural study of NiCrBSi coatings obtained by different processes. *Wear*, 263(1–6), 619–624. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.094>
- Guo, C., Chen, J., Zhou, J., Zhao, J., Wang, L., Yu, Y., & Zhou, H. (2012). Effects of WC–Ni content on microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-based alloys coating. *Surface and Coatings Technology*, 206(8–9), 2064–2071. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.06.005>
- Yaxiong Guo, Y., & Liu, Q. (2018). MoFeCrTiWAlNb refractory high-entropy alloy coating fabricated by rectangular-spot laser cladding. *Intermetallics*, 102, 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2018.09.005>
- Guo, M., Ye, Y., Jiang, X., & Wang, L. (2019). Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stress of Selective Laser Melted AlSi10Mg. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28, 6753–6760. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04423-2>
- Gupta, M. C. (2020). Laser-Induced Surface Modification for Photovoltaic Device Applications. In K. Sugioka, *Handbook of Laser Micro- and Nano-Engineering*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69537-2_16-1
- Han, J., Wu, M., Ge, Y., & Wu, J. (2018). Optimizing the structure accuracy by changing the scanning strategy using selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95, 4439–4447. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-1503-7>

- Hao, Y., Ye, Z., Wang, L., Ye, M., Dong, H., Wang, Ch., & Du, Y. (2024). Fabrication of ultra-low porosity plasma electrolytic oxidation coating on Ta-12W alloys and its formation mechanism. *Surface and Coatings Technology*, 476, 130251. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130251>
- Hao, L., Lawrence J., & Chian K. S. (2005). Osteoblast cell adhesion on a laser modified zirconia based bioceramic. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 16(8), 719–726. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10856-005-2608-3>
- Hattali, M. L., Valette S., Ropital, F., Stremdoerfer, G., Mesrati, N., & Tréheux, D. (2012). Study of SiC–nickel alloy bonding for high temperature applications. *Journal of the European Ceramic Society, Elsevier*, 29, 813–819. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.06.035>
- Hazra, S., Sabiruddin, K., & Bandyopadhyay, P. P. (2012). Plasma and HVOF sprayed WC–Co coatings as hard chrome replacement solution. *Surface Engineering*, 28(1), 37–43. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1179/1743294410Y.0000000009>
- Heigl, R. (2004). Herstellung von Randschichten auf Aluminiumgusslegierungen mittels Laserstrahlung. [Daktaro disertacija, Universität Stuttgart].
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- Hossain, M. K., Rubel, M. H. K., Akbar, M. A., Ahmed, M. H., Haque, N., Rahman, M. F., Hossain, J., & Hossain, K. M. (2022). A review on recent applications and future prospects of rare earth oxides in corrosion and thermal barrier coatings, catalysts, tribological, and environmental sectors. *Ceramics International*, 48(22), 32588–32612. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.220>
- Hu, D., Liu, Y., Chen, H., Liu, J., Wang, M., & Deng, L. (2021). Microstructure and properties of Ta-reinforced NiCuBSi + WC composite coating deposited on 5Cr5MoSiV1 steel substrate by laser cladding. *Optics & Laser Technology*, 142, 107210. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107210>
- Huang, Y. (2011). Characterization of dilution action in laser-induction hybrid cladding. *Optics & Laser Technology*, 43(5), Pages 965–973. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.12.005>
- Jarašūnas, O., & Černašėjus, O. (2016). Purkštinių Ni-Cr ir Ni-Cr-WC dangų savybių tyrimas. *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 8(6), 615–620.
- Jia, H., Sun, H., Wang, H., Wu, Y., & Wang, H. (2021). Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 2413–2435. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-06810-3>
- Jiang, Z., Chen, X., Li, H., Lei, Z., Chen, Y., Wu, S., & Wang, Y. (2020). Grain refinement and laser energy distribution during laser oscillating welding of Invar alloy. *Materials & Design*, 186, 108195. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108195>
- Jeyaprakash, N., Yang, Ch. H., Duraiselvam, M., & Prabuc, G. (2019). Microstructure and tribological evolution during laser alloying WC-12%Co and Cr3C2–25%NiCr powders

on nodular iron surface. *Results in Physics*, 12, 1610–1620. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.01.069>

Joshi, S. S., Choudhuri, D., Mantri, S. A., Banerjee, R., Dahotre, N. B., & Banerjee, S. (2018). Rationalizing surface hardening of laser glazed grey cast iron via an integrated experimental and computational approach. *Materials and design*, 156(15), 570–585. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.07.022>

Kadolkar, P. B., Watkins, T. R., De Hosson, J. T. M., Kooi, B. J., & Dahotre, N. B. (2007). State of residual stress in laser-deposited ceramic composite coatings on aluminum alloys. *Acta Mater.*, 55, 1203–1214. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.07.049>

Kahhal, P., Jo, Y.-K. & Park, S.-H. (2024). Recent progress in remanufacturing technologies using metal additive manufacturing processes and surface processing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 11, 625–658. <https://doi.org/10.1007/s40684-023-00551-2>

Kamal, S., Sharma, K. V., Jayaganthan, R., & Prakash, S. (2015). Hot corrosion behavior of thermal spray coatings on superalloy in coal-fired boiler environment. *Journal of Materials Research*, 30(18), 2829–2843. <https://doi.org/10.1557/jmr.2015.264>

Kapustynskiy, O. (2023). Research of improvement of metals surface hardening and stiffness by laser processing [Daktaro disertacija, Vilniaus Gedimino technikos universitetas].

Karmakar, D. P., Muvvala, G., & Nath, A. N. (2021). High-temperature abrasive wear characteristics of H13 steel modified by laser remelting and clad with Stellite 6 and Stellite 6/30% WC. *Surface and Coatings Technology*, 422, 127498. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127498>

Kim, C., Kang, M., & Kang, N. (2013). Solidification crack and morphology for laser weave welding of Al 5J32 alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, 18, 57–61. <https://doi.org/10.1179/1362171812Y.0000000073>

Koc, R., Kodambaka, S. K. (2000). Tungsten carbide (WC) synthesis from novel precursors. *Journal of the European Ceramic Society*, 20(11), 1859–1869. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(00\)00038-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(00)00038-8)

Koutny, D., Palousek, D., Pantelejev, L., Hoeller, Ch., Pichler, R., Tesicky, L., & Kaiser, J. (2018). Influence of scanning strategies on processing of aluminum alloy EN AW 2618 using selective laser melting. *Materials* 2018, 11(2), 298. <https://doi.org/10.3390/ma11020298>

Kraetzs, M., Standfuss, J., Klotzbach, A., Kaspar, J., Brenner, B., & Beyer, E. (2011). Laser beam welding with high-frequency beam oscillation: Welding of dissimilar materials with brilliant fiber lasers. *Physics Procedia*, 12(Part A), 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.018>

Kuzma, T. (2011). *Vibromechaniškai veikiamų perlydymo metu purkštinių dangų tyrimas* [Baigiamasis magistro darbas, Vilniaus Gedimino technikos universitetas].

- Li, Ch., Zhang, Q., Wang, F., Deng, P., Lu, Q., Zhang, Y., Li, Sh., Ma, P., Li, W., & Wang, Y. (2019). Microstructure and wear behaviors of WC-Ni coatings fabricated by laser cladding under high frequency microvibration. *Applied Surface Science*, 485, 513–519. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.04.245>
- Li, M., Zhang, O., Han, B., Song, L., Cui, G., & Yang, J., Li, J. (2020). Microstructure and property of Ni/WC/La₂O₃ coatings by ultrasonic vibration-assisted laser cladding processing. *Optics and Lasers in Engineering*, 125, 105848. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.105848>
- Li, W., & Han, B. (2018). Research and application of functionally gradient materials. *Materials Science and Engineering*, 394, 022065. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/394/2/022065>
- Li, W., Yang, X., Wang, S., Duan, D., Li, F., Qiao, Y., Liu, Y., & Liu, X. (2022). The effect of WC content on the bonding strength and mechanical properties of WC/Ni60 coatings of brake disc. *Optics & Laser Technology*, 149, 107822. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107822>
- Lima, M. M., Godoy, C., Modenesi, P. J., Avelar-Batista, J. C., Davison, A., & Matthews, A. (2004). Coatings fracture toughness determined by Vickers indentation an important parameter in cavitation erosion resistance of WC-Co thermally sprayed coatings. *Surface and Coatings Technology*, 177–178, 489–496. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00917-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00917-4)
- Liu, B., Li, B.-Q., & Li, Zh. (2019). Selective laser remelting of an additive layer manufacturing process on AlSi10Mg. *Results in Physics*, 12, 982–988. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.12.018>
- Liu, H., Xu, Q., Wang, C., & Zhang, X. (2015). Corrosion and wear behavior of Ni60CuMoW coatings fabricated by combination of laser cladding and mechanical vibration processing. *Journal of Alloys and Compounds*, 621, 357–363. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.10.030>
- Liu, J., Yua, H., Chenb, Ch., Wengb, F., & Daib, J. (2017). Research and development status of laser cladding on magnesium alloys: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, 93, 195–210. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.02.007>
- Liu, Y., Hang, Z., Chen, H., Ceng, S., Gou, G., Wang, X., Tu, M., & Wu, X. (2016). Erosion–Corrosion Property of CeO₂-Modified HVOF WC-Co Coating. *Journal of Thermal Spray Technology*, 25(4), 815–822. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11666-016-0391-y>
- Liu, Y., Xu, T., Li, G., Li, Z., Du, F., & Chen, G. (2023). A multi-objective optimization of laser cladding process of Ni-based coating on the preheated copper alloy. *Materials Today Communications*, 35, 105614. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105614>
- LST EN 13507:2018 Terminis purškimas. Metalinių dalių ir komponentų paviršių parengiamasis apdorojimas terminiam purškimui.
- LST EN ISO 14922-1:2001 Terminis užpurškimas. Terminiškai užpurkštų gaminių kokybės reikalavimai. 1 dalis. Parinkimo ir naudojimo vadovas (ISO 14922-1:1999).

LST EN ISO 14916:2017 Terminis purškimas. Tempiamojo adhezijos stiprio nustatymas (ISO 14916:2017).

LST EN ISO 14923:2006 Terminis purškimas. Terminiškai užpurkštų dangų apibūdinimas ir bandymai (ISO 14923:2003).

LST EN 13144:2003 Metalinės ir kitos neorganinės dangos. Kiekybinio adhezijos matavimo tempimo bandymu metodas.

LST EN ISO 4516:2002 Metalinės ir kitos neorganinės dangos. Vikerso ir Knopo mikrokietumo bandymai (ISO 4516:2002).

LST EN ISO 16348:2004. Metalinės ir kitos neorganinės dangos. Apibrėžtys ir nuostatos dėl išvaizdos. (ISO 16348:2003).

LST EN ISO 17834:2004. Terminis purškimas. Dangos apsaugančios nuo korozijos ir oksidacijos aukštos temperatūrose (ISO 17834:2003).

LST EN ISO 18332:2008. Apibrėžtys ir nuostatos, susijusios su akytumu. (ISO 18332:2008).

Lukauskaitė, R., Šiurkus, D., & Černašėjus, O. (2012). Terminiu būdu užpurkštų Ni-Cr-Si-Fe-B dangų savybių tyrimas. *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 4(6), 604–607. <https://doi.org/10.3846/mla.2012.101>

Lukauskaitė, R., Valiulis, A. V., Černašėjus, O., & Škamat, J. (2012). Ni-Cr-Si-B dangos, užpurkštos ant aliuminio substrato plazminio purškimo būdu, tyrimas. *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 4(6), 546–549. <https://doi.org/10.3846/mla.2012.89>

Luo, X., Li, J., & Li, G. J. (2015). Effect of NiCrBSi content on microstructural evolution, cracking susceptibility and wear behaviors of laser cladding WC/Ni-NiCrBSi composite coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 626, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.11.161>

Mahato, P., Singh, R. J., & Mishra, S. K. (2016). Nanocomposite Ti–Si–B–C hard coatings deposited by magnetron sputtering: Oxidation and mechanical behaviour with temperature and duration of oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 288, 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.01.039>

Malvajerdi, Sh. Sh., Malvajerdi, A. Sh., Ghanaatshoar, M., Habibi, M., & Jahdi, H. (2019). TiCrN-TiAlN-TiAlSiN-TiAlSiCN multi-layers utilized to increase tillage tools useful life-time. *Scientific Reports*, 9, 19101. <https://www.nature.com/articles/s41598-019-55677-8>

Mann, B. S., & Arya, V. (2001). Abrasive and erosive wear characteristics of plasma nitriding and HVOF coatings: Their application in hydro turbines. *Wear*, 249(5–6), 354–360. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00537-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00537-3)

Manna, I., & Dutta-Mazumdar, J. (2011). Laser material processing. *International Materials Reviews*, 56. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743280411Y.0000000003>

Markovič, V. (2018). *Daugiafunkčių paviršių iš geležies-nikelio-kobalto miltelių medžiagų formavimas ir tyrimas* [Daktaro disertacija, Vilniaus Gedimino technikos universitetas].

- Metco, S. (2006). *Thermal Spray Materials Guide*. Issued February. https://www.sianco.com.ar/media/productos/materiales_SM_combustion_polvos.pdf
- Meijer, J. (2004). Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities. *Journal of Materials Processing Technology*, 149(1–3), 2–17. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.003>
- Narayanan, R. G., & Gunasekera, J. S. (2019). *Sustainable material forming and joining*. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781351670319_A36188699/preview-9781351670319_A36188699.pdf
- Narendra B. D., & Sandip P. H. (2008). *Laser fabrication and machining of materials*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-72344-0>
- Nath, A., Sarkar, S., Muvvala, G., Karmakar, D. P., Chakraborty, Sh., Mullick, S., & Madhukar, Y. K. (2019). LASER-based manufacturing as a green manufacturing process. In *Sustainable Material Forming and Joining Edition*. <https://doi.org/10.1201/9781315163147>
- Newbery, A. P., & Grant, P. S. (2000). Droplet splashing during arc spraying of steel and the effect on deposit microstructure, *Journal of Thermal Spray Technology*, 9, 250–258. <https://link.springer.com/article/10.1361/105996300770350005>
- OC Oerlikon Management AG. (2024, March 16). *Lichtbogenspritzen*. <https://www.oerlikon.com/metco/de/loesungen-und-technologien/technologie/thermische-spritzverfahren/lichtbogenspritzen/>
- Pang, X., Dai, J., Chen, S., & Zhang, M. (2019). Microstructure and mechanical properties of fiber laser welding of aluminum alloy with beam oscillation. *Applied Sciences*, 9(23), 5096. <https://doi.org/10.3390/app9235096>
- Piasecka, M. (2014). Laser texturing, spark erosion and sanding of the surfaces and their practical applications in heat exchange devices. *Advanced Materials Research*, 874, 95–100. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.874.95>
- Piasecka, M., Strąk, K., & Grabas, B. (2017). Ibration-assisted laser surface texturing and electromachining for the intensification of boiling heat transfer in a minichanne. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62(4), 1983–1990. <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/120957/edition/105364/content>
- Pinkerton, A. J., & Li, L. (2004). The significance of deposition point standoff variations in multiple-layer coaxial laser cladding (coaxial cladding standoff effects). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44, 573–584. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.01.001>
- Pitassi, D., Savoia, E., Fontanari, V., Molinari, A., Luchin, V., Zappini, G., & Benedetti, M. (2017). *Finite element thermal analysis of metal parts additively manufactured via selective laser melting*. <https://www.intechopen.com/chapters/57728>
- Planche, M. P., Liao, H., Normand, B., & Coddet, C. (2005). Relationships between NiCrBSi particle characteristics and corresponding coating properties using different thermal spraying processes. *Surface and Coatings Technology*, 200(7), 2465–2473. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.08.224>

- Prasanna, N. D., Siddaraju, C., Shetty, G., Ramesh, M. R., & Reddy, M. (2018). Studies on the role of HVOF coatings to combat erosion in turbine alloys. *Materials today proceedings*, 5(1), Part 3, 3130–3136. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.01.119>
- Reddy, A., Preston, S. P., Shipway, P. H., Davis, C., & Hussaina, T. (2018). Process parameter optimisation of laser clad iron-based alloy: Predictive models of deposition efficiency, porosity and dilution. *Surface and Coatings Technology*, 349, 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.05.054>
- Ren, K., Chewb, Y., Fuh, J. Y. H., Zhang, Y. F., & Bi, G. J. (2019). Thermo-mechanical analyses for optimized path planning in laser aided additive manufacturing processes. *Materials and Design*, 162, 80–93. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.014>
- Sakharova, N. A., Oliveira, M. C., Antunes, J. M., & Fernandes, J. V. (2013). On the determination of the film hardness in hard film/substrate composites using depth-sensing indentation. *Ceramics international*, 39, 203–216. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.01.046>
- Sciaky, A., Farrel, W., & Solomon, J. (1981, December 22). *Method of Electron Beam Welding* (European Patent EP0068017A1). <https://patents.google.com/patent/EP0068017A1/en>
- Seibold, G. (2006). Absorption technischer Oberflächen in der Lasermaterialbearbeitung (in German).
- Shang, X., Liu, Q., Guo, Y., Ding, K., Liao, T., & Wang, F. (2022). Nano-TiC reinforced [Cr–Fe4Co4Ni4] Cr3 high-entropy-alloy composite coating fabricated by laser cladding. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 2076–2088. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.048>
- Sharma, S. (2012). Wear study of Ni–WC composite coating modified with CeO₂. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(9–12), 889–900. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-011-3764-x>
- Shi, Y., Li, Y., Liu, J., & Yuan, Z. (2018). Investigation on the parameter optimization and performance of laser cladding a gradient composite coating by a mixed powder of Co50 and Ni/WC on 20CrMnTi low carbon alloy steel. *Optics & Laser Technology*, 99, 256–270. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.010>
- Shu, D., Li, Zh., Zhang, K., Yao, Ch., Li, D., & Dai, Zh. (2017). In situ synthesized high volume fraction WC reinforced Ni-based coating by laser cladding. *Materials Letters*, 195, 178–181. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.02.076>
- Shu, D., Dai, S., Wang, G., Si, W., Xiao, P., Cui, X., & Chen, X. (2020). Influence of CeO₂ content on WC morphology and mechanical properties of WC/Ni matrix composites coating prepared by laser in-situ synthesis method. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 11111–11120. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.104>
- Shukla, V., Jayaganthan, R., & Tewari, V. (2016). Degradation behaviour and microstructural characterisation of HVOF-sprayed Cr₃C₂-NiCr cermet coatings in molten salt environment. *International Journal of Materials and Product Technology (IJMPT)*, 53(1), 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.048>

- Sidhu, T. S., Prakash, S., & Agrawal R. D. (2006). Hot corrosion and performance of nickel-based coatings. *Current Science*, 90(1), 41–47. https://www.researchgate.net/publication/228654817_Hot_corrosion_and_performance_of_nickel-based_coatings
- Siegmanna, S., & Abertb, Ch. (2013). 100 years of thermal spray: About the inventor Max Ulrich Schoop. *Surface and Coatings Technology*, 220, 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.10.034>
- Simunovic, K. (2010). *Thermal spraying*. In *Welding Engineering and Technology*. Eolss Publishers. <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-171-17-00.pdf>
- Singh, S., Goyal, D. K., Kumar, P., & Bansal, A. (2020). Laser cladding technique for erosive wear applications: a review. *Materials Research Express*, 7(1). IOP Publishing Ltd. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/ab6894>
- SK ProfMetallizacija. (2018, September 21). Ustanovka gazoplamennogo napylenija *Flame 88/30M*. <https://tsa-rus.ru/postavki-oborudovaniya/>
- Soffel, F., Papis, K., Bambach, M., & Wegener, K. (2022). Laser preheating for hot crack reduction in direct metal deposition of Inconel 738LC. *Metals*, 12(4), 614. <https://doi.org/10.3390/met12040614>
- Sousa, J. M. S., Pereira, F. R. M., Castro, R. M., & Curi, E. I. M. (2020). Abrasion resistance of Ni-Cr-B-Si coating deposited by laser cladding process. *Tribology International*, 143, 106002. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106002>
- Steen, W. M., & Courtney, C. (2013). Hardfacing of Nimonic 75 using 2kW continuous-wave CO₂ laser. *Metals Technology*, 6, 1979(1), 232–237. <https://doi.org/10.1179/030716979803276507>
- Steyer, Ph., Mendibide, Ch., Millet, J. -P., & Mazille, H. (2003). Improvement of high temperature corrosion resistance of tool steels by nanostructured PVD coatings. *Materials Science Forum*, 426(3), 2503–2508. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.426-432.2503>
- Sun, D-R., Wang, G., Li, Y., Yu, Y., Shen, Ch., Wang, Y., & Lu, Zh. (2024). Laser drilling in silicon carbide and silicon carbide matrix composites. *Optics & Laser Technology*, 170, 110166. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110166>
- Swaminathan, K., Naveenkumar, D. T., Zenkour, A. M., & Carrera, E. (2015). Stress, vibration and buckling analyses of FGM plates-A state-of-the-art review. *Composite Structures*, 120, 10–31. https://www.researchgate.net/publication/285776449_Stress_vibration_and_buckling_analysis_of_fgm_plates_-_A_state_of_the_art_review
- Šalna, V.A. (2003). *Optika*. Vilniaus universiteto leidykla.
- Šniuolis, R. (2014). *Medžiagų inžinerija: mokomoji knyga*. BMK leidykla.
- Škamat, J. (2013). *Vibracinio apdorojimo poveikis purkštųjų nikelio pagrindo dangų struktūrai ir savybėms* [Daktaro disertacija, Vilniaus Gedimino technikos universitetas]. <https://doi.org/10.20334/2175-M>
- Škamat, J., Černašėjus, O., Čepukė, Ž., & Višniakov, N. (2019). Pulsed laser processed NiCrFeCSiB/WC coating versus coatings obtained upon applying the conventional re-

melting techniques: Evaluation of the microstructure, hardness and wear properties. *Surface and Coatings Technology*, 374, 1091–1099. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897219307030>; <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.06.080>

Škamat, J., Černašėjus, O., Zhetessova, G., Nikonova, T., Zharkevich, O., Višniakov, N. (2021). Effect of Laser Processing Parameters on Microstructure, Hardness and Tribology of NiCrCoFeCBSi/WC Coatings. *Materials* 2021, 14(20), 6034. <https://doi.org/10.3390/ma14206034>

Tamulevičius, S., Vilys, J., Grigaliūnas, V., Meškinis, Š., & Guobienė, A. (2007). *Paviršiaus inžinerija ir nanotechnologijos: mokomoji knyga*. Vitae litera

Tan, H., Shang, W., Zhang, F., Clare, A. T., Lin, X., & Chen, J. (2018). Process mechanisms based on powder flow spatial distribution in direct metal deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 254, 361–372. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.11.026>

Tehrani, H. M., Shoja-Razavi, R., Erfanmanesh, M., Hashemi, S. H., & Barekat, M. (2020). Evaluation of the mechanical properties of WC-Ni composite coating on an AISI 321 steel substrate. *Optics & Laser Technology*, 127, 106138. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106138>

Tejero-Martin, D., Rezvani Rad, M., McDonald, A., & Hussain, T. (2019). Beyond traditional coatings: a review on thermal-sprayed functional and smart coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28, 598–644. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11666-019-00857-1>

Thiel, C., Hess, A., Weber, R., & Graf, T. (2012). Stabilization of laser welding processes by means of beam oscillation. *Laser Sources and Applications*, 84330. <https://doi.org/10.1117/12.922403>

Tillmann, W., Hagen, L., & Kokalj, D. (2017). Spray Characteristics and Tribo-Mechanical Properties of High-Velocity Arc-Sprayed WC-W2C Iron-Based Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 26(7), 1685–1700. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11666-017-0605-y>

Tillmann, W., Vogli, E., Baumann, I., Matthaeus, G., & Ostrowski, T. (2008). Influence of the HVOF gas composition on the thermal spraying of WC-Co submicron powders (-8 + 1 micron) to produce superfine structured cermet coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 17(5-6), 924–932. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11666-008-9234-9>

Tiwari, A., Seman, S., Singh, G., & Jayaganthan., R. (2019). Nanocrystalline Cermet Coatings for Erosion–Corrosion Protection. *Coatings*, 9(6), 400. <https://doi.org/10.3390/coatings9060400>

Tjong, S. C., & Chen, H. (2004). Nanocrystalline Materials and Coatings. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 45(1–2), 1–88. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2004.07.001>

Toyserkani, E., Khajepour, A., & Corbin, S. (2005). *Laser Cladding*. CRC Press LLC. <https://doi.org/10.1201/9781420039177>

- Ulčinas, O. (2016). *Mikrostruktūrų formavimas femtosekundine lazerine mikroapdirbimo sistema*. [Magistro projektas. Kauno technologijos universitetas].
- Valiulis, A. V. (2005). *Naujos medžiagos*. Technika, p. 80–98.
- Valiulis, A. V. (2008). *Welding and thermal cutting*. Technika. <https://doi.org/10.3846/971-S>
- Valiulis, A. V. (2010). *Šiuolaikiškos inžinerinės medžiagos. Kūrimas ir taikymas*. Vado­vėlis. Technika. <https://doi.org/10.3846/1142-S>
- Valiulis, A. V. (2012). *Pažangios inžinerinės medžiagos: savybės, gamyba ir taikymas*. Technika. <https://doi.org/10.3846/1262-S>
- Valkov, S., Ormanova, M., & Petrov, P. (2018). Surface manufacturing of materials by high energy fluxes. *Advanced surface engineering research*. <https://www.intechopen.com/chapters/62810>; <https://doi.org/10.5772/intechopen.79874>
- Vilyis, J., Tamulevičius, S., Grigaliūnas, V., Meškinis, Š., & Guobienė, A. (2007). *Paviršiaus inžinerija ir nanotechnologijos*. Vitae litera.
- Vostřák, M., Houdková, Š., Bystrianský, M., & Česánek, Z. (2018). The influence of process parameters on structure and abrasive wear resistance of laser clad WC-NiCrBSi coatings. *Materials Research Express*, 5(9). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/aad859>
- Vostřák, M., Houdková, Š., & Hruška, M. (2019). Comparison of WC and (TiW)C in nickel-based alloy coatings prepared by laser cladding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. In *5th International Conference Recent Trends in Structural Materials*, 461, 012092. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/461/1/012092>
- Vuoristo, P., Tuominen, J., & Nurminen, J. (2005). Laser coating and thermal spraying – process basics and coating properties. In *Thermal Spray 2005: Proceedings from the International Thermal Spray Conference, Paper No itsc2005p1270*, 1270–1277. <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2005p1270>
- Wang, C., Gao, Y., Zeng, Z., & Fu, Y. (2017). Effect of rare-earth on friction and wear properties of laser cladding Ni-based coatings on 6063Al. *Journal of Alloys and Compounds*, 727(15), 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.101>
- Wang, L., Gao, M., Zhang, C., & Zeng, X. (2016). Effect of beam oscillating pattern on weld characterization of laser welding of AA6061-T6 aluminum alloy. *Materials & Design*, 108, 707–717. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.053>
- Wang, Zh., Wang, K., Huang, H., Cui, X., Shi, X., Ma, X., Li, B., Zhang, Z., Tang, X., & Chiang, M. Y. M. (2018). Bioinspired wear-resistant and ultradurable functional gradient coatings. *Nano Micro Small*, 14(41), 1802717. <https://doi.org/10.1002/sml.201802717>
- Weng, J., Zuo, X., Liu, L., Wang, Zh., Ke, P., Wei, X., & Wang, A. (2019). Dense nano-columnar structure induced anti-corrosion CrB₂ coating with (001) preferred orientation deposited by DC magnetron sputtering. *Materials Letters*, 240, 180–184. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.01.002>

- Weng, Zh., Wang, A., Wu, X., Wang, Y., & Yang, Zh. (2016) Wear resistance of diode laser-clad Ni/WC composite coatings at different temperatures. *Surface and Coatings Technology*, 304, 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.06.081>
- Xia, Y., Chen, H., Liang, X., & Lei, J. (2021). Circular oscillating laser melting deposition of nickel-based superalloy reinforced by WC: Microstructure, wear resistance and electrochemical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, Part A, 1694–1704. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.074>
- Xu, J. S., Zhang, X. C., Xuan, F. Z., Wang, Z. D., & Tu, S. T. (2014). Rolling contact fatigue behavior of laser clad WC/Ni composite coating. *Surface and Coatings Technology*, 239, 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.11.005>
- Xu, P., Zhu, L., Xue, P., Meng, G., Wang, Sh., Yang, Zh., Ning, J., & Lan, Q. (2021). Multi-track alternated overlapping model suitable for variable laser cladding process parameters. *Surface and Coatings Technology*, 425, 127706. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127706>
- Xu, T., Tan, Y. F., & Liu, B. (2012). Tribological Properties of Ni-Base Alloy Coatings Reinforced by SiC Particles. *Advanced Materials Research*, 538–541, 181–185. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.538-541.181>
- Yan, S., Meng, Z., Chen, B., Tan, C., Song, X., & Wang, G. (2022). Prediction of temperature field and residual stress of oscillation laser welding of 316LN stainless steel. *Optics & Laser Technology*, 145, 107493. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107493>
- Yan, X., Chang, C., Deng, Zh., Lu, B., Chu, Q., Chen, X., Ma, W., Liao, H., & Liu, M. (2021). Microstructure, interface characteristics and tribological properties of laser clad NiCrBSi-WC coatings on PH 13-8 Mo steel. *Tribology International*, 157, 106873. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106873>
- Ye, F., Jiao, Zh., & Zhao, L. (2018). Effect of Y2O3 addition on the microstructure and properties of Ni60 additives by micro-plasma cladding. *Materials Research Express*, 6(2). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/aaf155>
- Zanzarin, S. (2015). *Laser cladding with metallic powder* [Doctoral Thesis. University of Trento – Department of Industrial Engineering]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Laser-cladding-with-metallic-powders-Zanzarin/9b2b2b88b62714d0b9cddb52c39315d19fcfe74>
- Zhang, G., Wang, C., Gao, Y., Wei, W., & Lu, X. (2014). Effect of rare earth La2O3 on the microstructure of laser cladding Ni-based coatings on 6063 Al alloys. *Chinese Journal of Lasers*, 41(11). https://www.researchgate.net/publication/286888938_Effect_of_rare_earth_La2O3_on_the_microstructure_of_lasercladding_Ni-based_coatings_on_6063_Al_alloys; <https://doi.org/10.3788/CJL201441.1103001>
- Zhang, J., Lei, J., Gu, Zh., Tantai, F., Tian, H., Han, J., & Fang, Y. (2020). Effect of WC-12Co content on wear and electrochemical corrosion properties of Ni-Cu/WC-12Co composite coatings deposited by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 393, 125807. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125807>

- Zhang, X., Chen, W., Bao, G., & Zhao, L. (2003). Improvement of weld quality with beam-weaving laser welding. In *Proceedings of the 22nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (ICALEO 2003). <https://doi.org/10.2351/1.5060030>
- Zhao, S., Yang, L., Huang, Y., & Xu, S. (2020). Enrichment of in-situ synthesized WC by partial dissolution of ex-situ eutectoid-structured WC/W₂C particle in the coatings produced by laser hot-wire deposition, *Materials Letters*, 281, 128641. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128641>
- Zhou, S., Zeng, X., Hu, Q., & Huang, Y. (2008). Analysis of crack behavior for Ni-based WC composite coatings by laser cladding and crack-free realization. *Applied Surface Science*, 255(5), Part 1, 1646–1653. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.04.003>
- Zhu, L., Sun, B., & Li, Z. (2020). The weld quality improvement via laser cleaning pre-processing for laser butt welding of the HSLA steel plates. *Weld World* 64, 1715–1723. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00949-5>
- Zohuri, B. (2021). Laser surface processing. In *Thermal Effects of High Power Laser Energy on Materials*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-63064-5>
- Zuo, J., & Lin, X. (2022). High-Power Laser Systems. *Laser & Photonics Reviews*, 16(5), 2100741. <https://doi.org/10.1002/lpor.202100741>

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Černašėjus, O., Škamat, J., Čepukė, Ž., Zhetessova, G., Nikonova, T., Zharkevich, O., Višniakov, N., & Berg, A. (2022). Oscillating laser post-processing of NiCrCoFeC-BSi/WC thermally sprayed coatings, *Materials* 2022, 15, 8041. <https://doi.org/10.3390/ma15228041>

Škamat, J., Černašėjus, O., Čepukė, Ž., & Višniakov, N. (2019). Pulsed laser processed NiCrFeCSiB/WC coating versus coatings obtained upon applying the conventional remelting techniques: evaluation of the microstructure, hardness and wear properties, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 374. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.06.080>

Straipsniai kituose leidiniuose

Čepukė, Ž., Černašėjus, O., & Škamat, J. (2018, June 14–15). Vliyanie lazernoy pereplavki na mikrostrukturu i svoystva kompozitsionnykh pokrytiy na osnove nikelya i karbidov volframa. In *Proceedings of the International scientific conference “Science integration, education and production – basis of the implementation of the plan of the nation” (Saginov readings No 10), Part V*, pp. 279–281. <https://etalpykla.vilniustech.lt/handle/123456789/150663>

Decker, Ž., Černašėjus, O., & Škamat, J. (2022). Issledovanie lazernoy pereplavki napylnennykh pokrytiy na osnove nikelya i karbidov volframa. In *Proceedings of the international scientific and practical conference "Integration of science, education and production – the basis for implementation of the national plan" (Saginov readings No 14)*, June 16–17, 2022, Part 2, pp. 147–149. <https://etalpykla.vilniustech.lt/handle/123456789/115780>

Decker, Ž., Černašėjus, O., Krencius, L., & Gulbinovič, A. (2023, June 16–17). Issledovanie vliyaniya lazernoï obrabotki na iznosostoïkost termicheski napylyaemykh pokrytiï Ni/Wc. *Proceedings of the International scientific and practical conference "XV Saginov readings. Integration of education, science and production"*, Part 3. Abylkas Saginov Karaganda Technical University, pp. 52–54.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

Metal coating forming technologies are one of the most important areas in materials engineering. The formation of protective coating layers is one of the most effective ways to protect the surfaces of parts from harmful environmental factors, save expensive components for the protection of parts, reduce operating and repair costs, and maximise the working resources of products.

Laser coating processing is one of the most effective methods for forming abrasion and surface wear-resistant coatings. This technology has attracted the attention of many researchers due to its advantages, such as high energy density, small deformation of the workpiece, and strong metallurgical bonding between the coating and the substrate. To meet the ever-increasing requirements of material performance, metals are coated with metal-ceramic composite coatings, such as iron-based coatings with tungsten carbide composite coatings, nickel-based coatings with titanium carbide composite coatings, and cobalt-based coatings with tungsten carbide composite coatings. Finding solutions for coating structure formation and the best coating components is one of the directions in the development of thermal spraying technologies. The structure of the coatings depends on the chemical composition of the sprayed materials, the choice of the spraying method, its parameters, subsequent processing of the coating and other factors. The quality of coating formation is one of the important factors limiting the development of laser processing, as problems and defects in coating formation are constantly encountered.

The relevance of the dissertation

In order to increase the hardness of the working surfaces of various products, resistance to abrasive wear, in the presence of corrosive media and high-temperature oxidation, this paper investigates nickel-based spray coatings (additionally remelted in an electric furnace and laser treated) applied in glass, oil refining, mining, chemical and other industries.

Currently, there is a lack of data on the influence of NiCrCoFeBSi+40% WC coating laser processing parameters on the integrity, phase composition, mechanical and operational properties of the remelted metal. This work aims to investigate the effect of laser processing on the structure and properties of sprayed and remelted Ni-WC coatings in the furnace and, by choosing the appropriate parameters of the laser coating technology, to form a coating resistant to wear and corrosion. The studies of composite coatings formed by laser processing described in the work will provide knowledge about the effect of laser processing of said coatings on the structure and properties of the coatings. Since there is a lack of data in the scientific literature on the influence of laser processing parameters on the formed coatings, this work is useful for creating a protective coating with good physical, mechanical, tribological and anti-corrosion properties.

The object of the research

NiCrCoFeCBSi-based coatings with tungsten carbides formed by a combination of thermal spraying, remelting of the coating in an electric furnace and laser processing.

The aim of the dissertation

To form a protective coating of Ni base with tungsten carbides by means of laser processing, characterized by good mechanical and operational properties in a corrosive and high-temperature oxidation environment.

The tasks of the dissertation

The following tasks had to be solved to achieve the aim of the work:

1. To create a combined, 3-stage (flame spraying, remelting in the furnace, and laser processing) technology for the formation of metal-ceramic coatings.
2. To investigate the influence of laser remelting of coatings on microstructure, hardness, microhardness, resistance to dry sliding wear and coefficient of friction of sprayed NiCrCoFeCBSi base with WC, formed by the thermal flame method.
3. To determine the influence of transverse fluctuations of the laser beam (up to 2 mm) used during laser processing on the microstructure, phase composition, microhardness, geometry and topography of laser-remelted tracks of NiCrCoFeCBSi base sprayed with WC and remelted in an electric furnace.
4. To determine the effect of preheating (up to 400 °C) before laser processing on the structural integrity of the formed coating metal, the shape and dimensions of the laser-remelted track, the surface irregularities, and the microhardness of the metal.

5. To investigate the combination of positive effects of laser processing parameters (laser processing speed and amplitude of transverse fluctuations of the laser beam) and preheating temperatures for NiCrCoFeCBSi base with WC sprayed and remelted coatings in the furnace and to provide recommendations for the formation of such coatings.

The research methodology

Analytical and experimental research methods and comparative analysis were applied in the dissertation. The work investigated NiCrCoFeCBSi base coatings with WC formed by thermal spraying, remelting in an electric furnace, and additional laser processing.

The structure and properties of the coatings were studied using modern research methods: microstructure optical microscopy, scanning electron microscopy, X-ray microanalysis, and X-ray diffraction analysis. The properties of the coatings were investigated by surface roughness measurements and surface topography studies, hardness and microhardness measurements, tribological properties studies and abrasive wear tests. Corrosion resistance, thermogravimetric and differential thermal analyses were also performed.

Scientific novelty

During the preparation of the dissertation, the following new results for the science of materials engineering were obtained:

1. The dependencies were determined by the shape and dimensions of the remelted track, surface micro-uniformities, and the nature of metal spalling of the sprayed, remelted in the furnace, and laser-treated Ni-WC coatings on the parameters of the laser processing, e.g., the amplitude of the transverse fluctuations of the laser beam, the speed of the laser processing, and the preheating temperature of the coating.
2. The relationships between the metal microstructure, phase composition, morphology, porosity, surface hardness, friction coefficient and resistance to dry sliding, abrasive wear, resistance to electrochemical corrosion and high-temperature oxidation of Ni-WC coatings with the method of coating formation.

The practical significance of work results

The results obtained in the work showed the influence of the laser processing parameters on the coating properties, so an industrial laser can be applied to this coating processing technology, which can ensure the optimal parameters of the laser processing described in the work (transverse fluctuations of the beam, processing speed and power). By applying the coating formation parameters and methods described in this work, it is possible to form coatings with a smooth surface, reinforced long-fibre structure, and more resistance to wear and corrosion. Many industries require parts with high wear resistance in order to maintain the working resource and service life of the parts as long as possible. Ultra-hard materials such as polycrystalline diamond, natural diamond and tungsten carbide are widely used in industry. These include machining tools and rugged microelectronic sub-

strates for extreme environments. On the other hand, tungsten carbide metal matrix composites are used in the mining industry to coat various drilling and digging parts and in agriculture to coat ploughs, tillage equipment and cutters. In the steel industry, tungsten carbide coatings are used as coatings for guide rollers. The oil industry also uses this type of coating in high-wear areas.

Defended statements

1. Laser-processed Ni-WC metal-ceramic coatings provide complete or partial, depending on laser processing parameters, dissolution of tungsten carbides in remelted track metal and the formation of a fine dendritic coating microstructure, which determines the hardness and tribological properties of the treated metal.
2. Laser processing technology of Ni-WC metal-ceramic coatings with transverse oscillations of the laser beam and preheating of the coating up to 400 °C allows the forming of a coating with low porosity and greater structural integrity with controlled shape and dimensions and homogeneous structure of treated metal tracks, which determines the formed coating exploitation properties (resistance to abrasive wear, electrochemical corrosion, high-temperature oxidation).

Approval of the work results

Five scientific articles have been published on the subject of the dissertation: two in *Web of Science* database publications, three in a peer-reviewed conference proceedings publication. Three theses have been published in other conference reports.

The structure of the dissertation

The dissertation consists of an introduction, three chapters, a summary of results, lists of literature sources and the author's publications.

The volume of the work is 150 pages, the text uses 4 numbered formulas, 53 figures and nine tables. In total, 189 literature sources were used in writing the dissertation.

1. Thermal spraying and laser surface processing technologies and their main characteristics

Spray coatings are coatings that are formed on the surface of the substrate during thermal spraying of materials melted in an electric arc discharge plasma or gas flame. Thermal spraying can cover a large surface area of the product in a very short time.

To increase the density of the coating and reduce porosity, the coating is remelted. Remelting of the coating can be done using gas flame, electric furnace, induction heating and laser remelting (Škamat et al., 2019). The coating remelting technology with laser radiation is characterised by the low porosity of the coating material and good adhesion to the substrate (due to good metallurgical connection), the low thermal effect of laser radiation on deeper layers of the substrate, the possibility of easy automation and robotisation of the coating formation, during the process, the coating is formed in an atmosphere of protective gas, and it is possible to adjust and manage the process mode parameters accurately and promptly. When applying subsequent laser processing of spray coatings, the

thickness of remelted coatings obtained is 10–1000 μm , and the width of the processing section of the coating formed in one pass is 1–7 mm (Hao et al., 2005; Manna et al., 2011; Škamat et al., 2019).

Laser cladding is an additive coating technology in which a high-energy laser beam is transmitted to the surface of the substrate, creating a melt coating. Additive material in the form of powder or wire is fed into the melt track, which forms a strong metallurgical bond with the substrate upon solidification (Reddy et al., 2018). During laser cladding, the laser energy is absorbed on the surface of the substrate material. Accelerated flow electrons transfer their energy to the lattice of the material when they collide with the substrate. The temperature of the sample increases. The duration of nanosecond pulses of laser radiation is longer than the duration of electron cooling and lattice heating, so the surface heat is distributed in the bulk of the material. A so-called heat effect zone is created in the material. The initial properties of the material in this zone change with increasing temperature. Internal and surface defects are formed, and material melting-crystallisation occurs (Balachninaïtè et al., 2016). The melting-crystallisation process of the material plays a very important role in the effect of laser radiation on the processed surface.

After the analysis of scientific literature sources, it was found that, by applying various MMC coating technologies, it is possible to form nickel-based coatings with tungsten carbides of different operational properties, but it is difficult to simultaneously ensure good adhesion of the coating and structural integrity of the metal, high resistance to wear, electrochemical and high-temperature corrosion, and good tribological properties. By applying various coating technologies, it is possible to form coatings with different operational properties that would be widely applicable in various industrial fields, but after evaluating the advantages and disadvantages of the applied technologies, it is appropriate to apply a two-stage (spraying and continuous remelting in an electric furnace) combined coating technology and possible additional laser coating processing. The remelting of the spray-formed MMC coating in an electric furnace can ensure good wettability of the molten coating metal on the surface of the substrate, self-diffusion of higher intensity coating and chemical elements of the substrate, and high adhesion of the metallurgical type coating. Laser processing of formed coatings with transverse oscillations of the laser beam can be one of the most effective methods to increase the performance of laser processing technology, to form remelted metal tracks of the desired shape and size, with better mechanical properties in the ceramic coating.

2. Metal ceramic nickel tungsten coating methodology, materials and testing methods

The methodology of the experimental research was created to clarify the effects of laser processing with transverse oscillations of the laser beam on the structure and properties of sprayed remelted nickel-based coatings with tungsten carbide ceramics. In the research, laser remelting experiments were carried out on pre-flame spray-coated samples with and without transverse oscillations of the laser beam of different magnitudes, as well as with and without preheating of the substrate before laser remelting. The morphology, microstructure and phase composition of the formed coatings were investigated, surface profilometry measurements of laser remelted coatings and studies of dimensions and shape of remelted coating tracks were performed, as well as metal hardness and microhardness

measurements of laser treated coatings, and tribology, corrosion resistance and wear tests of formed coatings. The results of the tests and measurements are compared to the results obtained by testing non-remelted coatings and coatings remelted using only the conventional remelting procedure (furnace remelting). Conclusions are formulated based on comparative analysis.

For laser remelting experiments, thermally sprayed coatings were deposited using a flame sputtering method and a mixture of Ni-based powders (particle size 38–125 μm): 60% nickel-based powder (62.2% Ni; 13.8% Cr; 11.8% Co; 7.9% B + Si; 3.9% Fe; 0.4% C) and 40% tungsten carbide powder. S235 JR brand hot-rolled structural steel was used for the substrate. Thermal spraying was performed using Rototec 80 (Castolin Eutectic) spraying equipment and Motoman 100 industrial robot manipulator.

The main parameters of the thermal spraying process are presented in Table S2.1.

To improve the adhesion of the sprayed coating to the substrate and to compact the deposited coating layer, the sprayed samples were heated (remelted) in an electric furnace W-50 (1450 $^{\circ}\text{C}$) and then cooled in the air at room temperature (e.g., 20 $^{\circ}\text{C}$). A heating temperature of 1300 $^{\circ}\text{C}$ and a heating time of 2.5 min were chosen based on the results of the previous research.

Table S2.1. Main parameters of the thermal spraying process

Description	Characterisation
Substrate heating	Neutral flame $\text{C}_2\text{H}_2/\text{O}_2 \sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$
Spraying flame	Neutral flame 0.07 MPa C_2H_2 / 0.4 MPa O_2
Spray distance	170 mm
Spray speed/pitch/layers	250 mm/s / 5 mm / 8 layers
The thickness of the sprayed layer	~ 1.2 mm
Acetylene pressure	0.65 bar
Oxygen pressure	4 bar

Experiments on laser remelting of deposited coatings were performed using a FA-NUCI® PRO 1500 fibre laser with a single-module fibre optic laser source and a PRO Wobble laser head with a moving laser beam, e.g., having the function of transverse oscillations of the laser beam. The main parameters of the laser processing process are presented in Table S2.2 below.

Table S2.2. Main parameters of the laser processing process

Description	Characterisation
Laser radiation mode	constant
Laser power	300 W
Laser wavelength	1070 nm
The diameter of the focused laser beam on the surface of the specimen	1 mm

End of Table S2.2

Description	Characterisation
Laser efficiency	>25%, e.g., the average laser beam power density during the experiments was >9554 W/cm ² in melt processing
Laser processing speed	250 to 1000 mm/minute
Transverse oscillation frequency	120 Hz
Amplitudes of transversal oscillations of the laser beam	1 mm and 2 mm (the maximum distance between the axe of the oscillating laser beam)
Protective gas	Argon (consumption – 15 litre/minute)

Optical microscopy studies were performed using an optical microscope, “Nikon Eclipse MA200”, with an integrated digital video camera, “Nikon Infinity 2”, and a software package for data processing. For microstructural analysis of the coatings, a scanning electron microscope SEM JEOL JSM-7600F (Japan) with an energy dispersive spectrometer IncaEnergy 350 (United Kingdom) for X-ray microanalysis was used.

Qualitative analysis of the phase composition of the coatings was performed using an X-ray diffractometer “SMART LAB” (Japan) upon applying the polycapillary optics method. Measurements of the surface irregularities of the coating remelted tracks were performed with a Mitutoyo CV-2100 contour gauge (Japan).

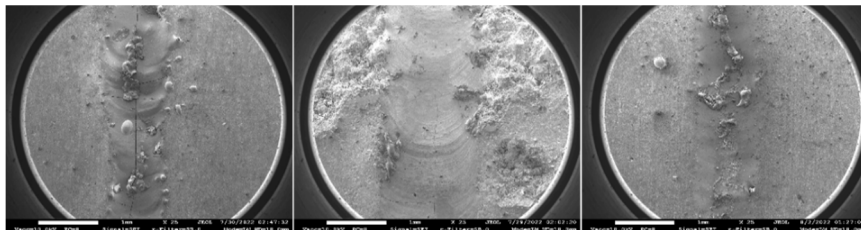


Fig. S2.1. Photographs of the tracks of the laser-treated surface (at different preheating temperatures – 20 °C, – 200 °C, – 400 °C; without transverse oscillations of the laser beam – 0 m; laser processing speed – 1000 mm/min)

Hardness was measured using a Mitutoyo HV-100 hardness tester (Japan). Measurements were performed by the Vickers method on the surface layers of coatings sprayed and remelted in an electric furnace as well as of coatings sprayed, remelted in an electric furnace and laser treated (transverse oscillations of the laser beam – 2 mm, processing speed – 500 mm/minute, preheating temperature – 400 °C) with a load of 1000 g (9.807 N) and a duration of 15 s. The microhardness test was performed using a microhardness measuring device, “Zwick Roell ZH” (Germany).

Dry sliding “Ball-on-Disc” tests were performed to evaluate the tribological properties of the coatings. The tests were performed using a Microtest tribometer. A disc friction machine, “2101 TP”, was used for abrasive wear tests. All specimens were weighed before the abrasion test and after each abrasion test. The samples were weighed with an analytical

balance “RADWAG AS 60/220.R2 PLUS” with an accuracy of 0.00001 g (measurement up to 60 g).

The corrosion resistance analysis was performed using a potentiostat/galvanostat “Autolab PGSTAT302” (Netherlands) with a compliance voltage of -30 V and a bandwidth of -1 MHz. Thermogravimetric analysis of coatings was performed with a simultaneous thermobalance device, “LINSEIS STA PT-1600” (Germany), which consists of a digital scale and a sample holder with an integrated thermocouple. Differential thermal analysis was performed using the LABSYS evo DTA/DSC – SETARAM (France) research platform.

3. Research of the effect of laser processing on the structure and properties of coatings

In this research, laser processing experiments were performed on coatings sprayed and remelted in an electric furnace (Fig. S3.1 (a)).

After the remelting process, the coating formed a monolithic metal layer with a reduced porosity (from $\sim 19.6\%$ in the non-remelted coating to $\sim 3.6\%$ in the coating remelted in an electric furnace). Due to the melting process during the laser processing, some of the phases formed in the metal of the nickel base coating were characterised by good wettability of the base surface and formed a continuous interface without gaps and pores (Fig. S3.1 (b)). The elemental distribution in the fusion line region showed an increased concentration of iron in the coating near the interface, indicating that the diffusion of iron atoms occurred and a strong metallurgical bond between the coating and the substrate was formed (Fig. S3.1 (c)).

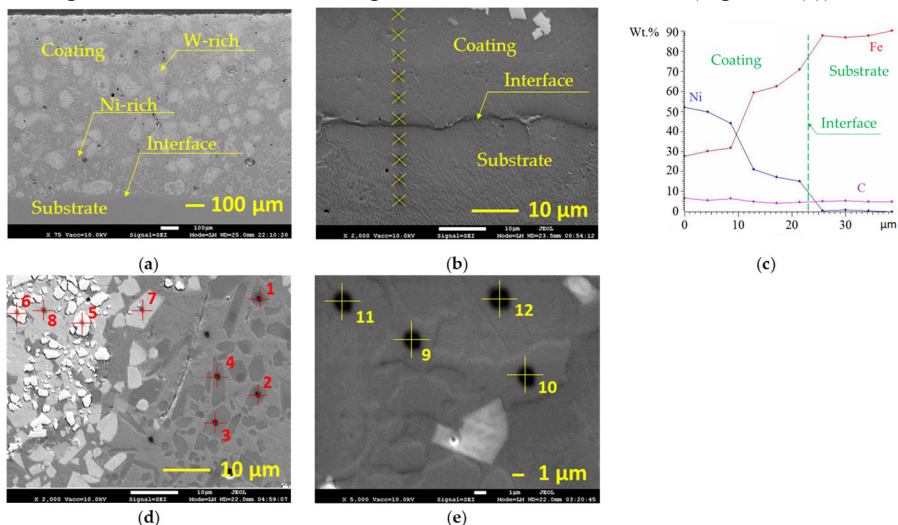


Fig. S3.1. SEM microstructure images of the furnace remelted coating (a), (b), (d), (e) and plot of element distribution across the coating-substrate interface: (a) general view of the furnace remelted coating; (b) magnified image of the coating-substrate interface area with marked EDS analysis points; (d) coating microstructure representing the distribution of different types of metal structure phases and solid inclusions with marked EDS analysis points; and (e) magnified image of the microstructure of the metal matrix with marked EDS analysis points

Figure S3.1 (d) shows a typical microstructure of a sprayed and furnace-remelted coating with various phases formed. The metal microstructure of the formed coating consists of at least three types of solid phases distributed in a two-phase metal matrix consisting of γ -Ni solid solution and Ni-B eutectic (Fig. S3.1 (e)).

The remelted metal tracks obtained during laser processing of the coating, formed without the use of transverse oscillations of the laser beam, with and without preheating, are shown in Figure S3.2.

All the laser-treated specimens without preheating showed significant spalling and cracking (Fig. S3.2–S3.4).

Considering the results of the literature review, two heating temperatures – 200 °C and 400 °C – were chosen in this research. During laser processing of a coating of nickel base with 40% tungsten carbides using 200 °C substrate preheating in the remelted metal layer, transverse cracks were formed in the base, but longitudinal cracks were also observed. Comparing laser processing without substrate preheating with 200 °C substrate preheating, it can be observed that substrate heating up to 200 °C did not effectively reduce coating cracking, although the predominant type of cracks (transverse or longitudinal) changed, and their amount decreased slightly. A more pronounced and visible reduction in crack formation was achieved when the samples were preheated to a temperature of 400 °C. Crack-free layers were obtained without transverse laser beam oscillations, while the number of cracks was significantly lower in layers produced with laser beam transverse oscillations, especially with 1 mm transverse laser beam oscillations (Fig. S3.2–3.4).

It was observed that by increasing the amplitude of the transverse oscillations of the laser beam, higher laser power is concentrated at the edges of the remelted track of the coating. In this way, a remelted metal track with an uneven shape and uneven thickness is formed (Fig. S3.4). Preheating the samples before laser processing to a temperature of 400 °C did not significantly affect the width of the melted tracks but led to an increase in the depth of the melted track up to ~40%.

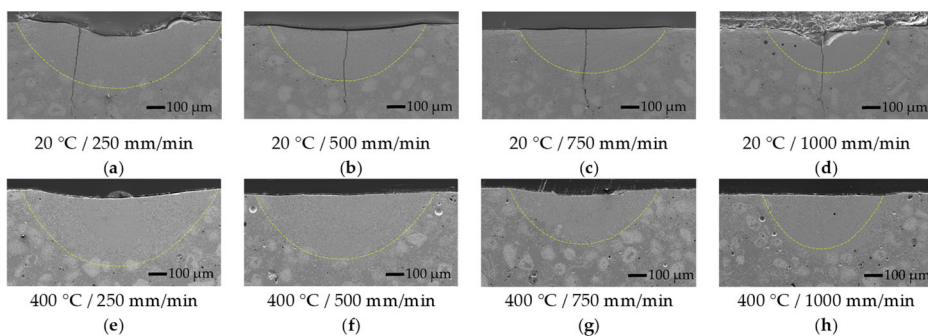


Fig. S3.2. Cross-sectional SEM micrographs of remelted tracks of the coating obtained without transverse oscillations of the laser beam and without preheating (a–d) and with preheating (e–h)

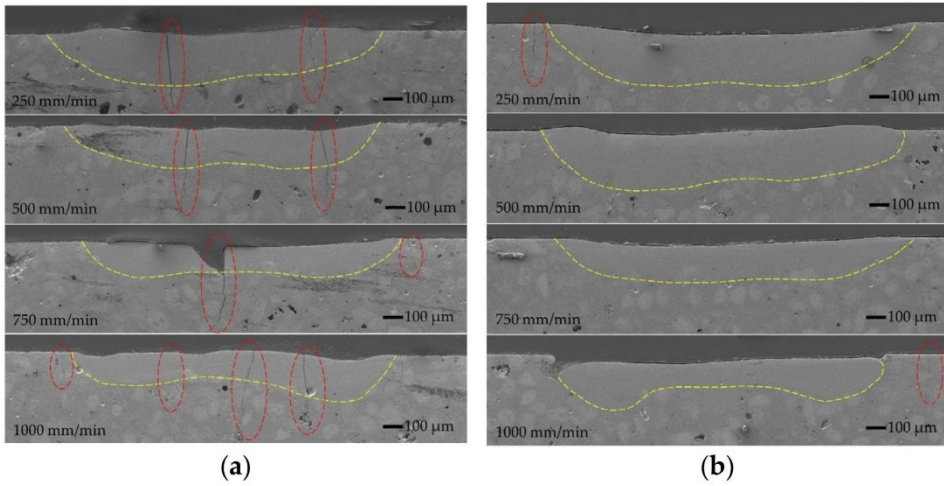


Fig. S3.3. Cross-sectional SEM micrographs of coating remelted tracks obtained using 1 mm transverse laser beam oscillations without preheating (a) and with preheating (b)

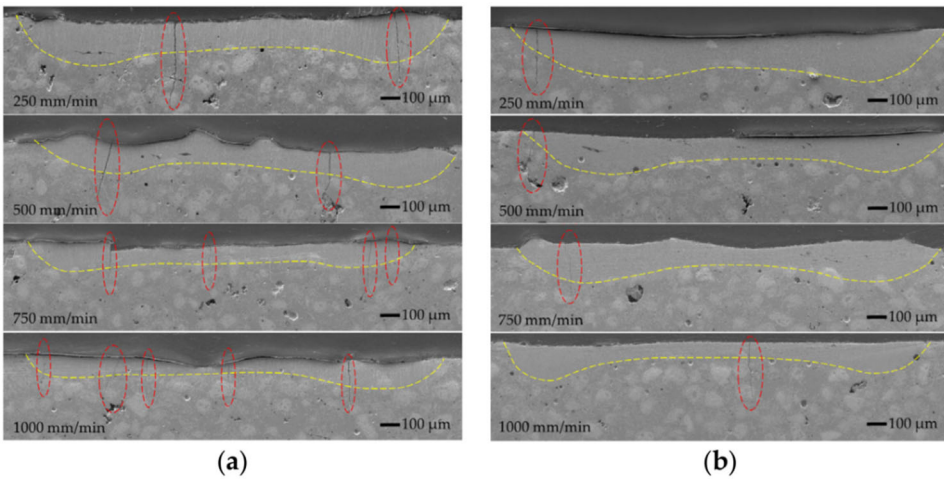


Fig.S3.4. Cross-sectional SEM micrographs of coating remelted tracks obtained using 2 mm laser beam transverse oscillations without preheating (a) and with preheating (b)

The formation of the microstructure of the laser-treated layers is determined by very fast cooling and solidification processes of the coating metal, which usually form an extremely fine micro- and/or nano-sized metal microstructure. The laser processing parameters of the nickel base with tungsten carbides used in this research also allowed the formation of a very uniform microstructure of the remelted metal (Fig. S3.5 and S3.6).

In the preheated, laser-treated samples, a transition of the remelted metal microstructure to a coarser and more developed dendritic morphology metal structure was observed.

Based on the results of X-ray diffraction analysis, the main reflections observed in the XRD pattern of the sputtered coating are attributed to the γ -Ni solid solution phase with a surface-centred cubic lattice of parameter $a = 3.545 \text{ \AA}$ and the tungsten carbide phase (WC). Based on the results of XRD, SEM and EDS analyses, it can be assumed that the solid deposits formed in the coatings after laser remelting mainly represent carbides of $M_{12}C$ type and, to a lesser extent, carbides of M_6C and M_2C types together with WC residues.

Using a preheat temperature of $200 \text{ }^\circ\text{C}$ and introducing and further increasing the amplitude of the transverse oscillations at laser processing speeds of $250\text{--}500 \text{ mm/min}$, a reduction in the maximum depth of track asperities is seen. Using a preheating temperature of $400 \text{ }^\circ\text{C}$ and high laser processing speeds, the introduction of transverse oscillations in the laser beam reduces the depth of irregularities.

As the speed is further increased, due to the smaller molten metal layer, the irregularities resulting from the transverse oscillations of the laser beam increase. Increasing the temperature made it possible to increase the thickness of the remelted coating, as a result of which the coarse microstructures of the carbides did not affect the processed surface of the coating.

Using transverse oscillations of the laser beam and obtaining a wider and shallower molten track, as well as taking into account the results of geometry, crack formation and microhardness tests, it can be observed that with 1 mm transverse oscillations, $250\text{--}750 \text{ mm/min}$ laser operation speed and preheating, there were satisfactory results obtained: wide and shallow molten tracks $\sim 200\text{--}350 \text{ }\mu\text{m}$ deep, microhardness ~ 1100 to 1200 HV0.2 , minimal cracks obtained.

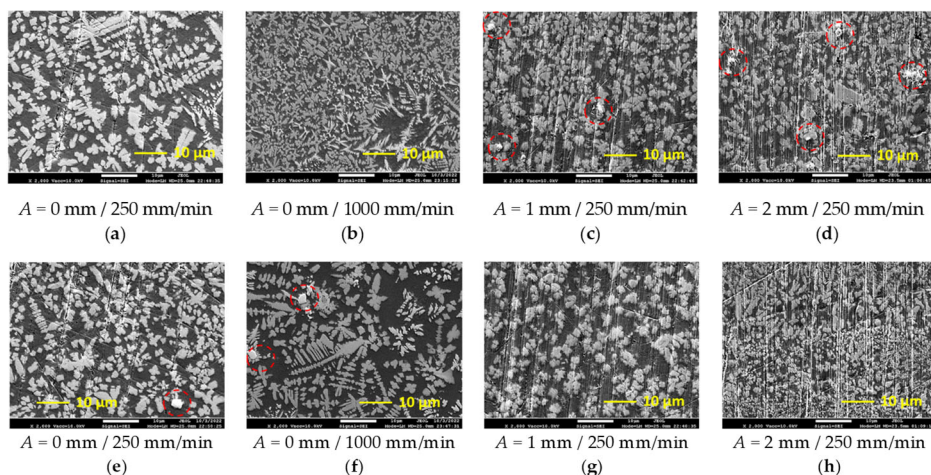


Fig. S3.5. Microstructure of the central (a–d) and edge (e–h) parts of the remelted tracks of the coating obtained by laser processing of the coating without preheating: (a), (b), (e) and (f) – without transverse oscillations; (c) and (g) – with 1 mm transverse oscillations; (d) and (h) – with 2 mm transverse oscillations; undissolved WC particles are marked with red circles

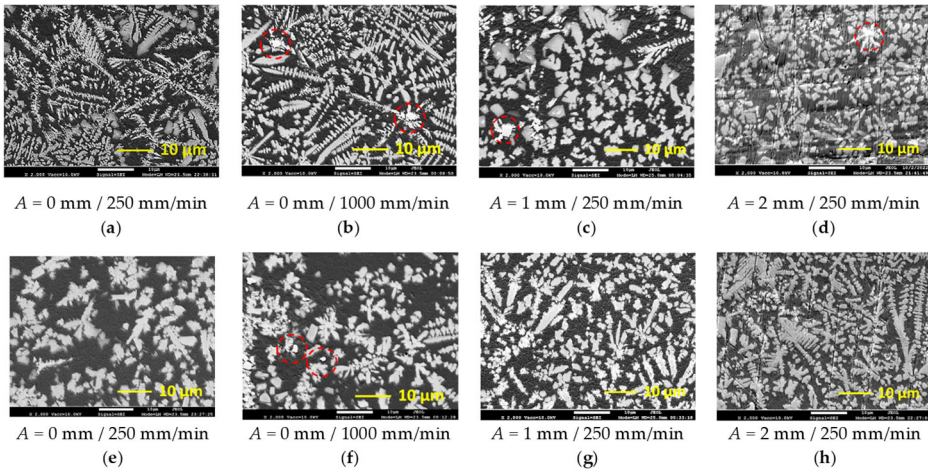


Fig. S3.6. Microstructure of the central (a–d) and edge (e–h) parts of the remelted tracks of the coating obtained by laser processing of the coating with preheating up to 400 °C: (a), (b), (e) and (f) – without transverse oscillations; (c) and (g) – with 1 mm transverse oscillations; (d) and (h) – with 2 mm transverse oscillations; undissolved WC particles are marked with red circles

An image of the wear traces after two body dry sliding tests is shown in Figure S3.7. As can be seen in Figure S3.7 (a), extensive delamination of the surface layers of the sprayed coating occurred during loading, which was preliminarily determined by the poor adhesion of the coating, followed by a significant decrease in mass and an increase in the coefficient of friction. After remelting in the furnace, the adhesion and hardness of the coating were improved, and a monolithic layer was obtained. Consequently, the pavement mass loss and friction coefficient were significantly reduced by ~26 times and ~22%, respectively, and the wear pattern changed. Based on Figure S3.7 (b), the surface showed signs of brittle crumbling (related to the non-uniform distribution of solid phases and their accumulation in the zones), while the smooth, thin layer showed the presence of cracks and delamination. It was found that the wear process was very uniform without losing large parts of the coating. The same was confirmed by the reduced mass loss and friction coefficient. With this laser processing speed, a minimal metal vaporisation effect and a sufficiently large melt volume are achieved. Using a preheating temperature of 400 °C and high laser processing speeds, the introduction of transverse oscillations in the laser beam reduces the depth of irregularities. As the speed is further increased, due to the smaller molten metal layer, the irregularities resulting from the transverse oscillations of the laser beam increase. At this preheating temperature, minimal dependence of the variation of the maximum roughness depth on the size of the transverse oscillations of the laser beam was observed. When remelting the coating with a laser and without the use of transverse oscillations of the laser beam, no increase in the irregularities of the remelted track was observed with increasing preheating temperature. Increasing the temperature made it possible to increase the thickness of the remelted coating, as a result of which the coarse

microstructures of the carbides did not affect the processed surface of the coating. Increasing the laser speed would likely result in an increase in asperity depth once the critical depth is reached.

The distribution of microhardness was studied in the direction of the depth and width of the molten track. Without the use of transverse oscillations of the laser beam, the microhardness of the molten track was highest in the middle and decreased towards the edges of the molten track. Melted tracks obtained using transverse oscillations of the laser beam showed a more uniform distribution of microhardness with a small hardness jump at the edges, less pronounced at 1 mm transverse oscillations and more pronounced at 2 mm transverse oscillations. A more visible local drop-in microhardness (900–950 HV0.2) can be observed at 2 mm transverse variations, which may be related to the depth of the molten track being too small and a more pronounced effect of WC distribution. Using transverse oscillations of the laser beam and obtaining a wider and shallower molten track, as well as considering the results of geometry, crack formation and microhardness tests, it can be observed that with 1 mm transverse oscillations, 250–750 mm/min laser operation speed and preheating, there were satisfactory results obtained: wide and shallow molten tracks ~200–350 μm deep, microhardness ~1100 HV0.2 to 1200 HV0.2, minimal cracks obtained.

An image of the wear traces after two body dry sliding tests is shown in Figure S3.7.

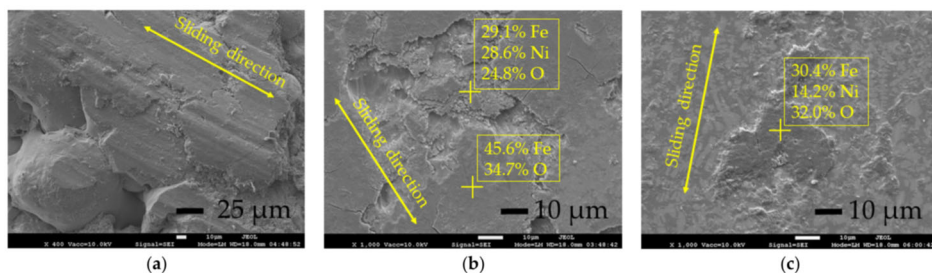


Fig. S3.7. SEM images of wear tests: sprayed coatings (a), sprayed and remelted in the furnace (b) and laser treated (c), elemental concentrations at the marked points in % by mass (by EDS)

Based on Figure S3.7 (a), extensive delamination of the surface layers of the sprayed coating occurred during loading, which was preliminarily determined by the poor adhesion of the coating, followed by a significant decrease in mass and an increase in the coefficient of friction. After remelting in the furnace, the adhesion and hardness of the coating are improved, and a monolithic layer is obtained. Consequently, the pavement mass loss and friction coefficient were significantly reduced by ~26 times and ~22%, respectively, and the wear pattern changed. According to Figure S3.7 (b), the surface showed signs of brittle crumbling (related to the non-uniform distribution of solid phases and their accumulation in the zones), while the smooth, thin layer showed the presence of cracks and delamination. It was found that the wear process was very uniform without losing large parts of the coating (Fig. S3.7 (c)).

Abrasive wear resistance tests of the coatings were carried out in a disc friction machine for three series of samples – sprayed coatings, sprayed and furnace remelted coatings, sprayed, furnace remelted, and laser treated coatings (laser processing speed – 500 mm/min, laser beam transverse oscillations – 1 mm, scanning pitch – 3.3 mm, preheating temperature – 400 °C). Both the results of the abrasive wear tests and the results of the dry sliding test showed a similar trend of increasing the wear resistance of differently treated coatings, e.g., the wear resistance of the coatings depends on the formation of a finer and more homogeneous microstructure of the remelted metal, the appearance of hard inclusions ($\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$, $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$, M_2C , M_6C , and M_{12}C) in the metal of the treated track and the hardness characteristics of the coating. By applying the combined coating technology, the hardness of the coatings was increased by about 79%, which made it possible to increase the resistance to abrasive wear as much as about 136 times compared to the only sprayed coating and about two times compared to the sprayed and furnace remelted coating.

During the research of the anti-corrosion properties of the tested coatings in a 1M H_2SO_4 solution and comparing the corrosion resistance of the samples, it was found that by the weight change method, it can be observed that the remelting of the sprayed coatings in an electric furnace, due to the less porous and more homogeneous structure of the coating, reduced the mass loss of the sample by about 272 times, and additional processing laser slightly increased mass loss.

Thermogravimetric and differential thermal analysis results support the assumption that the sprayed, remelted in an electric furnace and laser-treated coating is resistant to high-temperature oxidation and has a working temperature range of up to 750 °C.

General conclusions

1. Laser processing of thermally flamed spray coatings is an effective method of forming NiCrCoFeCBSi-based metal-ceramic coatings with WC, which results in the formation of a low-porosity specific fine-dispersed uniform metal microstructure in the treated coating, which increases the hardness and microhardness of the coating, improves the resistance to dry sliding wear, and reduces the coefficient of friction.
2. Laser processing of NiCrCoFeCBSi base with WC sprayed and remelted coatings in the furnace using transverse fluctuations of the laser beam up to 2 mm does not have a significant effect on the microstructure of the remelted metal, phase composition, microhardness of the coating metal and allows the formation of tracks of a larger width and thinner thickness of the remelted metal with a smaller maximum depth of irregularities on the surface of the track, so these coatings require less mechanical processing.
3. Preheating of the NiCrCoFeCBSi base with WC coatings to a temperature of 400 °C before laser processing:
 - prevented the formation of cracks in samples treated without transverse oscillations of the laser beam and reduced the number of cracks in samples with transverse oscillations;

- had no significant effect on the width of the remelted track of the coating metal, but the thickness of the remelted track increased to ~40%;
 - did not cause a visible decrease in the microhardness of the metal of the laser-treated coating.
4. For the laser processing of NiCrCoFeCBSi base with WC sprayed and remelted coatings, it is recommended to use 1 mm laser beam transverse oscillations, 500 mm/min laser processing speed and 400 °C heating temperature. Using the listed parameters, wide (about 2310 μm) and shallow remelted metal tracks with a flat bottom, uniform microstructure and hardness distribution, and a small (up to 35 μm) maximum depth of track surface irregularities are formed.

Recommendations

1. To form NiCrCoFeCBSi base with WC coatings of better structural integrity, quality and greater resource, it is recommended to pre-heat the coated product to a temperature of 400 °C before laser coating processing.
2. It is recommended to apply the combined metal-ceramic coating forming technology described in this work, which allowed the creation of a composite NiCrCoFeCBSi base coating with WC, characterised by good metallurgical type adhesion, low porosity up to ~1.4% and high microhardness of the processed coating metal up to 1310 HV0.2. The formed composite multifunctional coating has good resistance to abrasive wear, electrochemical corrosion in 1M H₂SO₄ medium, high-temperature oxidation and ensures reliable operation of coated parts up to a temperature of 750 °C.

Živilė DECKER

METALO KERAMINIŲ DANGŲ SU VOLFRAMO KARBIDAIŠ
LAZERINIS APDOROJIMAS IR TYRIMAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Medžiagų inžinerija (T 008)

LASER PROCESSING AND INVESTIGATION OF
METAL-CERAMIC COATINGS WITH TUNGSTEN CARBIDES

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Materials Engineering (T 008)

Lietuvių kalbos redaktorė Dalia Markevičiūtė
Anglų kalbos redaktorė Jūratė Griškėnaitė

2024 05 09. 14,3 sp. l. Tiražas 20 egz.
Leidinio el. versija <https://doi.org/10.20334/2024-030-M>
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
Spausdino UAB „Ciklonas“,
Žirmūnų g. 68, 09124 Vilnius