



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MEDŽIAGOTYROS IR SUVIRINIMO KATEDRA

Tomas Kuzma

**VIBROMECHANISKAI VEIKIAMŲ PERLYDIMO METU PURKŠTINIŲ
DANGŲ TYRIMAS**

**THE RESEARCH OF VIBROMECHANICAL TREATMENT OF
SPRAYED COATINGS DURING REFUSE PROCESS**

Baigiamasis magistro darbas

Medžiagų ir suvirinimo inžinerija, valstybinis kodas 62408T205

Pramonės inžinerija

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2011

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MEDŽIAGOTYROS IR SUVIRINIMO KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

A. V. Valiulis

(Vardas, pavardė)

(Data)

Tomas Kuzma

VIBROMECHANISKAI VEIKIAMŲ PERLYDymo METU PURKŠTINIŲ
DANGŲ TYRIMAS
THE RESEARCH OF VIBROMECHANICAL TREATMENT OF
SPRAYED COATINGS DURING REFUSE PROCESS

Baigiamasis magistro darbas

Medžiagų ir suvirinimo inžinerija, valstybinis kodas 62408T205

Pramonės inžinerija

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas doc. Olegas Černašėjus

(Moksl. laipsnis, vardas pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantė lekt. Angelika Petrėtienė

(Moksl. laipsnis, vardas pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis, vardas pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2011

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Mechanikos fakultetas

Medžiagotyros ir suvirinimo katedra

ISBN ISSN

Egz. sk. 1

Data 2011-06-01

Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Vibromechaniškai veikiamų perlydymo metu purkštinių dangų tyrimas**

Autorius **Tomas Kuzma**

Vadovas doc. dr. **Olegas Černašėjus**

Kalba

☒ x] lietuvių

☐ užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamos vibromechaniškai veikiamų perlydymo metu purkštinių NiCrBSi dangų savybės. Dangos pailgina mašinų, metalinių gaminių bei konstrukcijų eksploatacinį resursą, taupo medžiagas, apsaugo metalus nuo korozijos, agresyvios aplinkos poveikio.

Terminis purškimas – vienas populiariausių dangų dengimo būdų. Darbe pateikta terminio purškimo technologijų, purkštinių dangų savybių tyrimo metodų bei vibromechaninio apdorojimo taikymo apžvalga.

Dangų purškimui bei perlydymui naudotas robotizuotas stendas. Atlikti dangos mikrostruktūros, porėtumo, kietumo, mikrokietumo bei atsparumo dilimui tyrimai, suformuluotos darbo išvados.

Darbą sudaro šešios dalys: įvadas, literatūros analizė, eksperimentiniai tyrimai, tyrimų rezultatai, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 62 p. teksto be priedų, 24 iliustr., 15 lent., 35 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: terminis purškimas, vibracinis perlydymas, NiCrBSi miltelinė danga.

Vilnius Gediminas Technical University

Mechanics faculty

Material and Welding department

ISBN ISSN

Copies No. 1

Date 2011-06-01

Materials and Welding Engineering study programme master thesis.

Title: **The research of vibromechanical treatment of thermal sprayed coatings during refuse process**

Author **Tomas Kuzma** Academic supervisor **doc. dr Olegas Černašėjus**

Thesis language

☒ Lithuanian

☐ Foreign (English)

Annotation

In the final master thesis the research of vibromechanical treatment of thermal sprayed NiCrBSi coatings during refuse process is completed. Coatings prolong machines, metal products and constructions worktime, save materials and protect metals from corrosion and impact of aggressive environment.

Thermal spraying is one of the most common covering method. Review of thermal spraying techniques, methods of thermal sprayed coating properties analysis and application of vibromechanical treatment is given.

Robot was used for covering and refusing the coating. Coatings microstructure, porosity, hardness, microhardness and wear test analysis were done. Conclusions are formulated.

Structure: introduction, literature review, experimental researches, results, conclusions, references.

Thesis consist of 62 p. text without appendixes, 31 pictures, 15 tables, 35 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords: thermal spraying, vibromechanical refuse process, NiCrBSi powder coating.

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS	9
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	10
IVADAS.....	11
1. PROBLEMOS ANALIZĖ IR FORMULAVIMAS	13
1.1 Apsauginės dangos	13
1.1.2 Ni-Cr pagrindu sudarytos dangos	15
1.2 Metalinių dangų dengimo būdai	16
1.2.1 Metalinių dangų apsauginis veikimo mechanizmas	17
1.2.2 Metalų paviršiaus valymas	18
1.3 Purkštinių dangų susidarymas.....	20
1.3.1 Terminio purškimo technologija.....	21
1.3.2 Terminio purškimo privalumai ir trūkumai	27
1.4 Pagrindinės dangų savybės ir jų tyrimo būdai.....	28
1.4.1 Fizinių ir technologinių savybių tyrimo būdai.....	37
1.5 Vibromechaninių procesų taikymo analizė	39
2. VIBROMECHANISKAIS VEIKIAMŲ PERLYDYMO METU PURKŠTINIŲ DANGŲ TYRIMAS	43
2.1. Tyrimo objektas	43
2.2. Tyrimo metodika.....	44
3. TYRIMO REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS	47
3.1 Dangų mikrostruktūros tyrimai.....	47
3.2 Dangų kietumo matavimas.....	50
3.3 Dangų porėtumas	51
3.4 Dangų mikrokietumas	55
3.5 Dangų atsparumas dilimui	58
IŠVADOS	61
LITERATŪROS SĄRAŠAS	62
PRIEDAI	65

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Purškimo būdu gaunamų dangų paskirtis ir taikymo sritis.....	14
1.2 lentelė. Skirtingų terminio purškimo metodų charakteristikos.....	26
2.1 lentelė. Plieno S235J0 cheminė sudėtis.....	43
2.2 lentelė. Plieno S235J0 fizikinės savybės.....	43
2.3 lentelė. NiCrBSi miltelių cheminė sudėtis, %.....	44
2.4 lentelė. Substrato paruošimo bei purškimo parametrai.....	44
2.5 lentelė. Vibracinio apdorojimo parametrai.....	46
3.1 lentelė. Kietumo matavimo rezultatai, HV.....	50
3.2 lentelė. Porų skaičius bandiniuose, vnt.....	53
3.3 lentelė. Porų pasiskirstymas pagal dydį, vnt.....	53
3.4 lentelė. Dangų porėtumo vidutinės reikšmės, %.....	54
3.5 lentelė. Mikrokietumo matavimo rezultatai, x100 MPa.....	55
3.6 lentelė. Vidutinis dangos mikrokietumas, x100 MPa.....	56
3.7 lentelė. Mikrokietumas sulydymo linijoje, x100MPa.....	57
3.8 lentelė. Nudilusios dangos sluoksnis, μm (po 16 000 ciklų).....	59

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav.	Dangos formavimasis purškimo metu.....	20
1.2 pav.	Užpurkštos dangos mikrošlifo paruošimo technologija.....	21
1.3 pav.	Miltelinio liepsninio purškimo įrangos pavyzdys.....	22
1.4 pav.	Dujinio purškimo principinė schema.....	23
1.5 pav.	Dujinio purškimo dangos mikrostruktūra.....	23
1.6 pav.	HVOF purškimo principinė schema.....	24
1.7 pav.	Elektrolankinio purškimo principinė schema.....	25
1.8 pav.	Plazminio purškimo principinė schema.....	26
1.9 pav.	Bet kokio paviršiaus išdilimo kreivės bendras vaizdas.....	33
1.10 pav.	Deimanto padaryta rombo įspauda, matoma pro mikrokietmačio okuliarą.....	36
1.11 pav.	Ultragarso technologinis taikymas.....	42
2.1 pav.	Aušinamas juostinis pjūklas OPTIMUM.....	43
2.2 pav.	Infraraudonųjų spindulių termometras.....	44
2.3 pav.	Robotizuoto vibracinio dangų perlydymo stendo schema.....	45
2.4 pav.	Dujinio purškimo pistoletas „Rototec 80“.....	45
2.5 pav.	Terminio dujinio liepsninio purškimo perlydymo degiklis „CastoFuse“.....	46
3.1 pav.	Bandinių mikrošlifai.....	47
3.2 pav.	Neperlydytos dangos mikrostruktūra (padidinimas X500).....	48
3.3 pav.	Perlydytos dangos mikrostruktūra.....	48-49
3.4 pav.	Skersiniai bandinių pjūviai.....	50
3.5 pav.	Užpurkštų bei perlydytų dangų kietumas.....	51
3.6 pav.	Programos SCION IMAGE darbinis langas.....	52
3.7 pav.	Programos SCION IMAGE užfiksuotos poros.....	52
3.8 pav.	Porų skaičius bandiniuose.....	53
3.9 pav.	Porų pasiskirstymas pagal dydį	54
3.10 pav.	Dangų porėtumo vidurkis	54
3.11 pav.	Mikrokietumo matavimo rezultatai.....	56
3.12 pav.	Vidutinis dangos mikrokietumas.....	57
3.13 pav.	Mikrokietumas sulydymo linijoje.....	58
3.14 pav.	Trinties mašina.....	59
3.15 pav.	Nudilusios dangos sluoksnis (po 16 000 ciklų).....	59

IVADAS

Svarbiausias visų laikų medžiagų mokslo ir medžiagų inžinerijos tikslas – patobulinti jau naudojamas inžinerines medžiagas, atskleisti ar atrasti naujus reiškinius, medžiagas, sukurti prietaisus, surasti optimalius kuriamų medžiagų pritaikymo būdus. Medžiagų mokslo ir inžinerijos laimėjimai dažnai sukuria prielaidas proveržio kryptims tokiose srityse, kaip biomedicininė inžinerija, aplinkos inžinerija, informacinių technologijų inžinerija. Mokslininkai ir inžinieriai siekia kurti medžiagas ir prietaisus, geriausiai atitinkančius specialias eksploataavimo sąlygas. Kuriant naują medžiagą, pirmiausiai reikia surasti tinkamos sudėties medžiagą, ištirti jos struktūrą, sukurti pigiausias medžiagos gamybos ir apdorojimo metodus. Visa veikla paprastai apibendrinama medžiagos tinkamumo ir jos kainos santykiu [32].

Detalių patikimumas labai priklauso nuo paviršinio sluoksnio savybių – atsparumo dilumui, kietumui, korozinio atsparumo, ciklinio nuovargio. Keičiant paviršinio sluoksnio savybes, galima padidinti gaminių patikimumą ir ilgaamžiškumą, o kartu taupyti žaliavas ir energiją. Paviršinio sluoksnio savybes apibūdina kristalinės gardelės deformacija, liekamųjų įtempių dydis ir ženklas, kietis. Jeigu detalė apdorojama šiluminiais ar cheminiais metodais, paviršiniame sluoksnyje gali vykti struktūriniai ar faziniai virsmai, pasikeičia ir cheminė paviršinio sluoksnio sudėtis bei paviršiaus morfologija [30].

Dangos pailgina mašinų, metalinių gaminių ir konstrukcijų darbo trukmę, taupo medžiagas, apsaugo metalus nuo korozijos, agresyvios aplinkos poveikio.

Metaliniai gaminiai dažniausiai dengiami metalinėmis dangomis (purškiant, apdorojant termochemiškai, elektrofizikiniais ir elektrocheminiais būdais, naudojant įvairius koncentruotos energijos srautus, mišrius paviršių apdorojimo būdus ir t. t.), tačiau gali būti dengiami ir polimerinių ar įvairių kitų medžiagų kompozicinėmis dangomis, emaliais, lakais ir kt. Labai efektyvūs yra plazminiai dangų sudarymo metodai.

Darbo tikslas ir uždaviniai.

- ✓ Robotizuoto terminio purškimo stendo surinkimas ir terminio purškimo technologijos išbandymas.
- ✓ Vibracinio apdorojimo stendo purkštinių dangų perlydymo metu surinkimas ir vibracinio perlydymo technologijos išbandymas.
- ✓ Ni-Cr purkštinių dangų vibromechaninis perlydymas, esant skirtingiems vibracijos dažniams.
- ✓ Užpurkštų bei perlydytų dangų mikrostruktūros bei porėtumo tyrimas.
- ✓ Užpurkštų bei perlydytų dangų kietumo bei mikrokietumo tyrimas.
- ✓ Užpurkštų bei perlydytų dangų atsparumo išdilimui tyrimas.

Temos naujumas. Terminio purškimo technologija jau yra gerai ištirta ir įdiegta, tačiau vis dar nėra atlikta išsamių tyrimų apie vibromechaninį minėtųjų dangų apdorojimą perlydymo metu. Todėl yra svarbu nustatyti, kaip keičiasi purkštinių dangų savybės, jas paveikus mechaniniais virpesiais perlydant.

Darbo aprobacija. Kuzma T., Černašėjus O., Škamat J. Vibromechaniškai veikiamų perlydymo metu purkštinių dangų mechaninių savybių tyrimas. 14-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija. 2011 m. balandžio 21–22 d. Vilnius.

1. PROBLEMOS ANALIZĖ IR FORMULAVIMAS

1.1 Apsauginės dangos

Metallų paviršinīs sluoksnīs dengiamas norint pakeisti jo mechanines, fizikines–chemines savybes, suteikti jam atsparumo išorės poveikiui, pagerinti jo estetinį vaizdą ir t. t. Dangos turi būti gerai sukibusios su dengiamuoju paviršiumi, atsparios aplinkos poveikiui (temperatūrai, drėgmei, dujų įtakai, šviesai), neatsisluoksniuoti, darbo metu nekeisti suteiktų savybių [30].

Purškimo būdu sudaromi specialūs paviršiniai sluoksniai, restauruojami sudilę paviršiai, ištaisomi liejinių defektai, padengiami modeliai, statybiniai elementai, gaminamos fasoninės detalės, granuliuojami milteliai (**1.1 lentelė**) [31].

Purškimo būdu dengiami metalai, mediena, kartonas, gipsas, betonas, audiniai. Užpurškiamos metalinės, metalo keramikos arba keraminės medžiagos. Purškimo būdu galima dengti visų rūšių plienus, spalvotuosius metalus ir jų lydinius, keramiką, medieną, plastikus, audinius. Purškimo būdu gautos dangos apsaugo nuo oksidacijos, aukštatemperatūros arba cheminės korozijos, dujų arba kietųjų dalelių erozijos, izoliuoja šilumą, elektrą ir kt.

Norint padidinti metalo ilgaamžiškumą sudaromos dangos. Dangos gali būti metalinės, metalo junginių ir nemetalinės. Norint tinkamai parinkti dangą reikia įvertinti jos sudarymo būdą bei savybes, detalės paskirtį ir jos medžiagą, dangos poveikį jai (medžiagų suderinamumą), konstrukcijos eksploatavimo sąlygas (lengvos, vidutinės, sunkios, labai sunkios), geometrinę formą, supančios aplinkos cheminę prigimtį ir kt.

Metalinės dangos yra skirstomos į anodines ir katodines. Metallų naudojimą dangoms gauti riboja didelė jų kaina. Pigesnis metalas dažniausiai naudojamas kaip pagrindinis konstrukcinis elementas, o brangus – tik dangoms. Metalinės dangos izoliuoja metalą nuo agresyvios aplinkos. Katodinės dangos dengiamąjį metalą apsaugo tik tuomet, kai yra ištisinės (neporėtos) [31].

Nustatyti plonų dangų tribologines savybes yra nelengva. Dažniausiai vertinamas medžiagos pasipriešinimas įbrėžimui, abrazyviniam poveikiui, slydimo trintis, dilimas, smūginis dėvėjimasis pagal klasikinę medžiagos dėvėjimosi teoriją, svarbiausias parametras, lemiantis šią charakteristiką, yra medžiagos kietumas. Daugelis kietųjų medžiagų turi didelį tamprumo modulį, tačiau taip pat žinoma, kad daugelis polimerų turi didelį atsparumą dilimui, nors polimero tamprumo modulis yra labai žemas. Parametras, galintis įvertinti medžiagos atsparumą dilimui, galėtų būti medžiagos kietumo ir tamprumo modulio santykis (H/E). Šis santykis dar vadinamas medžiagos plastiškumo indeksu, arba tampriąja irimo deformacija. Didelis kietumas neleidžia medžiagai plastiškai deformuotis, tačiau jis taip pat nėra lemiamas veiksnys, gerinantis medžiagos smūginį tįsumą. Iš viso to matyti, kad norint pagerinti medžiagos atsparumą dilimui,

reikia vienu metu didinti medžiagos kietumą ir mažinti tamprumo modulį [32].

1.1 lentelė. Purškimo būdu gaunamų dangų paskirtis ir taikymo sritys [31]

Dangos cheminė sudėtis	Dangos paskirtis	Kam naudojamas gaminys
<i>Mašinų gamyba</i>		
Mo, plienas	Atsparumas dilimui	Staklių kreipiančiosios
Karbidai, nitridai, relitas, deimanto grupės medžiagos	Atsparumas dilimui, apdirbimo tikslumas, smūginis tūsumas	Pjovimo ir abrazyviniams įrankiams
Cr-Ni lydiniai, Al_2O_3	Cheminis ir mechaninis atsparumas kaitrai	Liejimo slegiant formoms
Al-Ni, Ti-Ni	Kad nesukibtų su liejiniu	
Cr-B-Ni-Si, Al_2O_3	Atsparumas dilimui, šilumos izoliacija	Presavimo matricoms
Al_2O_3	Cheminis atsparumas kaitrai	Stambių detalių liejimo formoms
Al_2O_3 , Mg Al_2O_3	Elektroizoliacija	Indukcinio litavimo induktoriams, suvirinimo mašinų prispaudimo detalėms, elektrinių kaitinimo krosnių detalėms
Al_2O_3 , Mg Al_2O_3 , ZnB	Cheminis atsparumas kaitrai	Vakuuminio dengimo aparatų garintuvams
Karbidai	Atsparumas dilimui, patvarumas	Matavimo įrankiams
Al_2O_3 , ZrO_2	Cheminis atsparumas kaitrai	Aukštatemperatūrėms vamzdinėms metalinėms konstrukcijoms
Al_2O_3	Paviršių šiurkštumui didinti	Kalvių, presavimo ir terminių cechų grindų plytelėms
Mo, Ag-Cu lydiniai	Kad lituojant lydmetalis pasiskleistų tolygiai	Keraminams ar kitiems sunkiai lituojamiems gaminiams
Cr_2O_3	Ventiliatorių mentės	Apsaugai nuo korozijos, kai dirbama sieros rūgšties garuose
<i>Transportas</i>		
Al_2O_3 , Al-Ni, Mo, ZrO_2 , metalų keramika Ceo-LaO	Šilumos izoliacija, cheminis atsparumas kaitrai	Stūmoklių dugnams, degimo kamerų paviršiams
Mo, Ti-Ni, Al-Ni	Sandarumas, atsparumas dilimui	Stūmoklių žiedams
Mo, angliniai plienai	Atsparumas dilimui	Variklių cilindrams
Cr-B-Ni-Si, Cr, Ti	Atsparumas dilimui	Slydimo guoliams, siurblių kreipiančiosioms
Cr	Apsauga nuo korozijos ir kavitacijos	Laivų sraigams
Al, Zn	Apsauga nuo korozijos	Laivų korpusams
<i>Kitų šakų mašinų gamyba</i>		
Al_2O_3 , Cr_2O_3 , Ti-Ni, Al_2O_3 - TiO_2	Atsparumas dilimui ir korozijai	Tekstilės mašinų detalėms
Cr	Atsparumas dilimui ir korozijai	Siurblių mentės cukraus gamybos pramonėje
Cr-B-Ni-Si, Cr	Atsparumas dilimui	Žaliavų smulkinimo peiliams (mėsmaalėms, malūnams)
Cr-B-Ni-Si	Atsparumas dilimui	Plytų formavimo mašinų elementams
70% Ni + 30% Al	0,02-0,05 mm storio tarp sluoksniai 0,15-0,30 mm storio dangos detalių patvarumui (iki 100 kartų) padidinti	Sluoksnių sukibimui tarp oksidų ir karbidų pagerinti Detalėms stiklo gamybos pramonėje
40% Ti + 60% Ni, CrO_2 + 10% CO	Tarp sluoksniams, kur reikalingas didelis kietumas ir cheminis atsparumas kaitrai	Chemijos pramonės įrenginiams

1.1.2 Ni-Cr pagrindu sudarytos dangos

Nikelis

Nikeliui būdingas aukštas korozinis atsparumas, ypač kai atmosferoje nėra chloridų. Jis plačiai naudojamas kaip metalo danga chemijos pramonėje. Bandant atmosferoje pastebėtas greitas padulsėjimas (patamsėjimas) ir lengva paviršutinė korozija, todėl atmosferos sąlygomis viena nikelio danga vartojama retai. Tuo pačiu metu nikelis plačiai naudojamas kaip apatinis pasluoksnis po chromu, kuris suteikia dekoratyvines ir apsaugines savybes detalėms iš plieno, cinko lydinių, vario lydiniais, naudojamiems automobilių pramonėje ir namų apyvokos metalo dirbiniais. Tačiau nikelio naudojamas šioje srityje yra ribotas dėl nikelio posluoksnio jautrumo pitingų susidarymui, kurie išsivysto chromo sluoksnio nevientisumo vietose ir galų gale sudaro kiaurinius pažeidimus iki pagrindinio metalo. Buvo sukurti tam tikri procesų variantai, kad pagerinti šių kompleksinių dangų atsparumą korozijai [4].

Chromas

Chromas atmosferos sąlygomis turi aukštą antikorozinį atsparumą, būdamas beveik inertišku daugumoje aplinkų, ir todėl jis naudojamas kaip plonas blizgus viršutinis sluoksnis kitų dangų atžvilgiu, kad kuo ilgesnį laiką palaikytų dekoratyvinį vaizdą. Šių dangų, gautų elektronusodinimo būdu, storis yra 0,3–1,3 μm . Mažas dangos storis neapsaugo nuo labai smulkių nevientisumų, kurių negalima pašalinti didinant dangos storį, nes tada nusodintas chromas savaime trūkinėja. Elektronusodinimo būdu gautos dangos sluoksnio įtrūkimai yra stimuliuojami ir nukreipiami naudinga linkme pakeičiant trūkinėjimo procesą į mikroįtrūkimų procesą (mikrolukštenimu). Gautos nuosėdos su mikrosluoksniavimais sudaro geresnę padengtų nikelio plieno ir cinko lydinių apsaugą atmosferos sąlygomis.

Chromas yra labai tvirtas (kietas) metalas su dideliu atsparumu dilimui, todėl yra plačiai naudojamas kaip metalinė danga inžinerinėse konstrukcijose. Šiems tikslams dangos dengiamos elektronusodinimo keliu, kuris leidžia uždengti keleto milimetrų storio sluoksnį. Šios storasluoksnės chromo dangos neišvengiamai turi smulkių įtrūkimų, dėl kurių gali atsirasti pagrindinio metalo korozija, tačiau eksploatuojant tai pasitaiko nedažnai. Daugeliu atvejų įtrūkimai net naudingi, nes eksploatacijos metu tuose darbinuose paviršiuose ilgiau išsilaiko tepalas [4].

Ni pagrindu sudarytos dangos pasižymi geru atsparumu aukštatemperatūrei korozijai. Atsparumas aukštatemperatūrei korozijai dar labiau padidėja, kada danga dar papildomai yra legiruota sunkialydziais elementais W ir Mo [13].

Ni-Cr dangos naudojamos kaip apsauginės dangos apsaugai nuo gėlavandenės korozijos. Ni-Cr-B pagrindu sukurtos dangos turi didelį kietumą, atsparumą dilimui bei korozijai. Ni-Cr-

Mo-B dangos užpurkštos didelio greičio liepsniniu dujiniu būdu, pasižymi geru koroziniu atsparumu bei dideliu kietumu (≈ 8 GPa). Toks kietumas gaunamas dėl to, kad yra sumaišoma amorfinė/nanokristalinė Ni matrica, kurioje yra nedidelis kiekis M_3B_2 (boridas) fazės [3].

Ni-Cr pagrindu sudarytos dangos naudojamos darbui aukštoje temperatūroje, esant agresyviai terpei (šiluminėse, atominėse elektrinėse ir pan.) [26].

1.2 Metalinių dangų dengimo būdai

Svarbiausi metalinių dangų dengimo metodai: galvanostegija, purškimas, karštas panardinimas ir difuzija. Yra ir kitų metodų, turinčių kai kurių teigiamų savybių ir ribotai panaudojimų kitose srityse:

- ✓ pakeitimo metodas;
- ✓ cheminis atkūrimas;
- ✓ mechaninis metodas;
- ✓ vakuuminis užpurškimas (apdulkinimas vakuume);
- ✓ nusodinimas iš dujinės fazės;
- ✓ katodinis purškimas (uždulkinimas);
- ✓ įtrinimas;
- ✓ plazminis purškimas (uždulkinimas) [4].

Užpurškiamų gaminių paviršių reikia rūpestingai nuvalyti, nuriebalinti, pašiurkštinti smėlio, smulkaus korundo srautu.

Iš pradžių apipurškiamos briaunos. Apipurškiant metalines detales, jas reikia iš anksto pakaitinti arba atšaldyti, kad sumažėtų užpurkšto sluoksnio ar sukibimo srities terminiai įtempiai. Kad sumažėtų šie įtempiai, kartais metalų paviršius padengiamas nikelio-titano, nikelio-aliuminio, nikelio-chromo sluoksniu, ant kurio vėliau purškiama pagrindinė danga. Mažiausias dangos storis priklauso nuo purškiamų dalelių matmenų. Kai naudojami 5–20 μm granuliuoti milteliai, tuomet gaunamos 15–20 μm storio dangos. Viršutinė dangos storio riba praktiškai yra neribota, bet, didėjant dangos storiui, joje didėja plėšiantys dangą nuo substrato vidiniai įtempiai. Iš anksto pakaitinus arba atšaldžius purkščiamus paviršius, panaudojus tarpsluoksnius, plokščių paviršiuje gaunamos 1–2 mm, o sukimosi kūnų paviršiuje net 20–30 mm storio dangos. Nors dangų storis yra neribotas, bet storos dangos ne visada ekonomiškos. Jas nepalankiai veikia vidiniai įtempiai.

Dujų sraute išsilydžiusios dalelės atsitrenkia į detalę ir beveik akimirksniu susikristalيزuoja. Užpurkšta danga susideda iš daugybės smulkių žvynelių, susidariusių atsitrenkus lašeliams, tarp kurių pasitaiko tuštumų, porų. Kartais porėtos dangos ir reikalingos

(filtrams, šilumos izoliacijai).

Užpurkštų dangų storis kartais siekia dešimtis milimetrų. Kuo storesnė danga, tuo mažesnis jos sukibimo su pagrindu stiprumas, nes, esant dangos ir pagrindo skirtingai temperatūrai ir skirtingam temperatūriniam plėtimosi koeficientui, atsiranda įtempiai.

Apdirbus termiškai, sukibimas su pagrindu kartais pagerėja [31].

Apsauginės metalinės dangos su metalu gerai sukimba tuomet, kai jos dengiamos ant gerai nuvalyto metalo paviršiaus. Paviršiui valyti naudojami būdai:

- ✓ mechaninis;
- ✓ cheminis;
- ✓ elektrocheminis.

Mechaninis valymas. Mechaniškai paviršius valomas plieniniais šepečiais, šratų arba smėlio srove, šlifuojamas abrazyviniais diskais, poliruojamas veltinio diskais panaudojus įvairias poliravimo pastas. Dengiant poliruotą metalo paviršių gaunamos blizgančios dangos.

Riebalų pašalinimas. Augaliniai ir gyvūliniai riebalai nuo metalo nutirpdomi šarmų tirpalais arba elektrocheminiu būdu, mineraliniai riebalai (parafinas, vazelinas ir kt.) – benzinu, žibalu, trichloretanu.

Metalo oksidų šalinimas. Juodųjų metalų oksidai išdinami sieros ir druskos rūgščių tirpalais arba elektrocheminiu būdu, jei paruošti paviršiai nėra tuojau pat dengiami, tuomet nuo jų reikės pašalinti naujai susidariusią oksidų plėvelę (šis procesas vadinamas dekapiravimu) [30].

1.2.1 Metalinių dangų apsauginis veikimo mechanizmas

Apsauginės metalinės dangos naudojamos šiems tikslams:

- ✓ neleisti arba sulėtinti pagrindinio metalo koroziją;
- ✓ pakeisti fizines arba mechanines pagrindinio metalo savybes;
- ✓ gauti ir palaikyti tam tikrą dekoratyvinę išvaizdą.

Iš pradžių dangos medžiaga parenkama pagal pagrindinio metalo fizinių ir mechaninių savybių pakeitimą arba dekoratyvinės išvaizdos gavimą. Reikiamoms savybėms užtikrinti reikia atsižvelgti į sistemos danga-metalas lydinio korozinį elgesį, nes jis gali daryti poveikį norimų savybių išsaugojimui. Vadinasi, visais atvejais, kur naudojama apsauginė metalinė danga, būtina kruopščiai tikrinti dangos ir pagrindinio metalo korozines charakteristikas.

Pagrindinis metalas pasirenkamas atsižvelgiant į kainą, masę ir bendras fizines, mechanines ir technologines savybes. Šios savybės paprastai lemia labai ribotą galimų medžiagų kiekį, kurių jokia negali būti ideali korozinės aplinkos, dažnos eksploatacijos sąlygomis, atsparumo atžvilgiu. Idealiu atveju apsauginės dangos metalas turi visiškai anuliuoti korozinės

aplinkos poveikį pagrindiniam metalui, ir tada galima analizuoti tik pačios dangos atsparumą korozinei aplinkai. Tačiau praktikoje pasitaiko dangos nevientisumo atvejų, kurie gali atsirasti dėl mechaninio suirimo arba dėl dangos korozijos. Šiuo atveju korozinės bimetalinės sistemos charakteristikos turi būti svarbiausios [4].

1.2.2 Metalo paviršiaus valymas

Geros kokybės dangas, ypač iš dujinės fazės, galima sudaryti tik tinkamai paruoštame gaminio paviršiuje. Dėl drėgmės, riebalų ir kitų nešvarumų dangoje atsiranda defektų, mažėja jos sukibimas, o dengiant elektrocheminiu būdu, danga gali iš viso nesusidaryti. Paruošimo metu nuo paviršiaus nuvalomi oksidai, riebalai, rūdys ir kiti nešvarumai, pašalinama drėgmė.

Dangos kokybei didelę įtaką turi ir paviršiaus šiurkštumas. Didelis šiurkštumas gerina dangos sukibimą, nes didėja realus dangos ir paviršiaus sąlyčio plotas. Šiurkštaus paviršiaus mikronelygumų viršūnės, veikiamos išlydytų dalelių srauto, įkaista labiau nei lygus paviršius. Tai didina sąveikos laipsnį, gerina sukibimą.

Paviršiai prieš padengimą ruošiami mechaniniais, terminiais, cheminiais, elektrocheminiais ir fizikiniais būdais. Dažnai šie būdai taikomi kartu. Ypač efektyviai paviršiai nuvalomi, kai plovimas ir tirpdyimas derinamas su mechaniniu poveikiu. Paruošimo būdas parenkamas atsižvelgiant į padengimo būdą, medžiagas ir jų darbo sąlygas, dangų apdorojimo būdą ir kitus veiksnius.

Cheminis būdas tinka rūdims, seniems dažams, nuodegoms ir nuovioms valyti. Rūdys pašalinamos rūgštiniais (sieros, druskos, azoto rūgščių vandeniniais tirpalais su inhibitoriais) ir šarminiais reagentais. Elektrolitiniu ėsdinimu detalės ruošiamos padengti galvaninėmis dangomis.

Riebalai ir organiniai teršalai taip pat šalinami plaunant organiniais tirpikliais (žibalu, benzinu, dyzelinu, acetonu, benzolu, trichloretilenu, perchloretilenu, ksilolu), organinių tirpiklių vandeninėmis emulsijomis, vandeniniais neutraliais, šarminiais arba rūgštiniais tirpalais. Pašalinus riebalus detalės nuplaunamos karštu vandeniu.

Mechaniškai paviršius prieš dengimą dažniausiai valomas smėlio srautu (pneumosrautis valymas), smėlio ir vandens srautu (hidraulinis smėliasrautis valymas), šratų srautu, šveičiamas šepečiais, šlifuojamas būgnuose, poliruojamas. Apdorojant smėlio srautu, paviršiui suteikiamas šiurkštumas, gerinantis dangos sukibimą su pagrindiniu metalu. Naudojami 0,5–2,5 mm smėlio, silicio karbido, lydyto aliuminio oksido grūdėliai. Hidraulinis smėliasrautis paviršių valymo būdas taikomas ruošiant didelių matmenų paviršius. Į paviršių nukreipiama stipri abrazyvo suspensijos srovė. Abrazyvas – tai elektrokorundas, kvarco smėlis, granitas, maltas šlakas,

stiklas ir kitos kietos smulkios 0,15–0,5 mm skersmens dalelės, o skystis – vanduo su aktyviosiomis medžiagomis tepalams pašalinti ir korozijos inhibitoriais.

Valant šratų srautu vietoj smėlio naudojami ne didesnio kaip 0,8 mm skersmens šratai. Taip šalinamos nuodegos, rūdys, suketinami detalių paviršiai. Atplaišos, oksidų plėvelės, ėsdinimo šlakas, rūdys šalinamos šveitimo šepečiais arba, jeigu detalės smulkios, supilamos į besisukančius būgnus, kur trindamosi viena į kitą nusivalo (kartais į būgną įpilama ir abrazyvinių medžiagų). Įdėjus specialiųjų užpildų, detales galima ir nupoliruoti.

Detales valant vibroabrazyvinių būdu, vibracinio įrenginio būgnas pripildomas detalių ir abrazyvinės terpės ir jam suteikiamas svyruojamasis judesys. Įkrova virpa, intensyviai maišosi sudėtingomis trajektorijomis ir detalės besitrindamos šlifuojasi ir poliruojasi.

Senus dažus, rūdis, šlakus, tepalus ir kitus teršalus galima pašalinti *terminiu būdu*, gaminius kaitinant krosnyje su oksidatoriais arba reduktoriais 500–600 °C temperatūroje, gamtinių dujų ir deguonies degiklio liepsna arba elektros lanku 1300–1400 °C temperatūroje. Rūdžių ir nuodegų temperatūrinis plėtimosi koeficientas nedidelis, todėl jos sutrūkinėja, atsisluoksniuoja ir tada lengvai nuvalomos. Šis būdas geriau tinka valyti storasieniams gaminiams.

Ultragarsiniu būdu labai gerai nuvalomi riebalai ir kitokie teršalai nuo sudėtingos konfigūracijos detalių, turinčių sunkiai prieinamų valyti vietų. Ultragarsiniam detalių valymui naudojami pjezoelektriniai arba magnetostrikciniai virpesių keitikliai. Detalės sudedamos į indą su hidroabrazyvine terpe ir indas įstatomas į vonią su skysčiu, kurios dugne įmontuoti virpesių keitikliai. Virpesiai nuo keitiklių paviršiaus per skystį perduodami hidroabrazyvinei terpei.

Apdorojant detales ultragarsu, padidėja jų paviršiaus kietumas ir sumažėja šiurkštumas, paviršiniuose metalo sluoksniuose susidaro liekamieji įtempiai. Detalių paviršiaus valymas ultragarsu geras tuo, kad ultragarso bangos kartu su abrazyvu patenka į visas sunkiai prieinamas sudėtingiausios konfigūracijos detalės vietas.

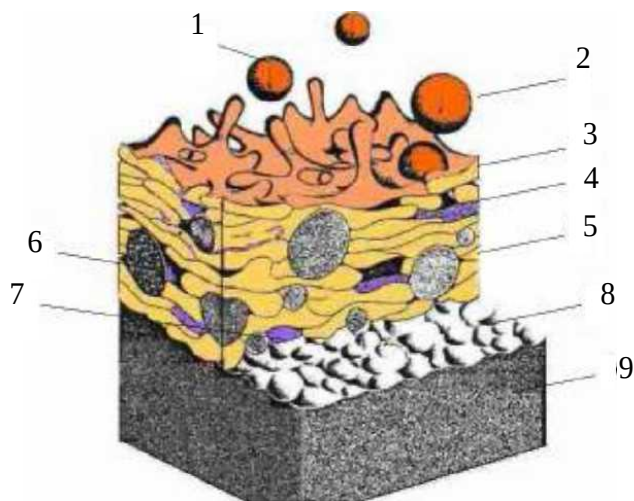
Paruoštas (aktyvintas) paviršius greitai praranda savo savybes, nes adsorbuoja dujas (oksiduojasi), drėgmę, todėl jį reikia padengti kuo greičiau: dirbant uždaroje patalpoje – per 6 valandas, atvirame ore – per 3 valandas, o labai drėgname atvirame ore – per 30 minučių. Paruošti paviršiai neturi liestis su tepalais ir kitais teršalais [30].

1.3 Purškinių dangų susidarymas

Purškiant terminio purškimo būdu, danga formuojama iš atskirų išlydytų ar artimų lydymosi temperatūrai dalelių, kurios dideliu greičiu bloškiasi ir sluoksniuojasi ant substrato paviršiaus. Substrato paviršius būna ne arčiau kaip 100 mm nuo degiklio tūtos galo.

1.1 pav. pateikta dangos susidarymo schema purškimo metu. Lėkdami link substrato skystos medžiagos lašeliai pasidengia oksidų plėvele. Susidurdami su substrato paviršiumi arba su anksčiau sudarytos dangos sluoksniu, lašeliai subliūkšta, formuodami ploną sluoksnį, mechaniškai sukimbantį ir susivirinantį su substrato arba dangos paviršiumi. Purškiant metalą lašelių aušimo greitis siekia 10^6 – 10^8 °C/s, o purškiant keramiką 10^4 – 10^6 °C/s, dėl to lašeliai kristalizuojasi per labai trumpą laiko tarpą.

Dalelių susijungimas įvyksta joms mechaniškai sukibant su substrato makronelygumais ir substratą dengiančio plono oksido sluoksnio pažeidimo vietomis. Oksidų plėvelės pažeidimo vietose vyksta lašelių susilydymas su substratu (mikrosusivirinimas). Tarp lašelių pasitaiko ir ne visai išsilydžiusių arba apsilydžiusių dalelių. Be to dangoje atsiranda dujomis užpildytų tuštumų, kurių kiekis lemia dangos porėtumą.

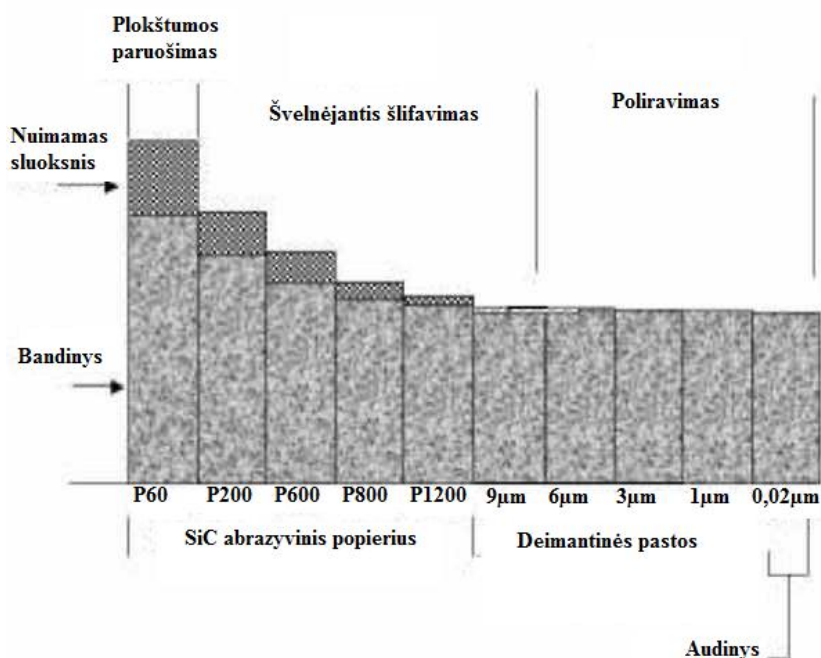


1.1 pav. Dangos formavimasis purškimo metu: 1 – oksidų plėvelė; 2 – purškiamos medžiagos lašeliai; 3 – susidūrę su paviršiumi ir subliūškę lašeliai; 4 – mechaninio sukibimo zona; 5 – lokalinio susilydymo zona; 6 – nepilnai išsilydžiusi dalelė; 7 – pora; 8 – substrato paviršius; 9 – substratas

Purškiamo metalo arba lydinio dalelės (priklausomai nuo jų giminingumo deguoniui) oksiduojasi skriedamos, dėl to dar iki susidūrimo su substrato paviršiumi dalelių paviršius pasidengia plona oksido plėvele. Atsitrenkus dalelei į substratą ir subliūškus, oksidų plėvelė ištyška ir dalelės paviršius toliau oksiduojasi, kol ant viršaus ją uždengia kita dalelė.

Oksidų atsiradimo paaiškinimas dangose, užpurkštose metalu ar metalų lydiniu, sukelia tam tikrų sunkumų. Mikrostruktūrinių tyrimų metu, siekiant pamtyti oksidus, mikrošlifą paruošti rekomenduojama be ėsdinimo (tekstūros išryškinimo), o mikrošlifo paruošimą atlikti

vadovaujantis **1.2 pav.** pateikta metodika. Tačiau po šlifavimo smulkios oksidų dalelės gali būti sunkiai pastebimos. Tuomet jų išryškinimui naudojamas lengvas ėsdinimas. Atsižvelgiant į gautos dangos cheminę sudėtį gali būti naudojami labai įvairūs ėsdinimo tirpalai. Pavyzdžiui, variu ir kai kuriomis bronzomis užpurkštuose paviršiuose dangoje esantys oksidai lengvai nustatomi mikrostruktūriniais tyrimais po mikrošlifo ėsdinimo amoniako tirpalu [6].



1.2 pav. Užpurkštos dangos mikrošlifo paruošimo technologija

Užpurkštosios dangos ryšys su pagrindine medžiaga yra sudėtingas. Medžiagos sukimba dėl to, kad veikia valentiniai ir Van der Valso ryšiai, susidaro mechaniški arba mikrosuvirintieji sujungimai. Gerai sukimba medžiagos, kai sukibimo stiprumas siekia 100 MPa, patenkinamai – kai 50 MPa. Šios reikšmės kelis kartus mažesnės už pačių medžiagų stiprumą. Ruošiant paviršius, reikia žiūrėti, kad nebūtų aštrių briaunų, kampų, plyšių. Dujų srautas su nešamomis dalelėmis turi kristi statmenai į apipurkščiamo gaminio paviršių. Kai srauto kritimo kampas mažesnis kaip 45°, dalelės nuslysta paviršiumi [31].

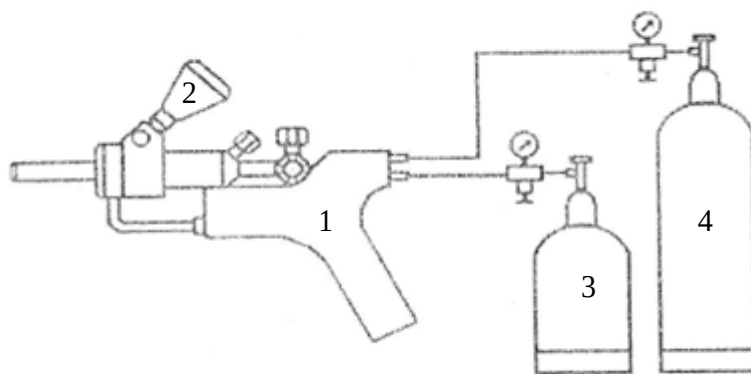
1.3.1 Terminio purškimo technologija

Terminis purškimas yra procesas, kai koncentruoto energijos šaltinio išlydyti maži medžiagos lašeliai dideliu greičiu yra bloškiami ant pagrindo, kristalizuojasi ir taip formuoja dangą. Nuo kitų technologinių procesų jis skiriasi technologijų savotiškumu ir taikymo sritimis (**1.2 lentelė**). Priklausomai nuo koncentruoto energijos šaltinio, kuris išlydo purškiamą medžiagą, terminio purškimo procesas skirstomas į *dujinį* ir *elektrolankinį*. Taip pat naudojamos

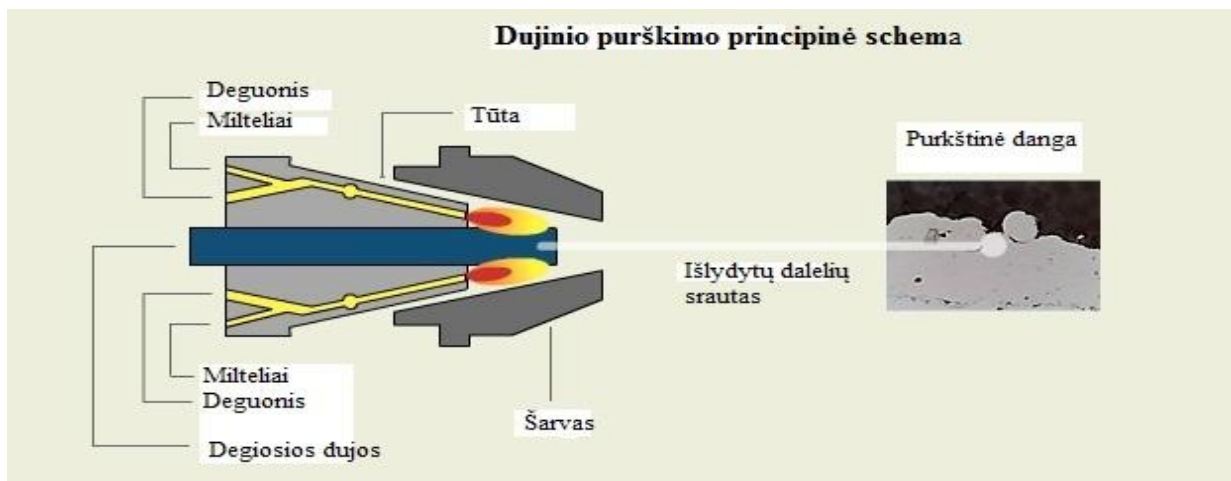
ir tokios technologijos, kada yra sujungiami keli koncentruotos energijos šaltiniai. Paminėtinas hibridinis liepsninis purškimas su CO₂ lazerio švitinimu [14; 27].

Dujinis purškimas, atsižvelgiant į purškiamos medžiagos rūšį, gali būti trijų tipų: dujinis purškimas naudojant vielą, dujinis purškimas naudojant strypelį ir dujinis purškimas naudojant miltelius (**1.3 pav.**). Purškiama medžiaga yra tiekama per centrinę degiklio angali angą ir išlydoma degiųjų dujų mišiniu. Išlydytas medžiagos daleles pagauna liepsnos srautas (išpurškimo kūgis) ir bloškia į gaminio paviršių. Maksimali temperatūra $t = 2600\text{--}3100\text{ }^{\circ}\text{C}$, o purškiamų dalelių greitis 30–100 m/s (**1.4 pav.**). Dangos medžiaga turi žemesnę lydymosi temperatūrą nei metalinis pagrindas, ant kurio purškiama danga. Kada danga yra nusodinama ant pagrindo, danga yra pakaitinama iki temperatūros tarp likviduso bei soliduso linijų. Vykstant pakaitinimui danga persilydo, susidaro tvirtas metalurginis ryšys. Atlikus dangų perlydymą, sumažėja dangų porėtumas (korytumas) bei mikrokietumas. Perlydimas praskiedžia dangą, kadangi dangoje vyksta tarpatominė difuzija. Mikrokietumas po perlydymo sumažėja net iki 50 %. Gaunamos tankios, gerai su pagrindu sukibusios dangos (**1.5 pav.**) [9; 25].

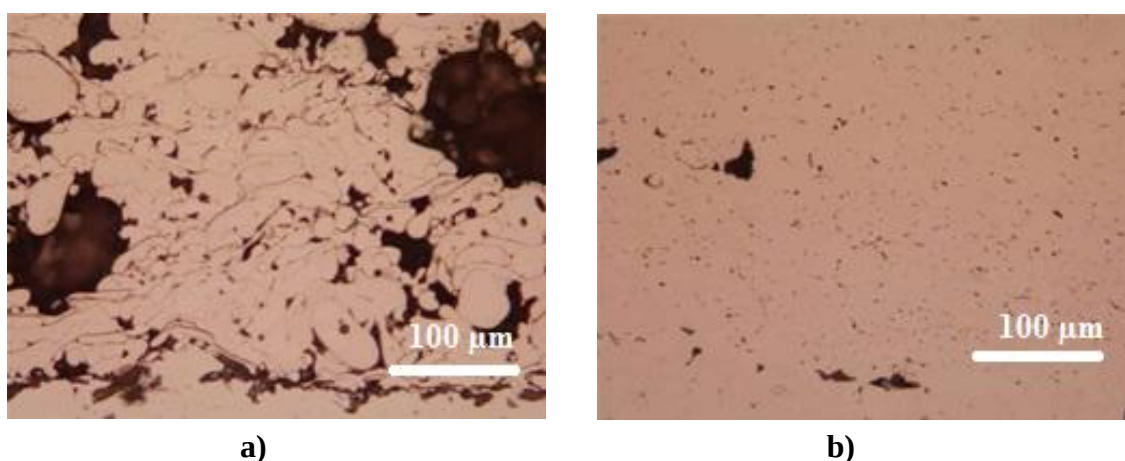
Dujinio purškimo pranašumai: palyginti su kitais purškimo būdais, dujinis purškimas pats paprasčiausias; procesas ekonomiškąs ir lengvai automatizuojamas; nesudėtinga aparatūra; galima purkšti net nesant elektros srovės; užpurškimo procesas netriukšmingas. Dėl šių pranašumų dujinis terminis purškimas plačiai taikomas gamyboje. Tačiau jis turi ir trūkumų: negalima purkšti kermetinių medžiagų (per daug žema liepsnos temperatūra); dangoje esti oksidų; ji būna netanki ir ne visada gerai sukimba su gaminiu. Norint padidinti dangos tankį ir sumažinti poringumą, po dujinio purškimo ji perlydoma. Tam tikslui, užpurškus reikiamo storio dangą, miltelių ar vielos tiekimas nutraukiamas ir paviršius kaitinamas to paties degiklio liepsna. Perlydymo metu neturi pradėti lydytis pagrindinis metalas [30].



1.3 pav. Miltelinio liepsninio purškimo įrangos pavyzdys: 1 – purkštuvas; 2 – miltelių bunkeris; 3 – deguonies balionas; 4 – degiųjų dujų balionas



1.4 pav. Dujinio purškimo principinė schema

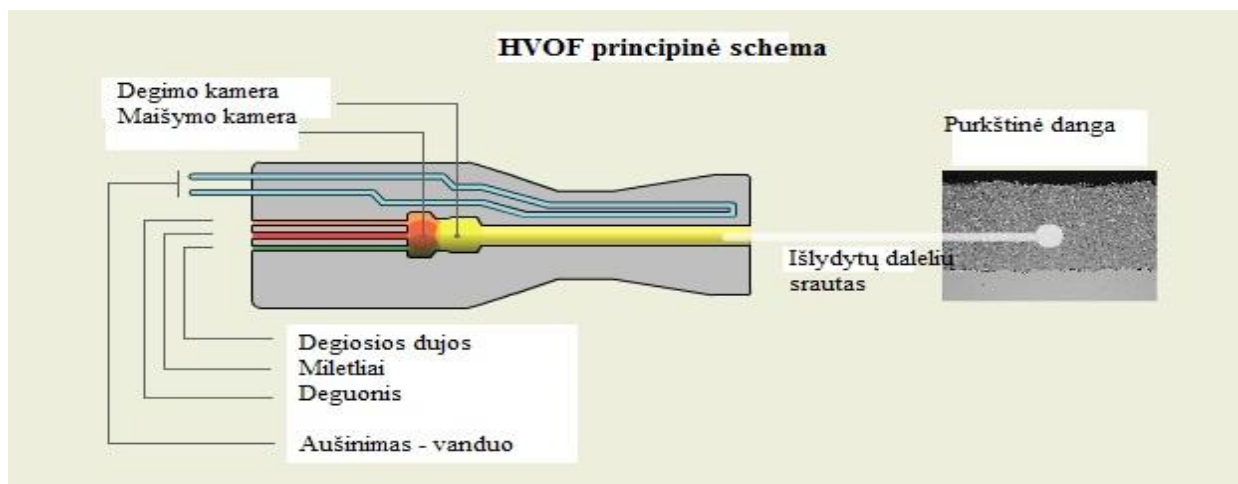


1.5 pav. Dujinio purškimo dangos mikrostruktūra: a – neatliktas dangos perlydymas; b – po dangos perlydymo

Didelio greičio dujinis liepsninis purškimas (HVOF – High Velocity Oxy - Fuel Spraying) – tai vienas naujesnių terminio purškimo būdų. Degimo procese su deguonimi dažniausiai naudojamos propano, propileno ar vandenilio dujos. Degančių dujų greitis gali viršyti garso greitį ($t = 2600\text{--}3000\text{ }^{\circ}\text{C}$; $v = 300\text{--}550\text{ m/s}$). Dėl didelio purškiamų dalelių greičio gaunamos tankios, mažai porėtos, gerai su pagrindu sukibusios dangos, neatliekant terminio apdorojimo **(1.6 pav.)** [10].

Purškimo metu išlydytos dalelės beveik nesioksiduoja, nes kai kinetinė energija yra didelė, dalelių nereikia įkaitinti iki lydymosi temperatūros ir jos karštame dujų sraute būna vos kelias milisekundes. HVOF gautos dangos esti atsparesnės abrazyviniam ir eroziniam dilimui negu plazminių būdu oro aplinkoje užpurkštos dangos, kadangi dalelės geriau sukimba su dengiamuoju paviršiumi ir danga būna ne tokia porėta, taip pat purškimo metu dangoje vyksta mažiau fazinių virsmų. Palyginti su kitais būdais, šiuo atveju purškimo metu medžiagos dalelės oksiduojasi mažiausiai, beveik tiek pat, kiek vakuuminio plazminio purškimo metu. Tačiau dėl

žemos fakelo temperatūros HVOF netinka purkšti keraminėms medžiagoms, kadangi didelio greičio dujų sraute dėl blogo šilumos laidumo dalelės nespėja įkaisti iki plastinės būklės [30].

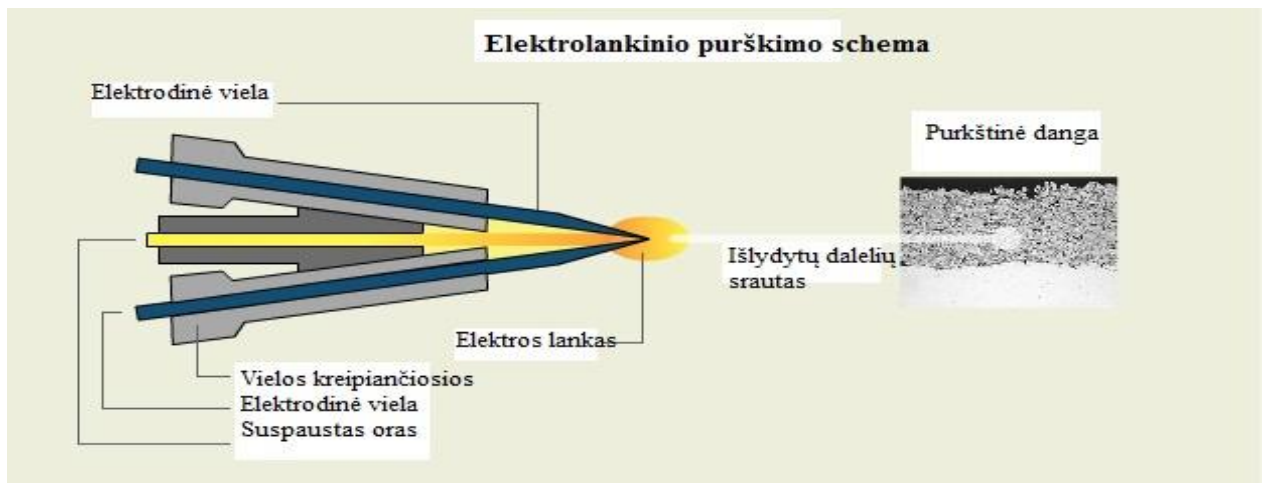


1.6 pav. HVOF purškimo principinė schema

Elektrolankinio purškimo atveju per du kanalus degiklyje nepertraukiamai tiekiamos dvi elektrodinės vielos, tarp kurių dega elektros lankas, ir šios vielos lydosi. Išlydytas daleles pagauna suslėgto oro srovė ir perneša dideliu greičiu ($v = 100\text{--}350\text{ m/s}$) formuojamos dangos ($t = 2600\text{--}6500\text{ }^{\circ}\text{C}$) link (1.7 pav.) [11].

Lankinis purškimas labai našus, eksploatacijos išlaidos nedidelės, dangos būna stipresnės ir geriau sukibusios už dujiniu būdu užpurkštas dangas, nes purškimo metu dalelės įkaista iki aukštesnės temperatūros ir susidūrusios su gaminiu geriau prisivirina. Naudojant skirtingos sudėties vielas, galima gauti kompozicines dangas. Lankiniai purškimo įrenginiai gali veikti tiek nuolatine, tiek kintamąja srove.

Tačiau lankinis purškimas turi ir trūkumų: galima purkšti tik elektrai laidžias medžiagas; purškimo metu išdega dalis elektrodų vieloje esančių legiruojančiųjų elementų (pvz.: anglies kiekis dangoje sumažėja 40–50 %, o silicio ir mangano 10,5–15 %); medžiagą išpurškiant ir pernešant suslėgto oro srautu, išlydytos dalelės sąveikauja su jame esančiais deguonimi ir azotu, todėl susidaro oksidai ir nitridai, kurie patenka į užpurškiamąją dangą; purškiamoji medžiaga perkaista ir, jei elektrodinės vielos tiekimo greitis yra mažas, danga oksiduojasi [30].

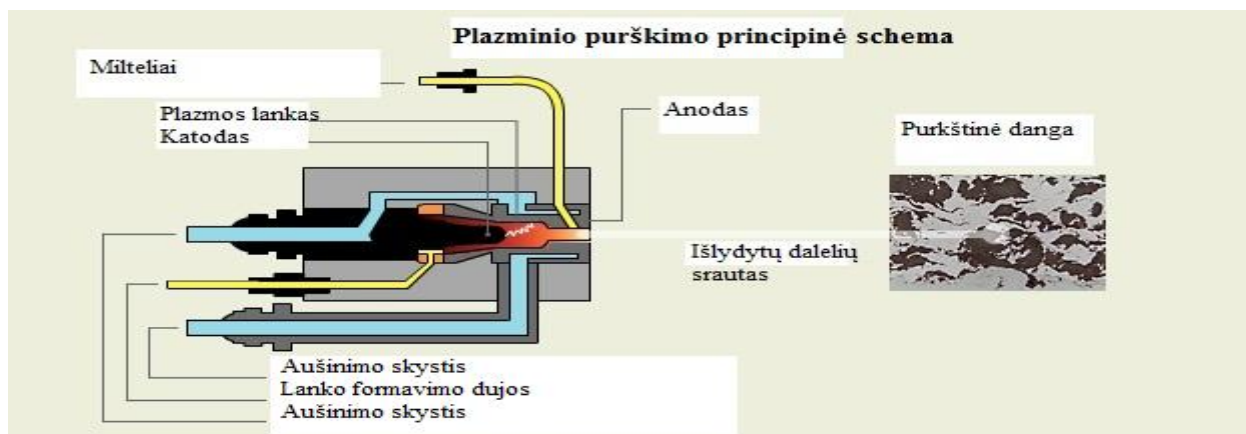


1.7 pav. Elektrolankinio purškimo principinė schema

Plazminis purškimas. Tarp katodo ir vandeniu aušinamos tūtos, kuri yra anodas, dega elektros lankas. Jis įkaitina tiekiamas į degiklio tūtą dujas, kurios išeina iš degiklio jau kaip plazmos srautas ($t > 10000\text{ }^{\circ}\text{C}$; $v = 100\text{--}400\text{ m/s}$). Miltelius išlydo karštų dujų fėkelas (**1.8 pav.**) [8].

Pagrindiniai plazminio purškimo pranašumai: procesas labai našus ir lengvai automatizuojamas; galima padengti įvairios formos bei įvairių matmenų detales, gauti bet kokio norimo storio dangas; parenkant tūtos formą, skersmenį ir purškimo režimą, galima lengvai reguliuoti aplydymo šiluminį režimą ir srauto greitį; aukšta plazmos temperatūra leidžia išlydyti įvairias medžiagas (geležies lydinius ir spalvotuosius metalus, karbidus, oksidus, keramiką, plastikus, kompozicines ir sunkialydes medžiagas ir kt); gaunamos didelio tankio ir gerų adheziinių savybių dangos; aplydymo zonoje galima sudaryti neutralią, oksiduojančiąją ar redukuojančiąją aplinką; plazmos sraute purškiamos medžiagos dalelės chemiškai nesiskaido ir neišgaruoja; plazmos sraute nėra deguonies, todėl išlydomi ir dengiami metalai nesioksiduoja, padidėja užpurkštų dangų tankis [30].

Keičiant fėkle lekiančių dalelių greitį, temperatūrą ir skersmenį galima optimizuoti purškimo parametrus bei gauti mažiau oksiduotas ir porėtas, glotnesnes, turinčias geresnę adheziją su substratu bei didesnio Jungo modulio dangas [32].



1.8 pav. Plazminio purškimo principinė schema

1.2 lentelė. Skirtingų terminio purškimo metodų charakteristikos

Nusodinimo būdas	Energijos šaltinis	Išlydytų dalelių nešėjas	Įkrovos tipas	Temperatūra purškimo įrenginyje, °C	Tipiškas dalelių greitis, m s ⁻¹	Vidutinė įkrovos purškimo išeiga, kg h ⁻¹		Apdorojimo temperatūra, °C	Dangos porėtumas, %	Adhezinis stipris
						Keramika	Metalai			
Liepsninis purškimas	Deguo- nis-acetilenas, deguonis- vandenilis	Oras	Viela/ milteliai	3300	240; 30-120	–; 1,5–2,5	2–30; –	100–135; 110–160	8–15; 10–20	Geras; Pakanka mas
Plazminis purškimas	Plazmos lankas	Inertinės dujos	Milteliai	16000	120-600	5,5–7	3–9	100–120	2–5	Nuo labai gero iki puikaus
Žemo slėgio plazminis purškimas	Plazmos lankas	Inertinės dujos	Milteliai	16000	Iki 900	–	–	–	< 5	Puikus
Detonacinis purškimas	Deguo- nies/ acetileno/ azoto dujų detonacija	Sprogimo banga	Milteliai	4500	800	–	–	120–150	0,1–1,0	Puikus
Elektrolankinis purškimas	Elektros lankas tarp vielių	Oras	Viela	6000	240	–	5–55	50–120	8–15	Geras

1.3.2 Terminio purškimo privalumai ir trūkumai

Apipurškiant pačioje dangoje pasitaiko defektų, tokių kaip pūslelės, įtrūkimai ir t. t. Tokiu atveju ta dangos vieta šalinama mechaniniu būdu, mechaniškai nuvalyta vieta apipurškiama iš naujo.

Terminio purškimo privalumai:

- ✓ reguliuojant dujų tiekimo režimus galima gauti įvairias liepsnas (neutralią, oksiduojančią, pusiau oksiduojančią ir t. t.);
- ✓ apipurškiamų detalių dydis praktiškai neribojamas;
- ✓ gana silpnai termiškai paveikiama medžiaga, ant kurios yra purškiama danga;
- ✓ apipurškiamos dangos sluoksnio storis gali būti nuo 0,005 mm iki 10 mm ir daugiau;
- ✓ galimybė iš dalies arba visiškai automatizuoti patį purškimo procesą;
- ✓ galimas dangos purškimas degikliui esant įvairiose padėtyse;
- ✓ dėl didelio purškiamų dalelių greičio gaunamos tankios, turinčios mažą porėtumą dangos;
- ✓ purškimo proceso paprastumas, gana nedidelis valdymo sudėtingumas, didelis našumas;
- ✓ nereikalingas daug kainuojantis specialus gaminio apdirbimas po purškimo;
- ✓ danga galima padengti gaminį, pagamintą iš bet kokios medžiagos: metalo ar metalų lydinio, stiklo, porceliano, organinių (medienos, popieriaus, kartono) ir kitų medžiagų;
- ✓ terminiu purškimu galima atkurti detalės matmenis (susidėvėjusių mašinų detalių atkūrimas ar remontas);
- ✓ platus purškiamų medžiagų pasirinkimas, nes galima naudoti įvairius metalus, jų lydinius, metalų ir oksidų mišinius;
- ✓ galima purškėti įvairiomis medžiagomis, keliais sluoksniais naudojant skirtingas medžiagas.

Terminio purškimo proceso trūkumai:

- ✓ nepakankamas dangos stiprumas;
- ✓ mažas energijos išnaudojimas apipurškiant (realiai energijos sunaudojama 2–12 %);
- ✓ žalinga aplinka operatoriams apipurškimo metu. Prieš purškimą paviršiai apdirbami smėliapūte arba šratiniu valymu, todėl užteršiama aplinką, kurioje vyksta apdorojimas, taip bloginamos darbo sąlygos operatoriui;

- ✓ nepakankamas dangos sukibimas su pagrindiniu metalu. [30]

1.4 Pagrindinės dangų savybės ir jų tyrimo būdai

Terminiškai užpurkštos dangos yra charakterizuojamos daugeliu fizikinių, technologinių ir eksploatacinių savybių. Pagrindinės iš jų – tai dangos ir pagrindinio metalo sukibimo stiprumas (adhezija), porėtumas, kietumas, dangos storis, tankis, atsparumas dilimui ir korozijai. Priklausomai nuo dangos paskirties, gali būti svarbios ir kitos savybės, tokios kaip šilumos laidumas, elektros laidumas, atsparumas šilumos ciklams ir t. t. Norint spręsti apie gautos dangos kokybę ir jos eksploatacinį atitikimą, šias charakteristikas būtina įvertinti. Tam yra sukurta daug įvairių metodikų.

Porėtumas. Porėtumas – viena iš svarbiausių dangų charakteristikų. Porėtos struktūros ypatumai ir jos stabilumas turi įtakos ne tik tokioms eksploatacinėms dangų savybėms, kaip šilumos laidumas, elektros laidumas, dujų prasiskverbimas, elektros varža, bet ir konstrukciniam dangų stiprumui. Tačiau šiuo atveju įtaka yra dvejopa. Jei porėta danga sudaroma paviršiuje, dirbančiame trinties poroje, tai tepimo sąlygomis porėtumas gali padidinti atsparumą išdilimui, kadangi tepalas bus palyginti tolygiai tiekiamas į trinties sritį. Neigiamas porėtumo efektas būdingas apsauginėms dangoms, kai per atviras poras agresyvios dujos ir skysčiai pasiekia pagrindinį metalą. Tokiu būdu paviršius, dirbantis aukštose temperatūrose agresyvioje aplinkoje be tepimo, turi turėti minimalų porėtumą.

Porėtumas yra būdingas visoms terminio purškimo dangoms. Porėtumo vidurkis gali svyruoti labai plačiame diapazone. Porėtumas nuo 1 iki 25 % yra leistinas jei danga nėra apdorojama po purškimo. Dangos porėtumas gali būti žalingas šiais atvejais:

- ✓ kada reikalingas korozinis atsparumas;
- ✓ galutiniam mechaniniam apdirbimui;
- ✓ stiprumui, mikrokietumui bei antifrikcinėms savybėms.

Be šių neigiamų savybių galima paminėti porėtumo privalumus:

- ✓ tepimas – poros veikia kaip tepimo medžiagos kaupyklės;
- ✓ padidėja terminis barjeras;
- ✓ sumažėja vidiniai įtempiai, galimas didesnis dangos storis;
- ✓ padidėja dangos atsparumas smūgiams;
- ✓ porėtomis dangomis dengiami medicininiai protezai [7].

Yra skiriamas bendras (P_{bendr}) porėtumas, atviras (P_{atv}), uždaras (P_{uz}) ir išsklaidytas (P_{skl}) dangos porėtumas. Bendras porėtumas nustatomas kaip bendro porų tūrio ir bendro dangos tūrio

santykis. Uždaras ir atviras porėtumas yra bendro porėtumo dalys ir atitinkamai nustatomos kaip porų, turinčių išėjimą į paviršių ir neturinčių, tūrio santykis su bendru dangos tūriu. Išsklaidytas porėtumas susidaro dėl dujų tirpumo sumažėjimo dangos medžiagoje jai auštant.

Yra skiriami trys pagrindiniai dangos porėtumo nustatymo būdai:

- ✓ hidrostatinis svėrimas;
- ✓ gyvsidabrio porometrijos būdas;
- ✓ metalografinis.

Hidrostatinio svėrimo metodo principą sudaro atskirtos nuo pagrindo dangos masės nustatymas ore ir skystyje su žinomu tankiu. Nustatant bendrą porėtumą danga yra sveriama ore su tikslumu $\pm 0,005$ g. Po to danga yra permirkoma išlydytame parafine arba padengiama vazelino ar lako sluoksniu. Permirkyta danga vėl sveriama ore ir skystyje (vandenyje) naudojant tas pačias svarstyklės. Bendras porėtumas nustatomas pagal formulę:

$$P_{\text{bendr}} = \left(1 - \frac{m_{\rho_{H_2O}}}{(m_1 - m_2) \rho_K} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

čia: m – dangos masė, nustatyta sveriant ore, (g);

m_1 – permirkytos dangos, pasvertos ore, masė (g);

m_2 – permirkytos dangos, pasvertos vandenyje, masė (g);

ρ_{H_2O} – vandens tankis (g/cm^3);

ρ_K – teorinis kompaktinės dangos medžiagos tankis (g/cm^3).

Panašiu būdu yra nustatomas ir atviras porėtumas. Šiuo atveju dangos permirkymas atliekamas vakuume (10^{-2} – 10^{-3}) mm Hg.st. Permirkymo laikas turi didelę įtaką rezultatų tikslumui. Terminiu dujiniu būdu užpurkštoms dangoms šis laikas yra gerokai mažesnis ir sudaro apie 5 minutes. Atviras porėtumas nustatomas pagal formulę:

$$P_{\text{atv.}} = \frac{(m_1 - m) \cdot \rho_{H_2O}}{(m_1 - m_2) \cdot \rho_{\text{sk.}}} \cdot 100 \quad (2)$$

čia: ρ_{sk} – permirkymui naudojamo skysčio tankis (g/cm^3).

Uždaras porėtumas nustatomas kaip skirtumas tarp bendro ir atviro porėtumo. Norint nustatyti porėtumą turi būti ištirti ne mažiau kaip trys bandiniai. Galutiniu rezultatu priimamas aritmetinis vidurkis visų nustatytų reikšmių, skirtumas tarp kurių neviršija 4 %.

Stereoskopinės metalografijos metodai leidžia nustatyti stambių porų dydį, sferinių porų skaičių tūrio vienetu, vidutinį atstumą tarp porų, vidutinį sferinių porų skersmenį ir kt. Šiuo metu yra sukurtos kompiuterinės programos, kurios atlieka šlifų ir paviršių mikrostruktūros nuotraukų analizę (pvz.: „Scion Image“) . Galima nustatyti ne tik atskirų fazių geometriją, matmenis, užimamą plotą ir panašiai, bet ir sukurti paviršiaus topografiją – mikroreljefą. Tačiau mikroskopiniai porėtumo nustatymo metodai turi tam tikrų trūkumų. Visų pirma, gaunama informacija tik apie vieno atsitiktinio skerspjuvio porėtumą, tai neleidžia įvertinti dangos kokybės tūryje. Be to, kadangi poros, kurių dydis mažesnis kaip $1\ \mu\text{m}$, neregistruojamos, gaunamos mažesnės porėtumo reikšmės. Palyginti su hidrometrinio svėrimo metodu, šis būdas yra sudėtingesnis ir mažiau tikslesnis [19; 20; 21].

Dangos sukibimas su pagrindu (adhezija). Dangos ir substrato adhezijos stiprumas yra vienas iš pagrindinių kriterijų, nusakančių dangos eksploatacinį atitikimą. Sukibimas tarp dangos ir pagrindo susidaro didele dalimi dėl mechaninių ryšių. Mažesnę įtaką adhezijos stiprumui turi cheminiai ryšiai. Didžiausią poveikį sukibimo stiprumui turi tokie veiksniai, kaip pagrindinio metalo paviršiaus paruošimas bei dangos ir pagrindinio metalo temperatūrinių linijinio plėtimosi koeficientų skirtumas, kuris lemia liekamųjų vidinių įtempių lygį. Paprastai danga laikoma kokybiška, jei turi pakankamai stiprų sukibimą su pagrindiniu metalu.

Prastas dangos sukibimas su substratu, mažas šiurkštumas bei liekamieji įtempiai, atsirandantys padengimo proceso metu, labai stipriai įtakoja dangų atsparumą kavitacinei erozijai. Labai svarbūs parametrai, lemiantys atsparumą kavitacinei erozijai, yra tamprumo modulis (E) bei kietumas (H). Mažinant tamprumo modulį (E) ir didinant kietumą (didinant santykį H/E), gaunamos geresnės tribologinės dangų savybės. Dangos cheminė sudėtis turi būti parinkta, įvertinant eksploatacinę terpę [16].

Substrato ir dangos sukibimas priklauso nuo šių faktorių:

- ✓ paviršiaus švarumas;
- ✓ paviršiaus plotas;
- ✓ paviršiaus topologija ir profilis;
- ✓ temperatūra;
- ✓ laikas (reakcijos laikas ir aušimo greitis);
- ✓ fizikinės ir cheminės savybės;
- ✓ fizikinės ir cheminės reakcijos.

Paviršiaus valymas bei nupūtymas rupiu smėlio srautu yra labai svarbus, norint gauti gerą dangos ir pagrindo sukibimą. Toks paruošimas sukuria palankias chemines bei fizikines sąlygas gerai adhezijai. Padidėja paviršiaus kontakto plotas, todėl padidėja adhezinis stiprumas. Šiurkštus paviršius skatina mechaninį sukibimą. Didėjant terminei bei kinetinei energijai, didėja adhezinis stiprumas. Paviršiaus pakaitinimas iki kuo didesnės temperatūros spartina difuziją bei gerina adheziją, tačiau tuo pačiu metu substrato paviršius oksiduoja, o tai jau neigiamai veikia adhezinį stiprį. Kuo didesnis išlydytų ar kitaip bloškiamų į pagrindą dalelių greitis, tuo geresnis sukibimas tarp dangos ir pagrindo [7].

Vientisos dangos ir substrato sąlyčio zonoje visuomet susidaro šuoliškas savybių pasikeitimas. Dangos ir substrato sąlyčio paviršius dažniausiai būna silpniausia sistemos zona, kurioje darbo metu medžiaga pradeda irti. Tokio šuoliško savybių kitimo išvengiama panaudojus funkciškai kintamų savybių termobarjerines dangas. Esant tokioms dangoms, sumažėja šiluminiai įtempiai, juos galima sumažinti lokaliai, galima išvengti įtempių šuolio sluoksnių sąlyčio zonose, gali būti sumažinti įtrūkių susidarymo intensyvumo ir plėtros veiksniai, sustiprinti dangos tarp sluoksnių ryšiai ir taip padidintas medžiagos atsparumas tarp sluoksnių įtrūkių susidarymui [33].

Lietuvoje užpurkštų dangų adhezijos tyrimo metodus reglamentuoja standartas **LST EN ISO 14923:2006 Terminis purškimas. Terminiškai užpurkštų dangų apibūdinimas ir bandymai (ISO 14923:2003)**. Pagal šį standartą terminiu purškimu gautų dangų adhezija gali būti įvertinta keliais bandymais:

- ✓ lenkimo bandymu;
- ✓ tinklelio bandymu;
- ✓ bandymu kalnu;
- ✓ tempiamojo adhezijos stiprio bandymu.

Lenkimo bandymu tiriamos termiškai užpurkštų dangų deformacijos galimybės, leidžiančios padaryti išvadą dėl ryšio stiprumo lyginant su kitais bandiniais (plyšių atsiradimas, lupimasis). Metalinės plokštės juostelė, padengta tiriamą dangą, pastoviu greičiu lenkiama ant nurodyto skersmens šerdies iki 90° arba 180°. Pavyzdžiui, šerdies skersmuo 12,5 mm, bandinio storis 1,6 mm. Svarbu, kad bandomoji danga būtų išorinėje lenkiamos juostelės pusėje. Dangos storis turi didelę įtaką bandymo rezultatui ir turi būti nurodytas.

Tinklelio bandymas dar vadinamas įrėžimo bandymu. Daugiausia naudojamas užpurkštoms plonoms cinko ir aliuminio dangoms. Bandant plieniniu ar karbidiniu antgaliu, dangoje iki pagrindo padaroma nuo keturių iki šešių lygiagrečių įrėžimų nuo 1 mm iki 3 mm atstumu ir nuo keturių iki šešių lygiagrečių įrėžimų statmenai pirmiesiems, taip išraižant tinklelį.

Bet kuris dangos atsilupimas yra dangos ryšio stiprumo įvertinimo matas. Matavimo rezultatai labai priklauso nuo įrėžimo sąlygų ir tempimo greičio.

Bandymas kalnu. Šiuo metodu gaunami geri cinko ir aliuminio dangų įvertinimo rezultatai, neatsižvelgiant į jų storį. Siauru išgalastu kalnu, kurio ašmenys, pavyzdžiui, 10 mm pločio, įpjaunama užpurkšta danga. Danga sukibusi tinkamai, jei niekur neatplyšusi.

Tempiamojo adhezijos stiprio bandymas. Juo nustatomas termiškai užpurkštų dangų atsparumas ir (arba) adhezija pagrindui. Tai yra kiekybinis adhezijos matavimo būdas. Jo privalumas tas, kad gaunamos skaitinės stiprumo reikšmės, kurias yra patogu palyginti [17].

Atsparumas dilimui. Trintis savo fizikine prasme turi dvilypį charakterį: kai kuriais atvejais ji būtina, o kartais – ji nepageidaujama. Tai lemia medžiagos fizikinė prigimtis.

Trintis pasireiškia tada, kada du paviršiai kontaktuoja ir juda vienas kito atžvilgiu. Besitrinantys kūnai ardo vienas kitą. Konstruktorius gali apskaičiuoti detalės konstrukcinį patvarumą, bet jis negali įvertinti detalės nusidėvėjimo dėl trinties jėgų, nes jos sukuria visą aibę nežinomųjų, kurie daro įtaką nusidėvėjimui. Trinties reiškinius nagrinėja mokslų šaka – tribomechanika, o trinties pasekmes nagrinėja mokslo sritis tribotechnika, kuri aprėpia: tribofiziką, tribochemiją ir tribomechaniką.

Nusidėvėjimą galima nustatyti atitinkamu dydžiu: linijiniu, tūriniu, svoriniu, energetiniu ir pan.

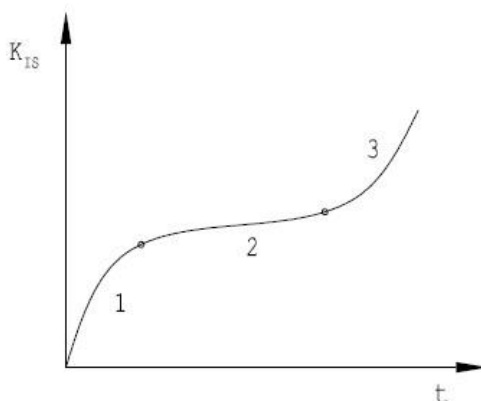
Tribotechnikoje rekomenduotini ir priimti šeši nusidėvėjimo kriterijai:

- ✓ linijinis nusidėvėjimas (K_L);
- ✓ tūrinis nusidėvėjimas (K_V);
- ✓ energetinis nusidėvėjimas (K_E);
- ✓ svorinis nusidėvėjimas (K_W);
- ✓ nutrynimasis (γ);
- ✓ abrazyvinio patvarumo koeficientas (β).

Dirbtinių bazių metodu galima nustatyti išdėvėto sluoksnio gylį. Tam tikslui ant eksperimentuojamo paviršiaus padaroma įspauda arba įbraiža, kurios skersmuo turi kisti gylio atžvilgiu.

Išdilimas – tai medžiagos irimo ir atsiskyrimo nuo paviršiaus procesas ir (arba) liekamųjų deformacijų susikaupimo trinties metu procesas, kuris pasireiškia kūno formos ir matmenų pokyčiu (**1.9 pav.**). Šių procesų rezultatai gali būti kiekybiškai įvertinti masės, tūrio, ilgio ar kitokiais matavimo vienetais. Atsparumas išdilimui – tai medžiagos savybė priešintis išdilimui tam tikromis trinties sąlygomis. Atsparumas išdilimui išreiškiamas dydžiu, kuris yra atvirkščias

dilimo greičiui arba dilimo intensyvumui. Dilimo greitis – tai išdilimo santykis su laiku, per kurį jis susidarė. Dilimo intensyvumas – tai išdilimo santykis su keliu, kuriame jis susidarė, arba su sunaudotu darbu.



1.9 pav. Bet kokio paviršiaus išdilimo kreivės bendras vaizdas: 1 – pirminė intensyvaus dilimo stadija; 2 – tolygaus dilimo stadija; 3 – avarinio dilimo stadija; K_{IS} – išdilimo intensyvumas; t – laikas

Atsparumo dilimui nustatymo metodikos pasirinkimą lemia visų pirma tyrimo tikslas. Tiriant išdilimą dažniausiai naudojami:

- ✓ mikrometrijos metodas;
- ✓ dirbtinių bazių metodas;
- ✓ svėrimo metodas;
- ✓ cheminė ir spektrinė analizė;
- ✓ profilografija ir kt.

Tiksliausias yra dirbtinių bazių metodas.

Dirbtinių bazių metodo principas – linijinio išdilimo nustatymas pagal sumažėjusius siaurėjančio (žinomos formos) įdubimo matmenis. Įdubimas padaromas įspaudžiant į paviršių Vickerso kietmačio indentorių (keturkampę piramidę) arba kitu būdu.

Darant įspaudą su kietmačiu, metalas įspauda pakraščiuose tarsi išsipučia, o tai sumažina šio metodo tikslumą. Be to, jei įspaudas nedidelis, tai po intensyvaus dilimo jis yra sunkiai aptinkamas. Jei paviršius labai kietas, tai dėl „tampraus atsistatymo“ nuėmus apkrovą įspauda dydis gali gerokai sumažėti. Kai paviršius plastiškas, esant dideliems kontaktiniams įtempimams įspauda kontūrų ryškumas gali sumažėti.

Vertinant atsparumą dilimui, reikia atsižvelgti į dangos paviršiaus lokalų porėtumą ir savybių anizotropiškumą, kurie gali turėti įtaką įspauda gyliai ir ilgio santykiui ir padidinti rezultatų paklaidą.

Naudojant *svėrimo metodą*, detalės yra sveriamos iki ir po išdilimo. Būtina gerai nuvalyti nuo paviršiaus dilimo proceso metu susidarančius produktus ir kita.

Profilografijos metodas leidžia įvertinti išdilimą pagal profilogramas, sudarytas tam tikroje paviršiaus vietoje iki ir po išdilimo. Šį metodą rekomenduoja taikyti tiriant dangos atsparumą fretingo korozijai. Nustatomas atstumas tarp vidutinių profilio linijų, ir remiantis šiais duomenimis apskaičiuojamas išdilimo intensyvumas su paklaida ne didesne kaip $1 \cdot 10^{-8}$. Šis metodas dažniausiai taikomas, kai bandiniai yra nesudėtingos formos ir turi pakankamai gerai apdirbtą paviršių [22].

Kietumas. Kietumas – medžiagos geba priešintis, kad į ją neįsiskverbtų kitas, kietesnis kūnas. Kietumo charakteristika dažniausiai taikoma vertinant metalų mechanines savybes.

Medžiagų kietumas nustatomas paviršių veikiant nustatyta jėga tam tikros formos ir dydžio antgaliu – indentoriumi, pagamintu iš kietesnės medžiagos nei matuojamoji, ir išmatuojant to poveikio parametrus. Kietumą galima matuoti antgalį įspaudžiant, juo įrėžiant ar smogiant į medžiagos paviršių.

Dažniausiai kietumas matuojamas įspaudos dydžiu. Nustatyta apkrova metalo paviršius deformuojamas plastiškai nedideliame tūryje po antgaliu ir šalia jo. Šiuo būdu matuojant kietumą plastiškai deformuojasi ne tik plastiški, bet ir palyginti trapūs metalai. Taigi įspaudimo būdu nustatomas kietumas apibūdina medžiagos pasipriešinimą plastinei deformacijai, matuojamą skirtingu metodu nei kitos mechaninės charakteristikos.

Parinkus tinkamą kietumo matavimo metodą, galima vertinti skirtingos struktūros ir savybių metalo sluoksnius (pvz.: azotintus ar grūdintus, kurių kietumas skerspjūvyje nevienodas). Matuojant mikrokietumą galima įvertinti ir atskirų struktūrinių dalių kietumą.

Kietumo matavimo metodo parinkimas priklauso nuo laukiamų medžiagos savybių, paviršiaus struktūros, detalės matmenų bei geometrijos.

Labiausiai paplitę kietumo matavimo metodai yra: Brinelio, Rokvelo bei Vickerso. Norint užtikrinti matavimo vienodumą, kietumo matavimo metodai reglamentuojami norminiais dokumentais.

Padengtų apsauginėmis dangomis medžiagų kietumo nustatymas leidžia įvertinti užpurkšto sluoksnio kokybę, pokyčius, įvykusius pagrindinio metalo paviršiuje, dangų struktūrinį nevienodumą, dangų išdilimo bendrus dėsningumus, dangos ir pagrindo sukibimo stiprumą ir kt. Kietumo nustatymas yra neardomasis tyrimo metodas, paprastas ir labai patogus, todėl plačiai taikomas.

Rokvelo metodas yra paprasčiausias ir operatyviausias. Šiuo atveju į bandinio paviršių yra įspaudžiamas indentorius – deimantinis kūgis arba plieninis rutuliukas. Kietumas išreiškiamas bedimensiu dydžiu, atitinkančiu indentoriaus įsiskverbimą į paviršių gyliu $2 \cdot 10^{-3}$ mm. Kietumo

reikšmės parodomos tiesiogiai prietaiso skalėje. Jei indentorius – deimantinis kūgis, tai parodymus reikia žiūrėti A arba C skalėje, kietumas tada žymimas atitinkamai HRA arba HRC. Jei indentorius – plieno rutuliukas, naudojama skalė B ir kietumas žymimas HRB. Rokvelo metodas paprastai naudojamas termiškai sustiprintam pagrindiniam metalui.

Brinelio prietaisu nustatomas minkštų medžiagų kietumas: atkaitintų ir normalizuotų plienų, bronzų, žalvarių ir kt. Šiuo atveju į tiriamą paviršių įspaudžiamas 2,5 arba 10,5 mm skersmens plieno rutuliukas. Reglamentuojamas apkrovos išlaikymo laikas ir jos dydis. Kietumas (HB) nustatomas pagal įspaudos skersmens dydį. Tam naudojamos specialios lentelės. Įspaudos skersmuo nustatomas naudojant Brinelio lupą. Bandinio medžiagos kietumas turi būti ne didesnis kaip 450 HB, kitaip gali deformuotis arba suirti plieno rutuliukas.

Kietumas pagal Vickersą nustatomas panašiai kaip ir Brinelio prietaisu, tik šiuo atveju indentorius – keturkampė piramidė. Naudojamos apkrovos nuo 9,8 N iki 980 N. Kietumas (HV) nustatomas pagal įspaudos įstrižainės dydį. Tiek pagal Vickersą, tiek pagal Brinelį kietumo matavimo vienetai – paskaliai. Vickerso prietaisas dažniausiai naudojamas medžiagoms, kurių kietumas didesnis kaip 360 HB. Vickerso metodas yra tobuliausias, kadangi juo galima nustatyti praktiškai bet kokių medžiagų kietumą.

Tiriant dangas ir apsauginėmis dangomis padengtas medžiagas, taip pat nustatomas **mikrokietumas**. Šiuo atveju yra nustatomas dangos mikrotūrių kietumas ir tyrimo pagrindinis tikslas – atskirų dalelių, struktūrinių dedamųjų kietumo nustatymas, kietumo anizotropijos nustatymas skirtingose dangos vietose. Mikrokietumo bandymas aprašytas **LST EN ISO 4516:2002 Metalinės ir kitos neorganinės dangos. Vickerso ir Knopo mikrokietumo bandymai (ISO 4516:2002)**.

Bandant mikrokietumą, įspaudos gali būti daromos eilutėmis arba atskiromis įspaudomis.

Jei nenurodyta kitaip, bandymas atliekamas aplinkos temperatūroje (23 ± 5) °C.

Bandymo išpjovimas ir kitos paviršiaus ruošimo operacijos turi būti atliekamos kruopščiai, kad paviršius, kurio kietumas bus matuojamas, nebūtų termiškai paveiktas.

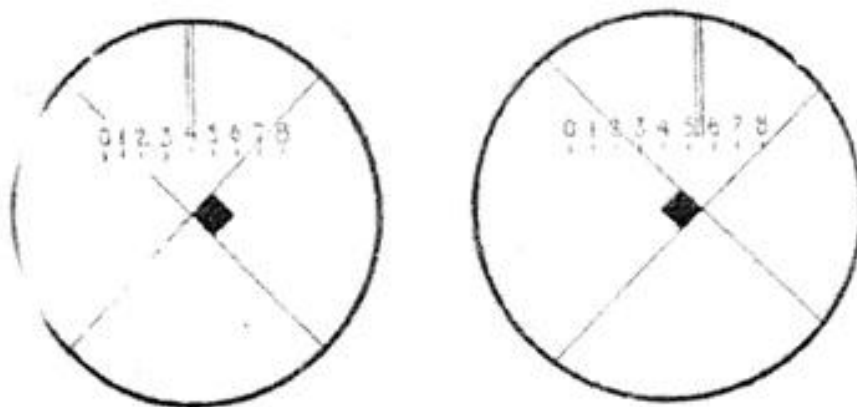
Paviršius, kurio kietumą numatyta matuoti, turi būti tinkamai paruoštas ir, pageidautina, iššedintas tam, kad galima būtų tiksliai išmatuoti įspaudų įstrižaines įvairiose srityse.

Įspaudų skaičius ir jų išdėstymas turi būti pakankamas, kad galima būtų nustatyti atskirų fazių mikrokietumą.

Pakankamą kiekį įspaudų reikia daryti tam, kad galima būtų įsitikinti, jog matuojamas termiškai nepaveiktas pagrindinis metalas.

Mikrošlifas modelinu pritvirtinamas prie plokštelės ir rankiniu presu išlyginamas taip, kad tiriamasis paviršius būtų lygiagretus mikroskopo staliuko darbiniam paviršiui. Įspaudų vietos pasirenkamos didesniu kaip dviejų įspaudų skersmenų atstumu. Mikrokietumo matavimo metu

mikroskopu ryškiai matomos poros padeda tiksliau pasirinkti įspaudos vietą. Prietaiso rankenos pasukimu prieš laikrodžio rodyklę į tiriamos dangos paviršių nuleidžiamas deimantas, išlaikant nuo 5–10 s.



1.10 pav. Deimanto padaryta rombo įspauda matoma pro mikrokietmačio okuliarą

Išmatavus su įtaisytu sraigtniu optiniu mikrometru įspaudų įstrižaines (**1.10 pav.**) ir nustatčius mikrometro padalos vertę, mikrokietumo reikšmės yra apskaičiuojamos pagal formulę:

$$H = 1854 \frac{P}{a^2} \quad (3)$$

čia: H – kietumas (kgf/mm²);

P – apkrova (g);

a – įspaudos įstrižainė, μm; apskaičiuojama kaip įstrižainių, išmatuotų abiem kryptimis, vidurkis, padaugintas iš optinio mikrometro padalos vertės.

Bandymas įbrėžimu. Paprastas ir pigus minkštų dangų bandymo metodas. Paviršius įbrėžiamas smailiu, kietu daiktu, esant pastoviam spaudimui ir greičiui. Įsiskverbimo gylis ir įbrėžimo plotis yra skirtingų dangų kietumo palyginimo matas.

Kietumas pagal gylį. Tyrimai, kurių metu kartu užrašomas apkrovimo dydis ir antgalio įsmigimo gylis, yra alternatyvūs įprastiniams kietumo bandymų metodams, kai neatsižvelgiama į antgalio daromą elastingą deformaciją. Antgalis įsminga į bandinį arba nuo apkrovos, arba dėl valdomos apkrovos ir gylio poslinkio apkrovimo ir nukrovimo metu. Kietumo vertė apskaičiuojama pagal žinomos geometrijos antgalio įsmigimo gylį veikiant bandymo darbinei apkrovai. Remiantis užrašytais duomenimis, galima padaryti išvadas dėl plastinių ir elastinių dangos savybių.

Svarbiausi apribojimai kietumo matavimams yra paviršiaus šiurkštumas ir kontrolinių pavyzdžių kalibravimas [22].

1.4.1 Fizinių ir technologinių savybių tyrimo būdai

Mikroskopiniams tyrimams yra išpjaunami bandiniai su užpurkšta danga, po to bandiniai šlifuojami, poliruojami ir, esant reikalui, ėsdinami. Bandinių kiekis, matmenys, išpjovimo vieta ir plokštuma priklauso nuo analizės tikslų ir nuo dangos ypatumų. Paprastai išpjaunami skersiniai bandiniai, kurių tyrimo plokštuma yra statmena dangos sluoksniui.

Išpjaunant bandinius, būtina užtikrinti, kad pjovimo įrankis judėtų nuo dangos į pagrindinį metalą. Kitaip danga gali atsiplėsti nuo pagrindo dėl susidarančių tempimo įtempių įrankiui išeinant į paviršių. Kietoms ir trapioms dangoms pjauti naudojami deimantiniai diskai, mažiau stiprioms medžiagoms – karborundo diskai. Būtina, kad pjovimo metu bandiniai neįkaistų iki aukštų temperatūrų, nes temperatūros gradientas gali sukelti papildomų įtempių susidarymą, ir, atitinkamai, dangos atsiskuotiesimą arba sutrūkinėjimą. Be to, temperatūros pokyčiai gali sukelti pagrindinio metalo struktūrinius virsmus. Išpjaunant bandinius būtina naudoti aušinimo skystį.

Siekiant apsaugoti tiriamą paviršių nuo suirimo šlifavimo ir poliravimo metu, jis gali būti padengiamas plonu 20–30 µm apsauginiu metalo sluoksniu. Šis sluoksnis turi gerą sukibimą su paviršiumi ir yra gana kietas. Bandiniai taip pat gali būti užliejami lengvai lydžiu lydiniu arba epoksidine derva, organiniu stiklu, polistirolu ir pan. Ruošinys įtaisomas 10–20 mm aukščio ir 30–40 mm skersmens formoje. Vienoje formoje tikslinga paruošti kelis bandinius kartu.

Ruošiant bandinius su dideliu porėtumu, būtina kruopščiai pašalinti abrazyvines medžiagas iš porų pereinant prie smulkesnių pastų, kitaip poliravimo diskas bus užterštas didesnės frakcijos dalelėmis. Šiuo atveju gerus rezultatus užtikrina valymas ultragarsu.

Poliravimo kontrolė turi būti vykdoma optiniu mikroskopu po kiekvienos operacijos. Poliravimo kokybė patenkinama, jei padidinus 300 kartų pagrindiniame metale neaptinkama įbrėžimų [30].

Dangų metalografiniai tyrimai

Mikrostruktūrinės analizės tikslas yra nustatyti ryšius tarp purškimo sąlygų, naudojamų medžiagų cheminės sudėties, mikrostruktūros ypatumų ir eksploatacinių charakteristikų.

Mikroanalizė leidžia nustatyti dangos, pagrindinio metalo ir pereinamosios zonos struktūros ypatumus bei atlikti jų fazinės sudėties kiekybinę ir kokybinę analizę.

Tokių tyrimų metu paprastai naudojamas padidinimas iki 1000 kartų. Panaudojus ultravioletinius spindulius arba imersiją gali padidinti jį iki 1800–2000 kartų.

Dangų struktūra priklauso nuo jų formavimo mechanizmo. Purškimo metu miltelinės medžiagos yra veikiamos tokių procesų:

- ✓ įkaitinimas ir lydymas (arba dalinis paviršinis aplydymas), sferoidizacija;
- ✓ judėjimas gaminio link, sąveika su aplinka ir oksidacija;
- ✓ dinaminė sąveika su pagrindinio metalo paviršiumi, deformacija ir tekėjimas paviršiumi.

Kompaktinės medžiagos struktūrai būdingos dviejų tipų ribos – tarpgrūdelinės ir tarpfazinės. Formuojantis dangoms susidaro dar trijų tipų ribos: tarp deformuotų dalelių, tarp sluoksnių ir riba tarp pagrindinio metalo ir dangos. Visos jos turi įtaką adheziniam ir koheziniam dangos stiprumui bei eksploatacinėms savybėms.

Dangos sukibimo su pagrindu stiprumas yra vienas iš pagrindinių kriterijų, kuris lemia, kad danga atitinka paskirtį ir eksploatacines jos savybes, ypač kai danga yra laikantysis konstrukcijos elementas, t. y. daugeliu atvejų danga laikoma kokybiška, jei turi pakankamai stiprų sukibimą su pagrindiniu metalu.

Sukibimas priklauso ne tik nuo susidarančių ryšių. Didelę reikšmę turi ir vidinių įtempių lygis. Be to, dažnai tvirti ryšiai susidaro tik atskiruose kontaktinio paviršiaus plotuose, o susikibimo stiprumas yra mažesnis negu kompaktinės medžiagos stiprumas dėl mikro- ir makroskopinių defektų ir dėl nedidelio dangos ir pagrindinio metalo tarpusavio prasiskverbimo. Priklausomai nuo dangos sudarymo būdo, gali būti ir kitų stiprumo sumažėjimo priežasčių.

Yra žinoma daug pagrindinio metalo ir dangos sujungimo stiprumo tyrimo metodų. Paprastai tai yra mechaniniai bandymai. Tačiau apie pagrindinio metalo ir dangos susikibimo stiprumo lygį galima spręsti ir pagal ribos tarp jų pobūdį. Jei riba pakankamai ryški, tai sukibimas realizuojamas dėl mechaninės sąveikos. Tokiu atveju svarbu, kad danga glaudžiai prigultų prie pagrindo ir atkartotų jo mikroreljefą. Jei yra nevientisumų, purškimo procesas buvo atliktas nekokybiškai. Esant pereinamajai zonai ir cheminei dviejų paviršių sąveikai, riba tarp pagrindo ir dangos yra neryški.

Ribos tarp pagrindinio metalo ir dangos tyrimas yra susijęs su tam tikromis problemomis. Visų pirma, ruošiant bandinius, reikia naudoti skirtingą paviršių ėsdinimą, tai apsunkina kokybiško bandinio gavimą. Antra, jei purškimo metu susidaro pereinamoji zona, tai paprastai ji būna labai siaura ir patikimai ištirti jos struktūrą yra gana sudėtinga [18].

1.5 Vibromechaninių procesų taikymo analizė

Vibracinės technologijos taikymo sritys labai įvairios:

- ✓ žemės ūkis;
- ✓ pramoninė gamyba bei statybos sektorius;
- ✓ transporto sfera;
- ✓ medicina;
- ✓ komunalinis ūkis;
- ✓ mokslinės laboratorijos ir bandymų stotys.

Vibracinės technologijos naudojimas daugelyje sričių jau atnešė didelės naudos, kitose sferose ji vis dar yra plėtojama. Vibracinė technologija medžiagotyros srityje leidžia gauti labai plonas medžiagas, kuriose nepasireiškia komponentų segregacija, medžiagos yra homogeniškos, pasižyminčios specifinėmis savybėmis. Galima keisti medžiagos agregatinę būseną, naudojant vibracijas (pvz.: skystas medžiagas transformuoti į kietas; birios medžiagos, būdamos sausos, gali tapti skystomis). Vibracijos gali pakeisti aplinkos sąlygas, kuriose yra eksploatuojamas gaminy [29].

Svarbiausi vibracinės technologijos parametrai yra:

- ✓ vibracijos dažnis (nuo jo priklauso virpesių rūšis: mechaniniai ar ultragarsiniai virpesiai);
- ✓ vibracinio apdorojimo laikas;
- ✓ virpesių amplitudė.

Didėjant mechaninių virpesių dažniui (kai naudojami žemo dažnio virpesiai: 10, 20, 30, 40 ir 50 Hz) ir laikui (5, 10, 15 min.), mažėja struktūros grūdo dydis. Apdorojant, kai kuriuos spalvotųjų metalų lydinius, grūdo dydis sumažėja net iki 53 %. Tačiau didėjant virpesių dažniui ir apdorojimo laikui, didėja ir lydinio tankis.

Rusų mokslininkas Černovas buvo vienas pirmųjų, kuris panaudojo liejinio formos vibracijas, liejant plieninius luitus. Visa tai vyko dar XIX a. (1878 m.). Pastebėta, kad struktūrinė dalis, austenitas, yra grynesnis. Kiti mokslininkai nustatė tokius vibracinės technologijos privalumus:

- ✓ grūdo rafinavimas;
- ✓ degazacija.

Gryno aliuminio vibracinio apdorojimo efektyvumą nagrinėjo Fišeris (Fisher). Vibracijų taikymas atliktas įvairiai. Vieni tyrėjai įvedė vibracijas į besikristalizuojantį lydinį, esant dideliems aušimo greičiams. Kiti – esant tam tikrai pastoviai temperatūrai (izoterminis procesas). Skirtingai nuo mechaninių virpesių, ultragarsiniai virpesiai sumažina kavitaciją, kuri stabdo grūdo rafinavimą [29].

Tempimo riba padidėja esant mažiems vibracijos dažniams, o mažėja, kada dažnis yra didesnis. Prie tam tikrų vibracijos amplitudės reikšmių galima pašiurkštinti gaminį. Vibracijos įvedimas keičia gaminio vidinę mikrostruktūrą bei mechanines savybes, jas gerindamas arba blogindamas. Tačiau mechanizmas, lemiantis šiuos pokyčius, iki šiol nėra gerai žinomas [2].

Žinoma, kad mechaninės vibracijos lydinio kristalizacijos metu turi didelę įtaką susidarančiai mikrostruktūrai ir mechaninėms savybėms. Tačiau vis dar nėra visiškai išsiaiškinta, kaip mechaninės vibracijos keičia mikrostruktūrą, koks yra jų veikimo mechanizmo principas. Vibracinio apdorojimo svarbiausieji parametrai yra vibracijos amplitudė bei dažnis. Dažniausiai didinant vibracijos amplitudę, didėja gaminio paviršiaus šiurkštumas. Virpesių amplitudė lemia ir tokius rodiklius kaip santykinis pailgėjimas (A_5 , A_{10}) bei tamprumo riba (R_e).

Vibracinis apdorojimas leidžia gauti homogenišką (vientisą), be didelių liekamųjų vidinių įtempių struktūrą. Europos metalo konstrukcijų gamybos standartuose nurodyta, kad, siekiant pailginti konstrukcijos darbo laiką, po metalo formavimo ar suvirinimo būtina atlikti liekamųjų įtempių atpalaidavimą. Iki šiol tam taikytas terminis apdorojimas (TA), tačiau TA reikalauja didelių energijos, terminės izoliacijos medžiagų ir darbo sąnaudų. Šiuo metu pasaulyje taikomas nenaujas, tačiau neseniai patobulintas efektyvus įtempių mažinimo metodas – vibracinis apdorojimas [24].

Vibracijos energija gali stabilizuoti ir sumažinti įtempius, bet kuriuo laiku, gaminant konstrukciją ar atliekant mechaninį apdirbimą, nekeisdama struktūros, spalvos, nesukeldama deformacijų, neiškraipydama gaminio matmenų ir be nuodegų. Visa tai pasiekama mažiausiomis laiko, darbo ir energijos sąnaudomis. Homogeniška lydinio struktūra užtikrina reikiamas mechanines savybes, stiprumo bei plastiškumo charakteristikas, sumažėja mikroporų, plyšių bei kitų defektų tikimybė. Vibracinis apdorojimas leidžia iš dalies arba visiškai pakeisti brangias bei imlias pogamybines operacijas (pvz.: terminis apdorojimas, termocheminis apdorojimas ir pan.), atliekamas gauti reikiamas savybes. Skirtingai nuo minėtųjų technologijų, vibracinis apdorojimas dažniausiai atliekamas lydinio kristalizacijos metu.

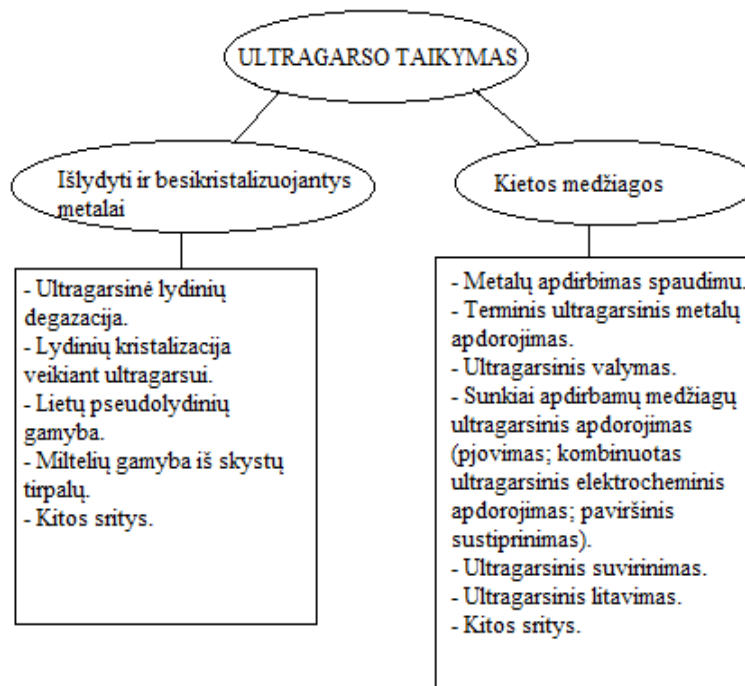
Vibracijos, priklausomai nuo jų sukūrimo šaltinio, gali būti mechaninės, elektromagnetinės, ultragarsinės. Šiandieną plačiausiai paplitusios dėl savo paprastumo bei mažos įrangos kainos mechaninės vibracijos. Mechaninės vibracijos, kaip atskira technologija, pirmiausiai buvo panaudotos rusų mokslininko Sokolovo XX amžiaus pradžioje. Vibracijos

naudotos apdorojant spalvotuosius metalus (cinkas, žalvaris, aliuminis). Plačiausiai vibracijos taikytos liejininkystės pramonėje. Vibracijų įvedimas leido susmulkinti grūdą, padidinti metalo takumą bei sumažinti porėtumą, plyšių formavimąsi. Struktūros susmulkinimo esmę sudaro dendritinės struktūros dendritų šakų laužymas, sumažėja tuštumų skaičius. Panašūs rezultatai gauti ir vėlesniuose tyrimuose, apdorojant plieną [1].

Dėl vibracinio apdorojimo gali būti padidintas elementų tirpumas, mikrokietumas bei atsparumas lenkimui. Šiuos pasikeitimus nulemia dispersinis sukietinimas, grūdo sumažėjimas bei elementų tirpumo vienas kitame padidėjimas. Struktūros smulkinimui gali būti naudojama daug ir įvairių technologijų (pvz.: spartus aušinimas dideliais aušinimo greičiais; modifikatorių įvedimas; ultragarsinis vibravimas; elektromagnetinis vibravimas) [34].

Literatūroje galima rasti atvejų, kada ultragarsiniai virpesiai yra taikomi lietu luitų degazacijai (esant tinkamai parinktiems vibracinio ultragarsinio apdorojimo režimams, galima pasiekti 97 % luito vienalytiškumą). Porėtumas gali būti sumažintas iki 80 %, lyginant su prieš tai buvusi lygiu [5;15].

Ultragarso virpesiai yra efektyvi priemonė aktyviai veikti įvairius cheminius ir fizikinius procesus, vykstančius medžiagoje, taip pat kietų kūnų struktūrą ir jų kontaktinės tarpusavio sąveikos procesus. Daugeliu tyrimų įrodyta, kad klasikinių medžiagos apdorojimo būdų – terminio, deformacinio arba mechaninio – derinimas su ultragarsiniu ne tik juos spartina ir intensyvina, bet ir praplečia taikymo ribas. Pavyzdžiui, ultragarsu apdirbant metalus spaudimo būdu medžiagas pavyksta deformuoti gerokai daugiau. Įprastomis sąlygomis tokio dydžio deformacijos jos neatlaikytų ir suirtų. Ypač plačiai paplitęs kietų ir trapių medžiagų ultragarsinis pjovimas. Trapiose medžiagose išpjauti sudėtingos konfigūracijos kiaurymės arba ertmės kitais metodais dažnai tiesiog neįmanoma. Ultragaras gerokai padidino tekinimo, šlifavimo, gręžimo, sriegimo, detalių paviršių plastinio deformavimo ir kitų technologinių operacijų efektyvumą. Ultragarą galima naudoti kaip savarankišką technologiją arba derinti su kitais apdorojimo būdais. Savarankiškoms technologijoms priskiriamas ultragarsinis suvirinimas ir ultragarsinis litavimas (**1.11 pav.**) Ultragarso virpesiai ypač stipriai veikia skystos būsenos medžiagas, todėl jie sėkmingai taikomi lydiniams degazuoti, paviršiams valyti, kristalizacijos procesams valdyti. Minėtieji pavyzdžiai – toli gražu ne visas ultragarso taikymo pavyzdžių sąrašas [28].



1.11 pav. Ultragarso technologinis taikymas

Dažniausiai vibracijos yra įvedamos lydinio kristalizacijos metu, dėl to sumažėja porų skaičius, jų tūris. Įrodyta, kad intensyvūs ultragarsiniai virpesiai sukuria degazacinį efektą mažo tankio lydiniuose. Dažniausiai yra naudojami vertikalčiai orientuoti virpesiai. Kol kas horizontalūs vibraciniai virpesiai nėra plačiai paplitę. Dažniausiai naudojamos 3 vibracinio apdorojimo technologijos:

- ✓ viso pagrindo, ant kurio yra gaminys, vibravimas;
- ✓ tik skysto metalo vibravimas;
- ✓ elektromagnetinė indukcija.

Pirmas būdas yra plačiausiai naudojamas. Šis metodas užtikrina gerus proceso rezultatus, esant žemo dažnio ir didelės amplitudės vibracijoms. Šio metodo efektyvumą riboja tai, kad tarp gaminio ir padėklo, ant kurio jis yra, atsiranda vibracijos atspindys, todėl pasikeičia suminis vibracijos dažnis bei amplitudė. Antras būdas yra kur kas sudėtingesnis, reikalaujantis brangios įrangos [12].

Vibracinio apdorojimo panaudojimas suvirinime

Pagrindinė pritaikymo sritis suvirinime yra liekamųjų įtempių bei deformacijų sumažinimas. Naudojant vibracijas padidėja konstrukcijos atsparumas lenkimui, tačiau takumo bei tempimo riba žymiai nepasikeičia, lyginant su įprastiniu suvirinimu be vibracijų. Vibracinis apdorojimas pakeičia terminį apdorojimą. Lyginant su terminiu apdorojimu, vibracinis apdorojimas teikia šiuos privalumus: mažesnės investicijos įrangai; mažesnės sąnaudos; patogesnis valdymas; mažesnė tarša; sutrumpėja gamybos laikas [2].

2. VIBROMECHANISKAI VEIKIAMŲ PERLYDYMO METU PURKŠTINIŲ DANGŲ TYRIMAS

2.1. Tyrimo objektas

Dangos buvo purškiamos ant mažaaanglio konstrukcinio plieno S235J0 (pagal EN 10027–1) plokštelių. Supjaustytų plokštelių matmenys $100 \times 100 \times 10$ mm. Plokštelės išpjautos iš plieninės juostos, naudojant aušinamą juostinį pjūklą OPTIMUM (2.1 pav.). Aušinimas pjovimo metu buvo naudojamas tam, kad neįvyktų plieno struktūriniai virsmai. Plieno S235J0 cheminė sudėtis bei fizikinės savybės pateiktos 2.1 ir 2.2 lentelėse.



2.1 pav. Aušinamas juostinis pjūklas OPTIMUM

2.1 lentelė. Plieno S235J0 cheminė sudėtis

Medžiaga	Fe	C	Mn	S	P	N	Cu
Plienas S235J0	bal.	0,17	1,40	0,030	0,030	0,012	0,55

2.2 lentelė. Plieno S235J0 fizikinės savybės

Savybė	Reikšmė	Matas
Šiluminis plėtimasis	12	$10^{-6}/K$
Šiluminis specifinis laidumas	53	W/m.K
Specifinė šiluma	470	J/kg.K
Lydymosi temperatūra	1500	$^{\circ}C$
Tankis	7850	kg/m^3

Plokštelės buvo dengiamos šveicarų firmos „Castolin Eutectic“ metalo miltelių danga, kurios pagrindas NiCrBSi (**2.3 lentelė**). Ši danga naudojama ten, kur reikalingas atsparumas trinčiai, susidėvėjimui.

2.3 lentelė. NiCrBSi miltelių cheminė sudėtis, %

<i>Medžiaga</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>	<i>B</i>	<i>Si</i>	<i>C</i>
NiCrBSi milteliai	bal.	10,2	2,8	1,6	3,2	0,4

2.2. Tyrimo metodika

Po pjovimo atliktas plokštelių paviršiaus paruošimas. Pirmiausiai plokštelės nuriebalintos vaitspiritu. Vėliau paviršius pašiurkštintas, nuvalant šratų srautu. Prieš padengimo procesą plokštelių paviršius pakaitintas neutralia acetileno–deguonies liepsna iki temperatūros 250–290 °C (**2.4 lentelė**). Temperatūros matavimams naudotas infraraudonųjų spindulių termometras (**2.2 pav.**).

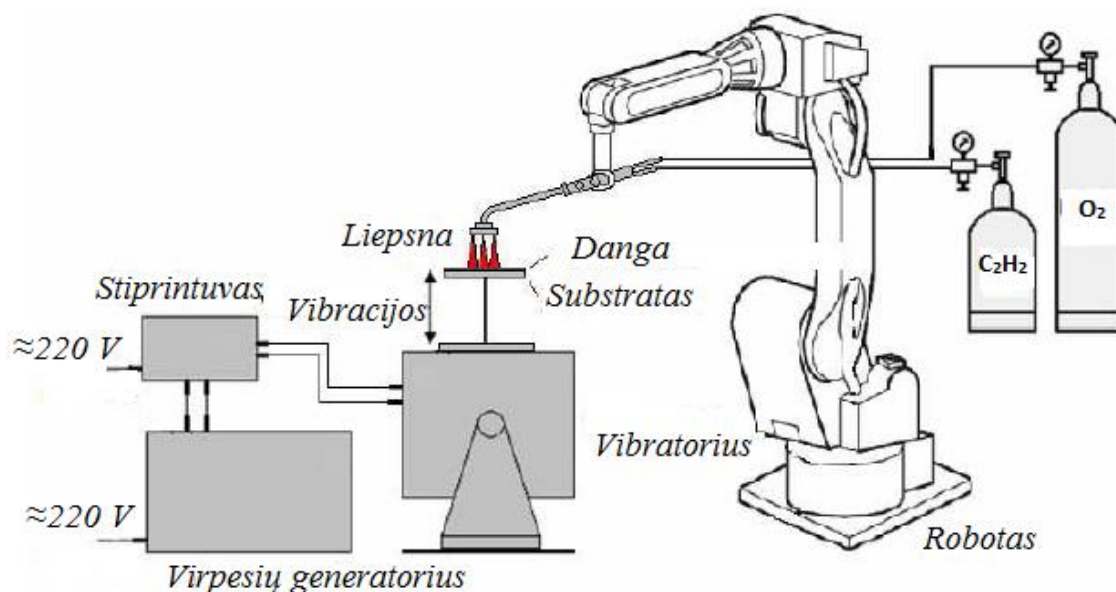


2.2 pav. Infraraudonųjų spindulių termometras

2.4 lentelė. Substrato paruošimo bei purškimo parametrai

<i>Substrato paruošimas</i>	Nuriebalinimas bei abrazyvinis pašiurkštinimas	<i>Purškimo atstumas</i>	170 mm
<i>Substrato pakaitinimas</i>	250–290 °C neutrali liepsna	<i>Purškimo greitis/žingsniai/ėjimai</i>	250 mm/s/ 5/ 8
<i>Purškimo liepsna</i>	0,7 bar C ₂ H ₂ / 4 bar O ₂	<i>Užpurkšto sluoksnio storis</i>	1,2–1,4 mm

Dangų purškimui bei perlydymui naudotas robotizuotas terminio purškimo bei perlydymo stendas (2.3 pav).



2.3 pav. Robotizuoto vibracinio dangų perlydymo stendo schema

Stendas buvo sumontuotas Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos fakulteto Mašinų gamybos laboratorijoje. Purškimo metu bandinių vibromechaninis apdorojimas nenaudotas. Pagrindas, ant kurio buvo padėtos plokštelės, statiškas.

Dangos purkštos Šveicarijos firmos „Castolin Eutectic“ dujinio purškimo pistoletu „Rototec 80“ (2.4 pav.).



2.4 pav. Dujinio purškimo pistoletas „Rototec 80“

Po purškimo proceso tos pačios plokštelės perlydytos. Perlydymo metu plokštelės buvo vibruojamos skirtingo dažnio bei amplitudės skersiniais mechaniniais virpesiais. Perlydymas

atliktas naudojant „Castolin Eutectic“ perlydymo degiklį „CastoFuse“ (2.5 pav.). 2.5 lentelėje pateikti vibracinio perlydymo parametrai.



2.5 pav. Terminio dujinio liepsninio purškimo perlydymo degiklis „CastoFuse“

2.5 lentelė. Vibracinio apdorojimo parametrai

<i>Numeris</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Dažnis, Hz	20	100	200	Nėra vibracijos
Virpesių amplitudė, μm	255	57	52	

Dangų perlydymas atliktas naudojant neutralią acetileno–deguonies liepsną. Danga kaitinta neutralia acetileno–deguonies liepsna iki temperatūros 1100 °C. Mechaniniai virpesiai naudoti perlydymo metu bei po jo iki tol, kol plokštelės atvėsdavo iki 500 °C.

Dangų mikrostruktūros tyrimai atlikti naudojant optinį mikroskopą NICON MA-200.

3. TYRIMO REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

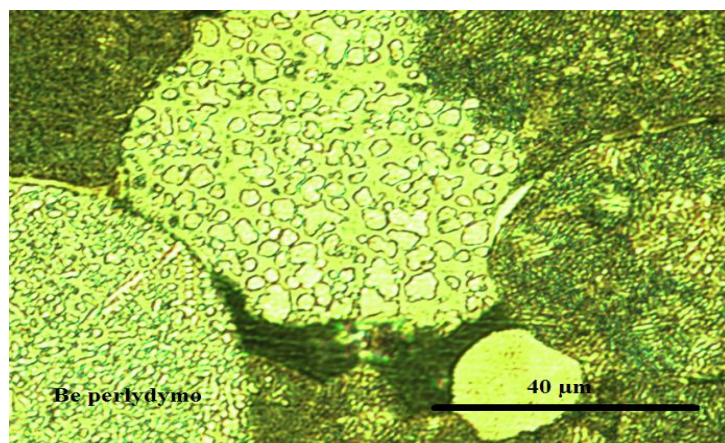
3.1 Dangų mikrostruktūros tyrimai

Matavimo bandinukai išpjauti iš visų plokštelių charakteringų vietų. Bandinukai išpjauti, naudojant aušinamą juostinį pjūklą. Pjauta nuo dangos einant į pagrindinį metalą. Toks techninis sprendimas priimtas, siekiant išvengti dangos nutrupėjimo nuo substrato. Išpjautų bandinukų matmenys $20 \times 10 \times 10$ mm (**3.1 pav.**). Vėliau bandiniai šlifuoti bei poliruoti. Poliravimui naudota deimantinė poliravimo pasta, kurios abrazyvinių dalelių dydis iki 1 μm . Po poliravimo atliktas mikrošlifų ėsdinimas. Ėsdiklis HCl (20 ml) + H_2O (20 ml) + CuSO_4 (4 g). Bandiniai tyrinėti optiniu mikroskopu, esant padidinimui X500. Analizuoti bandinių paviršiniai bei skersiniai pjūviai.

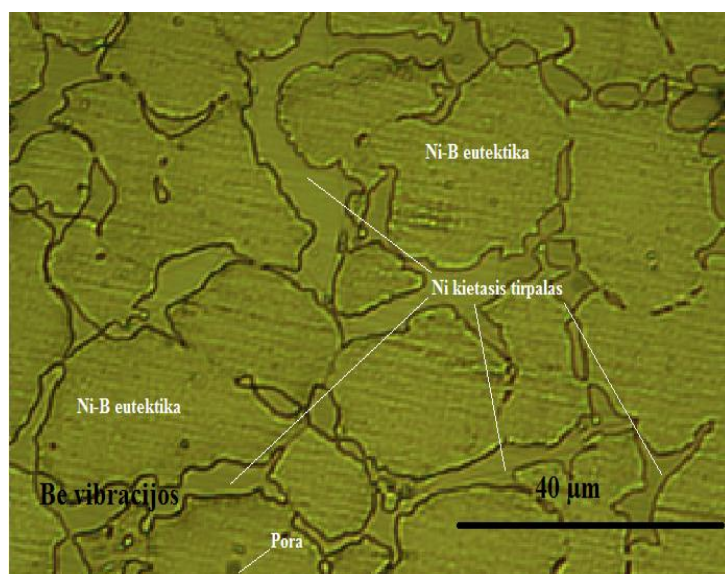
Svarbiausias mikroanalizės tikslas buvo nustatyti struktūros dedamųjų fazių dydį, jų išsidėstymą. Fazių dydis bei pasiskirstymas smarkiai įtakoja mechanines dangų savybes. Norint nustatyti dangos mikrostruktūros fazių cheminę sudėtį reikalinga atlikti Rentgeno mikroanalizę. Tuomet galima nustatyti, kur ir kokia fazė yra, kaip fazės pasiskirsčiusios viena kitos atžvilgiu.



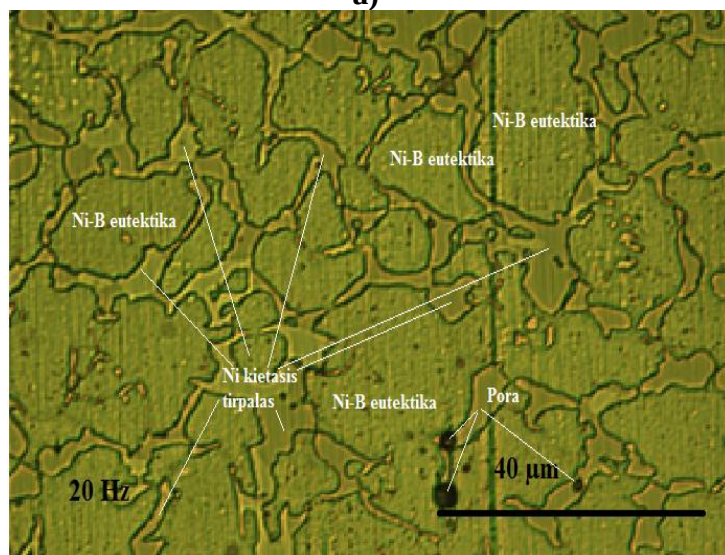
3.1 pav. Bandinių mikrošlifai



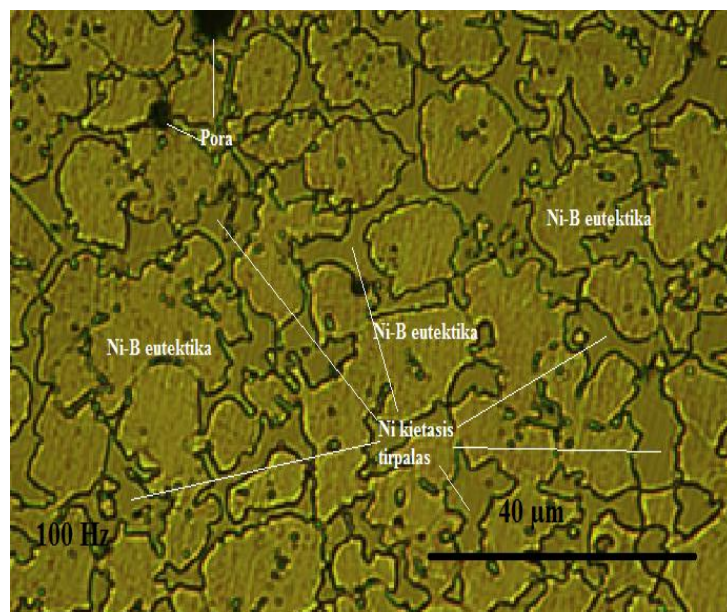
3.2 pav. Neperlydytos dangos mikrostruktūra (padidinimas X500)



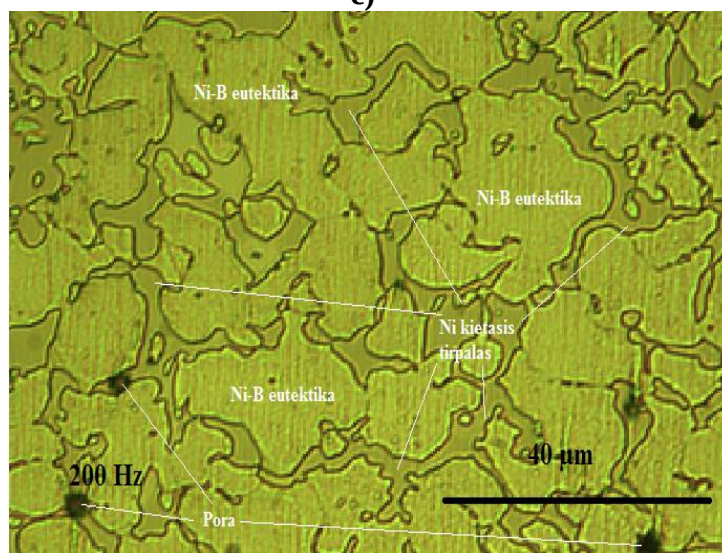
a)



b)



c)

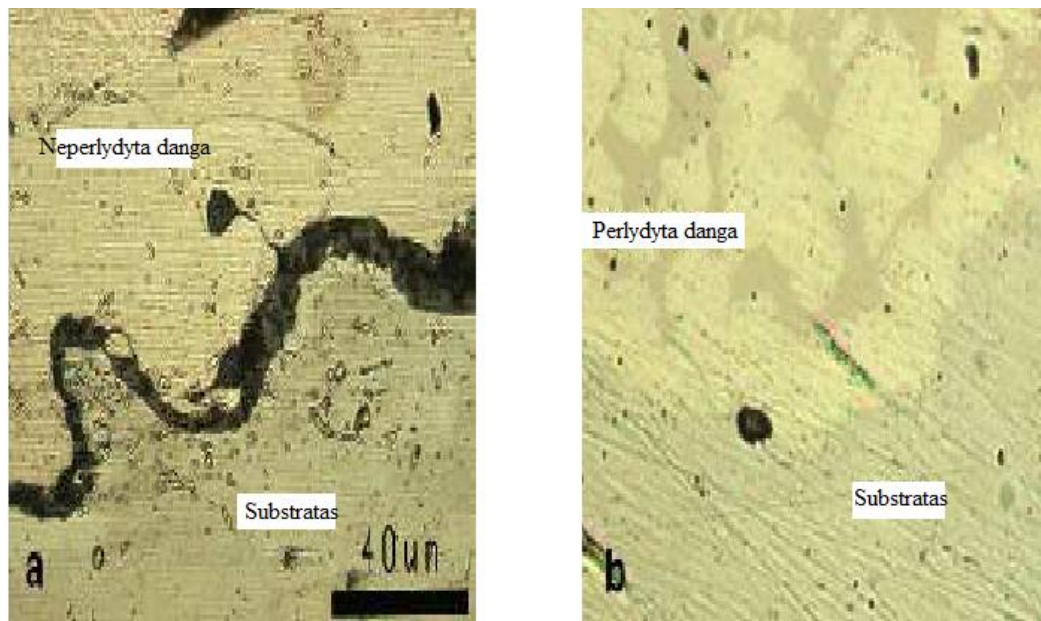


d)

3.3 pav. Perlydytos dangos mikrostruktūra: a – be vibracijos; b – esant 20 Hz vibracijoms; c – esant 100 Hz vibracijoms; d – esant 200 Hz vibracijoms

3.2 pav. matyti, kad neperlydytos dangos mikrostruktūra sudaryta iš didelių grūdelių, tarp kurių yra daug atvirų tuštumų, dideli tarpai tarp grūdelių. Dangos dalelės praktiškai nepakitusios sferinės formos. Dėl didelio dangos porėtumo sukibimas tarp pagrindo ir dangos nėra tvirtas.

3.3 pav. pateiktos perlydytų dangų paviršiaus mikrostruktūros. Kaip matome, vibracijų naudojimas perlydymo metu turėjo įtakos dangos kristalizacijos procesui. Esant didesniai vibracijos dažniui dangos struktūra smulkėja. Atliekant perlydymą tuštumos yra užpildomos. Gaunama vientisa struktūra, sudaryta iš Ni kietojo tirpalo bei Ni-B eutektikos. Visuose bandiniuose pastebėtas grūdo rafinavimas. Perlydytuose bandiniuose pastebėtas fazių įsiterpimas į kitą fazę. Juodi objektai, matomi **3.3 pav.** yra poros.



3.4 pav. Skersiniai bandinių pjūviai: a – prieš perlydymą; b – po perlydymo

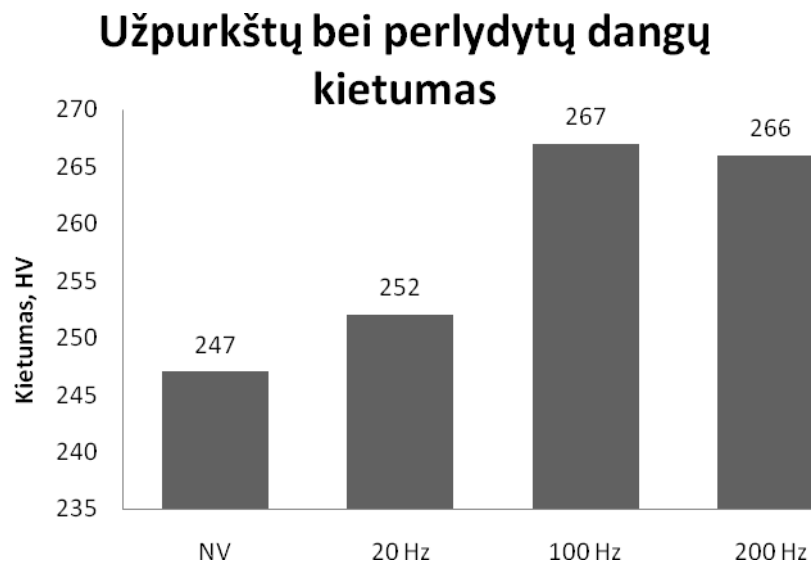
Iš **3.4 pav.** pateiktų skersinių pjūvių matyti dangos sukibimas su substratu. Prieš perlydymą danga su pagrindu yra blogai sukibusi, kadangi yra tuštumų tarp dangos ir substrato. Pačioje dangoje taip pat gausu porų. Atlikus perlydymą, dangos adhezija su pagrindu pagerėja, nes susidaro tvirtas metalurginis ryšys tarp substrato ir dangos. Prieš perlydymą buvusios tuštumos yra užpildomos. Vyksta tarpatominė elementų difuzija iš dangos į pagrindinį metalą ir atvirkščiai.

3.2 Dangų kietumo matavimas

Dangų kietumo matavimas atliktas naudojant standartinę Vikerso kietmatį. Naudota 30 kg apkrova. Kietumas matuotas paviršiniuose dangų šlifuose. Kiekviename bandinyje padaryta po 10 matavimų. Didžiausia ir mažiausia matavimo reikšmės atmetos, o iš likusiųjų išvestas aritmetinis vidurkis (**3.1 lentelė**).

3.1 lentelė. Kietumo matavimo rezultatai, HV

<i>Charakteristika</i>	<i>Be perlydymo</i>	<i>20 Hz</i>	<i>100 Hz</i>	<i>200 Hz</i>
<i>Kietumas, HV</i>	247	252	267	266



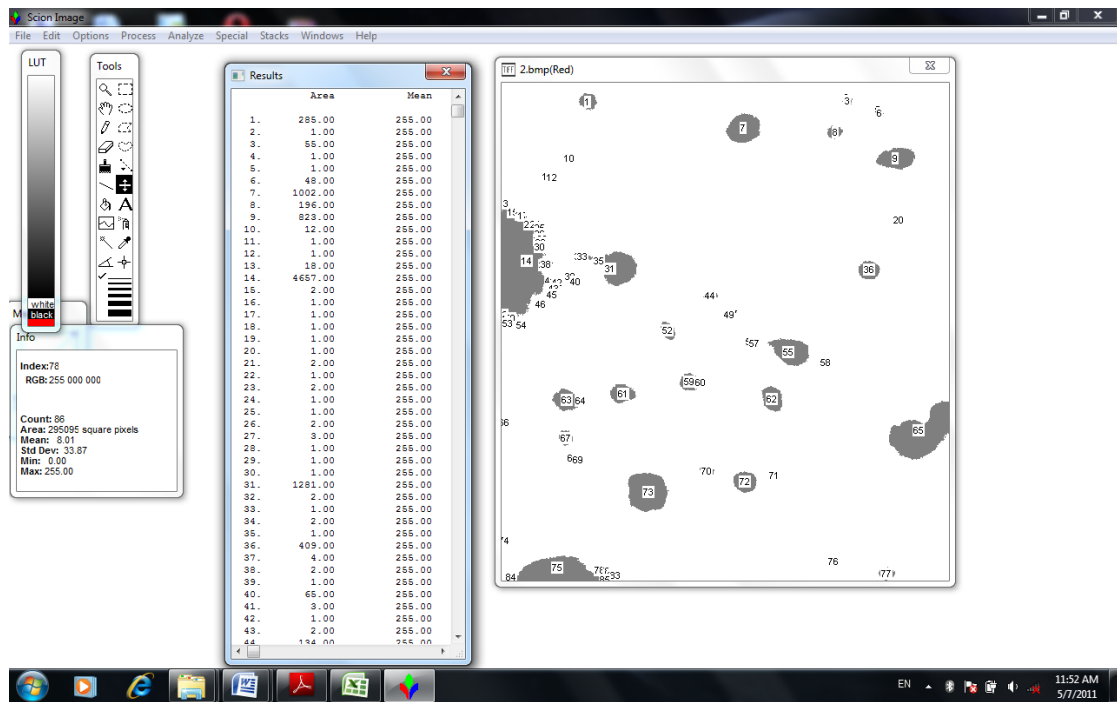
3.5 pav. Užpurkštų bei perlydytų dangų kietumas

Atlikus kietumo matavimus, pastebėta, kad didžiausias dangos kietumas yra bandinyje perlydytame 100 Hz dažniu (šiuo atveju kietumas siekė 267 HV). Kiek mažesnis kietumas gautas naudojant 200 Hz vibracijos dažnį (266 HV). Naudojant 20 Hz vibraciją, kietumas mažai skyrėsi nuo kietumo, išmatuoto bandinyje, kuriam nebuvo atliktas dangos perlydymas (atitinkamai 252 HV ir 247 HV).

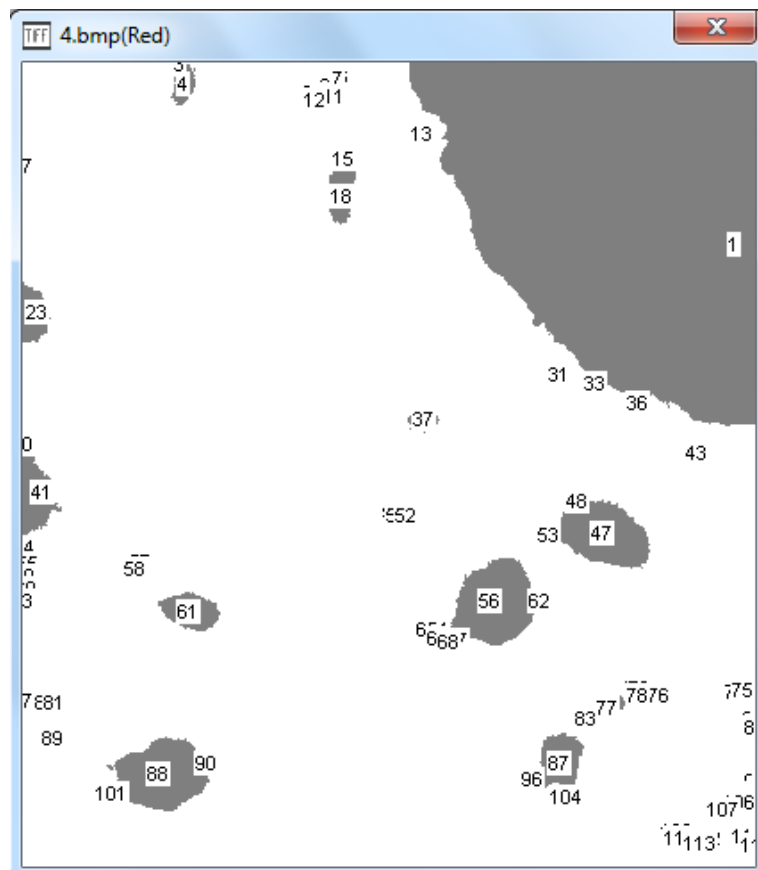
3.3 Dangų porėtumas

Dangų porėtumas nustatytas stereoskopinės metalografijos metodu, naudojant kompiuterinę programą SCION IMAGE (**3.6 pav.**). SCION IMAGE yra nuotraukų apdorojimo bei analizės programa. Ji leidžia nuotraukose surasti objektus, juos redaguoti, analizuoti bei juos animuoti. Su šia programa galima matuoti plotus, kuriuos nurodo vartotojas. Programa automatiškai suskaičiuoja objektų skaičių bei jų užimamą plotą (**3.7 pav.**). Galima užfiksuoti iki 32 767 objektų. Mažiausios dalelės, kurias užfiksuoja programa, yra nuo 1 μm . Programa leidžia nurodyti minimalų bei maksimalų analizuojamų dalelių dydį. Dalelės, kurios nepatenka į nurodytą dydžio intervalą, nėra fiksuojamos. Programos nustatymuose yra galimybė nustatyti režimą, kada objektai, esantys analizuojamos nuotraukos kraštuose, būtų nevertinami.

Paviršiniai bandinių šlifai ($20 \times 10 \times 10$ mm) naudoti porėtumo nustatymui. Kiekvienam bandinukui atlikta po 20 fotonuotraukų. Fotografuota esant padidininui X90. Bendras dangos porėtumas yra aritmetinis vidurkis visų 20 plotų (**3.2 lentelė**).



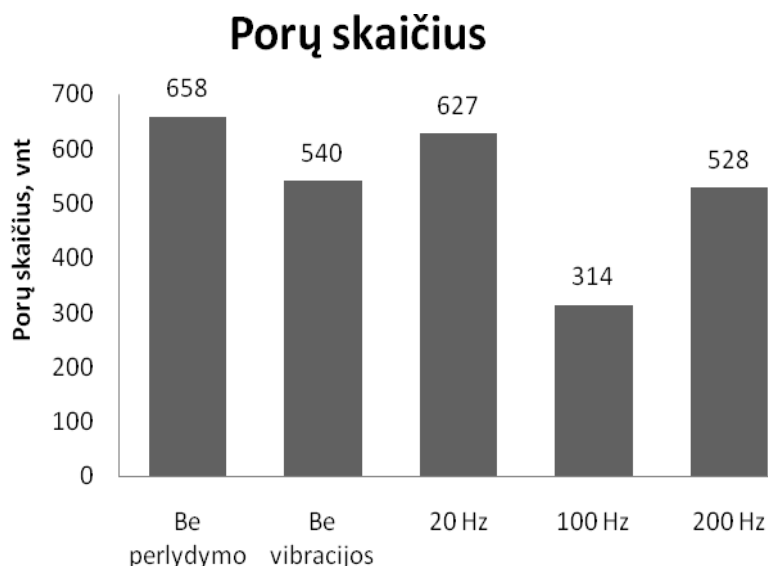
3.6 pav. Programos SCION IMAGE darbinis langas



3.7 pav. Programos SCION IMAGE užfiksuotos poros

3.2 lentelė. Porų skaičius bandiniuose, vnt

<i>Charakteristika</i>	<i>Be perlydymo</i>	<i>Be vibracijos</i>	<i>20 Hz</i>	<i>100 Hz</i>	<i>200 Hz</i>
<i>Porų skaičius, vnt.</i>	658	540	627	314	528



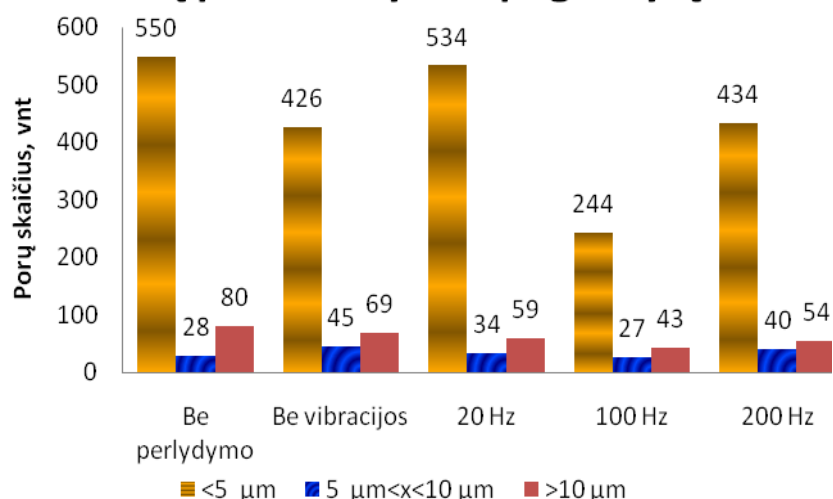
3.8 pav. Porų skaičius bandiniuose

3.8 pav. didžiausias porų skaičius yra pastebėtas bandinyje, kuriame nebuvo atliktas dangos perlydymas po purškimo proceso (iš viso 658 poros). Mažiausias porų skaičius pastebėtas bandinyje perlydytame 100 Hz vibracijos dažniu. Čia pastebėta tik 314 porų lyginant su 658 poromis. Prasčiausias rezultatas perlydant vibromechaniniu būdu gautas, esant mažam vibracijos dažniui (20 Hz). Šiuo atveju rasta beveik tiek pat porų, kaip ir bandinyje, kuriame nebuvo atliktas perlydymas (627 poros lyginant su 658 poromis) (**3.2 lentelė**).

3.3 lentelė. Porų pasiskirstymas pagal dydį, vnt

	$x < 5 \mu m$	$5 < x < 10 \mu m$	$x > 10 \mu m$
<i>Be perlydymo</i>	550	28	80
<i>Be vibracijos</i>	426	45	69
<i>20 Hz</i>	534	34	59
<i>100 Hz</i>	244	27	43
<i>200 Hz</i>	434	40	54

Porų pasiskirstymas pagal dydį



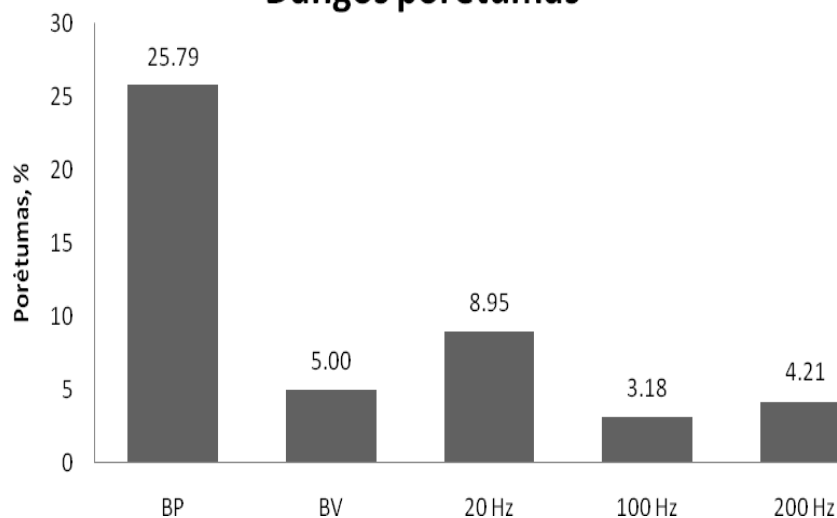
3.9 pav. Porų pasiskirstymas pagal dydį

Atlikus porų pasiskirstymo pagal dydį analizę (**3.9 pav.**), matyti, kad daugiausiai yra mažesnių nei 5 μm porų (**3.3 lentelė**). Daugiausiai tokių porų pastebėta bandinyje, kuriame nebuvo atliktas dangos perlydymas (550 vnt.). Visuose bandiniuose tokio dydžio poros buvo vyraujančios. Mažiausiai užfiksuota porų, kurių dydis nuo 5 iki 10 μm (daugiausiai bandinyje be perlydymo – 80).

3.4 lentelė. Dangų porėtumo vidutinės reikšmės, %

Charakteristika	Be perlydymo	Be vibracijos	20 Hz	100 Hz	200 Hz
Dangų porėtumo vidurkis, %	25,79	5,00	6,39	3,28	4,21

Dangų porėtumas



3.10 pav. Dangų porėtumo vidurkis

Iš pateiktos stulpelinės diagramos (**3.10 pav.**) matome, kad didžiausias dangos porėtumas yra neatlikus perlydymo. Šiuo atveju porėtumas siekė 25,79 %. Dangos, gautos terminio liepsninio purškimo metu, leistinas porėtumas gali būti iki 25 %. Atlikus įprastinį perlydymą be vibracijos, dangos porėtumas stipriai sumažėja (iki 5,00 %). Labai žemo dažnio (20 Hz) vibracijos, lyginant su įprastiniu perlydymu, padidino dangos porėtumą iki 8,95 %. Taikant 100 Hz ir 200 Hz vibracinį perlydymą, buvo gauti geriausi dangos porėtumo rezultatai. Atitinkamai 3,18 % bei 4,21 % (**3.4 lentelė**).

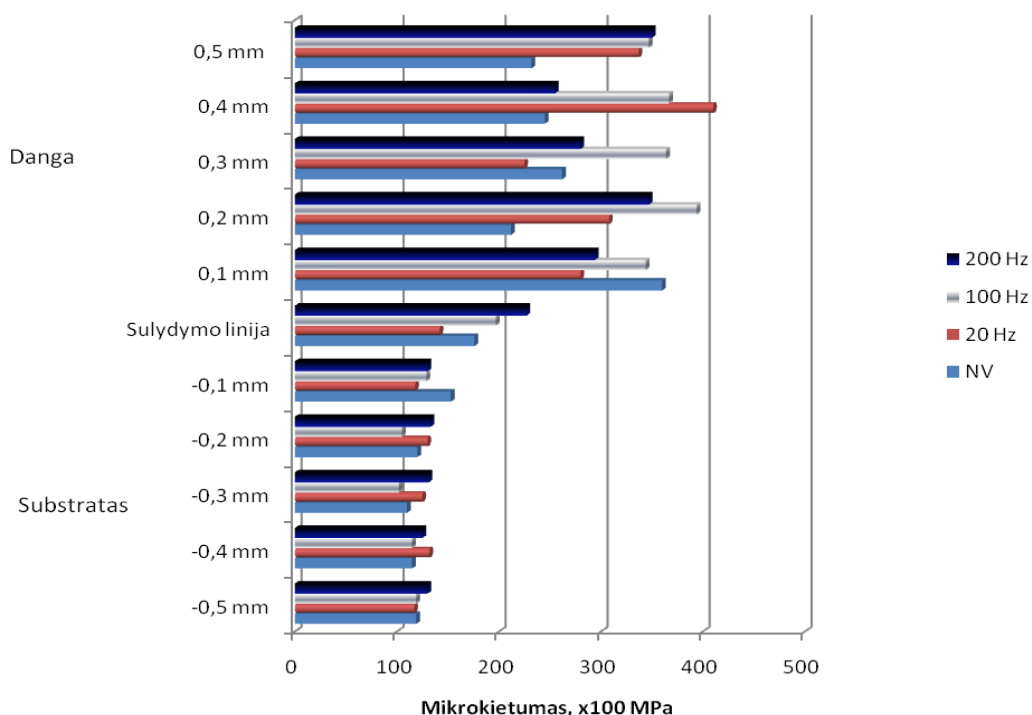
3.4 Dangų mikrokietumas

Mikrokietumas matuotas standartiniu Vickerso mikrokietmačiu. Naudota 200 g apkrova bei 10 s išlaikymas. Matavimai atlikti skersiniuose bandinukų pjūviuose (20×10×10 mm). Nagrinėtos zonos: danga, sulydymo linija, pagrindinis metalas. Matavimo žingsnis 0,1 mm. Mikrokietumas matuotas esant padidinimui X500.

3.5 lentelė. Mikrokietumo matavimo rezultatai, ×100 MPa

<i>Zona</i>	<i>Atstumas</i>	<i>Nėra vibracijos</i>	<i>20 Hz</i>	<i>100 Hz</i>	<i>200 Hz</i>
<i>Substratas</i>	-0,5 mm	119	117	119	130
	-0,4 mm	115	132	115	125
	-0,3 mm	110	125	102	131
	-0,2 mm	120	130	105	133
	-0,1 mm	153	118	129	130
Sulydymo linija		176	142	197	227
<i>Danga</i>	0,1 mm	360	280	344	294
	0,2 mm	212	308	394	347
	0,3 mm	262	225	364	280
	0,4 mm	245	410	367	255
	0,5 mm	232	337	347	350

Bendras mikrokietumas



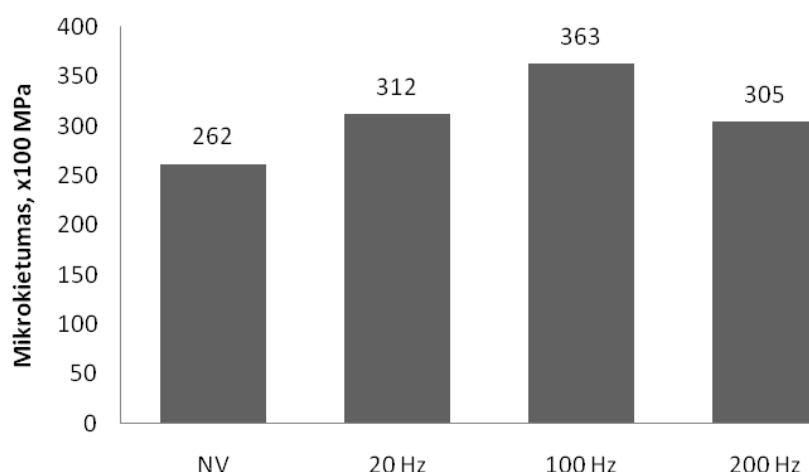
3.11 pav. Mikrokietumo matavimo rezultatai

Iš **3.11 pav.** aiškiai matome, kad dangos mikrokietumas žymiai skiriasi nuo pagrindinio metalo kietumo. Dangos mikrokietumas didesnis, kadangi dangoje susidaro kietos fazės, kaip karbidai bei boridai. Pagrindiniame metale (substrate) mikrokietumas praktiškai visuose matavimo taškuose yra vienodas, reikšmių išsibarstymas nežymus. Matuojant dangos mikrokietumą, pastebėta, kad pastoviausios mikrokietumo reikšmės gautos esant 100 Hz vibraciniam perlydymui. Kuo mažesnis mikrokietumo reikšmių svyravimas, tuo tolygesnė, smulkesnė gauta dangos struktūra. Kiek didesnis reikšmių svyravimas pastebėtas bandiniuose, perlydytuose 200 Hz dažniu. Iš diagramos taip pat matyti, kad mažiausias dangos mikrokietumas gautas be vibracinio perlydymo. Bandiniuose perlydytuose 20 Hz dažniu pastebimas didelis mikrokietumo reikšmių išsibarstymas, todėl galima spėti, kad gauta dangos mikrostruktūra yra nevienalytė (joje pasireiškia elementų segregacija), stambiagrūdė (**3.5 lentelė**).

3.6 lentelė. Vidutinis dangos mikrokietumas, $\times 100 \text{ MPa}$

Charakteristika	Nėra vibracijos	20 Hz	100 Hz	200 Hz
Mikrokietumas, $\times 100 \text{ MPa}$	262	312	363	305

Vidutinis dangos mikrokietumas

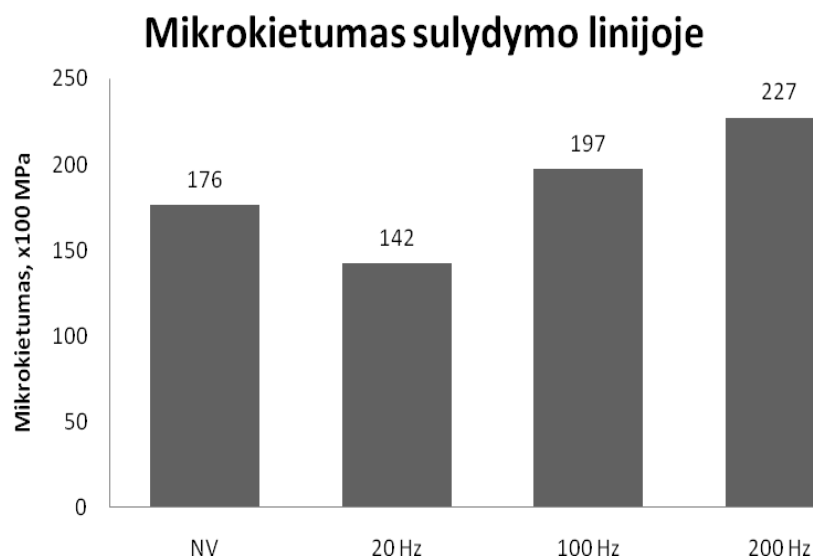


3.12 pav. Vidutinis dangos mikrokietumas

Iš pateiktos diagramos (**3.12 pav.**) matyti, kad didžiausias dangos mikrokietumas gautas bandiniuose perlydytuose 100 Hz dažniu ($363,12 \times 100$ MPa), todėl galima manyti, kad dangos struktūra yra smulkiagrūdė, maža elementų segregacija. Kiek prastesni rezultatai gauti taikant 20 Hz bei 200 Hz vibracinį perlydymą (atitinkamai $311,95$ ir $305,24 \times 100$ MPa). Mažiausias dangos mikrokietumas gautas dangose, perlydytose be mechaninių virpesių. Lyginant su perlydymu, esant 100 Hz vibraciniams virpesiams, mikrokietumas sumažėjo nuo $363,12 \times 100$ MPa iki $262,15 \times 100$ MPa. Sumažėjimas siekia beveik 29 % (**3.6 lentelė**). Galima daryti prielaidą, kad po įprastinio perlydymo dangos struktūra yra stambiagrūdė, cheminių elementų pasiskirstymas struktūroje nėra tolygus, formuojasi stambios fazės.

3.7 lentelė. Mikrokietumas sulydymo linijoje, $\times 100$ MPa

<i>Charakteristika</i>	<i>Nėra vibracijos</i>	<i>20 Hz</i>	<i>100 Hz</i>	<i>200 Hz</i>
Mikrokietumas, $\times 100$ MPa	176	142	197	227



3.13 pav. Mikroketumas sulydymo linijoje

Svarbus parametras yra mikroketumas sulydymo linijoje (**3.7 lentelė**). Nuo mikroketumo sulydymo linijoje priklauso dangos fizikinės, technologinės bei mechaninės savybės. Iš **3.13 pav.** matyti, kad didžiausias mikroketumas šioje zonoje gautas esant 200 Hz vibracinam perydymui ($226,68 \times 100$ MPa). Kiek mažesnis mikroketumas gautas, esant 100 Hz mechaniniams virpesiams ($196,96 \times 100$ MPa). Mažiausias mikroketumas gautas esant 20 Hz mechaniniams virpesiams ($141,24 \times 100$ MPa). Lyginant su perlydymu be virpesių, esant 100 Hz dažniui mikroketumas padidėjo beveik 29 %.

3.5 Dangų atsparumas dilimui

Dviejų kūnų sausos trinties dilimo bandymas atliktas dilimo mašinoje (**3.13 pav.**). Naudotas SiC abrazyvinis švitrinis popierius #220 (grūdėlio dydis $58 \mu\text{m}$). Bandinukai prie abrazyvo prispausti 35 N jėga. Visi bandiniai bandyti po 16000 apsisukimų. Pirmieji 2000 apsisukimų nevertinti, kadangi reikėjo pašalinti dangos šiurkštumą bei šlakus susidariusius purškimo ir perlydymo metu. Vėliau visi bandiniai kruopščiai pasverti, kiekviename bandinyje Vikerso mikroketmačiu padarytos įspaudos. Kas 2000 apsisukimų keistas švitrinis popierius, stebimas dangos svorio bei įspaudos matmenų kitimas (**3.8 lentelė**).



a)

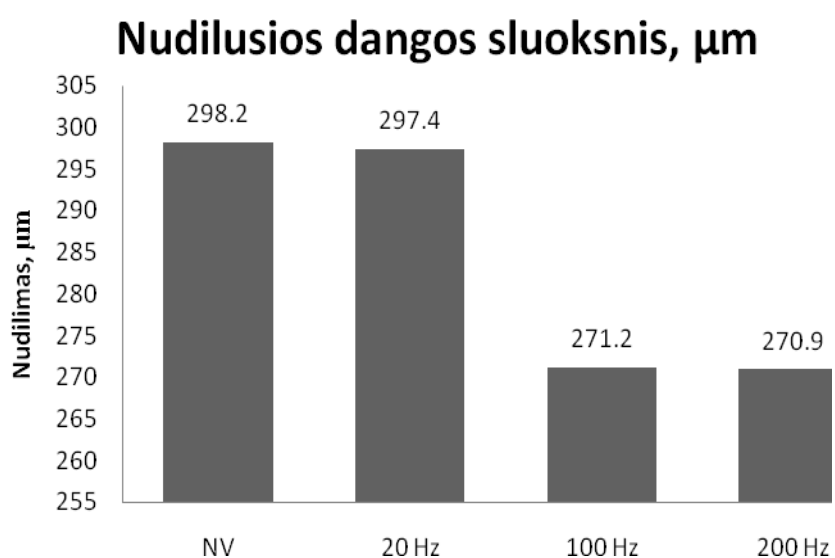


b)

3.14 pav. Trinties mašina: a – 2101 TP trinties mašina, b – bandiniai, įtvirtinti trinties mašinoje

3.8 lentelė. Nudilusios dangos sluoksnis, μm (po 16 000 ciklų)

Charakteristika	Nėra vibracijos	20 Hz	100 Hz	200 Hz
Nudilusios dangos storis, μm	298,2	297,4	271,2	270,9



3.15 pav. Nudilusios dangos sluoksnis (po 16 000 ciklų)

3.15 pav. pateiktas bandinukų nudilusio sluoksnio storis po 16 000 bandymo ciklų. Iš diagramos matyti, kad intensyviausias dilimas bandiniuose, perlydytuose neveikiant

mechaninėmis vibracijomis (298,2 μm). Labai žemo dažnio vibracijos (20 Hz) perlydymo metu nepagerino atsparumo išdilimui (297,4 μm). lyginant su įprastiniu perlydymu, atsparumas dilimui nepadidėjo. Pastebimesnis atsparumas dilimui gautas, taikant 100 Hz ir 200 Hz mechaninius virpesius dangų perlydymo metu. Šiais atvejais nudilusios dangos sluoksnis atitinkamai 271,2 μm ir 270,9 μm . Iš nagrinėtų atvejų didžiausias atsparumas dilimui yra taikant 100 Hz ar 200 Hz mechaninius virpesius perlydant. Atsparumo išdilimui padidėjimas siekia 10 %.

Dilimo bandymas pagal bandinių svorio praradimą parodė analogiškus rezultatus kaip ir dirbtinių bazių metodas.

IŠVADOS

1. Vibracinis apdorojimas perlydymo metu turi įtakos dangų, sudarytų NiCrBSi pagrindu, formavimuisi bei kristalizacijos procesams.
2. Vibracinis perlydymas lemia susikristalizavusios dangos mikrostruktūrą. Taikant vibracinį perlydymą, pasireiškia grūdo rafinacija, smulkinimas. Smulkiausia struktūra gauta, taikant 100 Hz dažnio mechaninius virpesius.
3. Dangos porėtumas sumažėja nuo 5,0 %, perlydytoje be vibracijų dangoje, iki 3,18 %, naudojant 100 Hz dažnio vibromechaninį apdorojimą.
4. Dangos kietumas padidėja nuo 247 HV (perlydant be vibracijų) iki 267 HV (esant 100 Hz vibracijoms). Mikrokietumas keičiasi nežymiai. Mikrokietumas iš esmės nesiskiria, naudojant įvairaus dažnio vibracijas.
5. Perlydant purkštinę dangą su vibromechaniniu apdorojimu dangos atsparumas dilimui padidėja apytiksliai 10 %. Geriausias rezultatas gautas, naudojant 200 Hz dažnio virpesius.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Abu-Dheir, Khraisheh M., Saito K., Male A. 2005. Silicon morphology modification in eutectic Al – Si alloy using mechanical mold vibration. *Materials and science engineering A* 393 109–117.
2. Chirita G., Stefaneson I., Soares D., Silva F. S. 2009. Influence of vibration on the solidification behaviour and tensile properties of an Al-18 wt % Si alloy. *Materials and Design* 30 1575–1580.
3. Dent A.H., Horlock A. J., McCartney D. G., Harris S. J. 2001. Microstructural characterisation of a Ni-Cr-B-C based alloy coating produced by high velocity oxy-fuel thermal spraying. *Surface and coatings technology* 139 244–250.
4. European Welding Engineers mokymo medžiaga. Medžiagos ir jų elgsena suvirinimo metu. Apsauginės dangos. Prieiga per internetą: (e-stud.vgtu.lt/users/files/dest/9282/apsaugines%20dangos.pdf). Žiūrėta 2010.09.17.
5. Foroormehr E., Lin D., Kovacevic R.. 2009. Application of vibration in the laser powder deposition process. *Journal of manufacturing processes* 11 38–44.
6. Independent Metallurgist and Consultant to the Thermal Spray Coating Industry. Prieiga per internetą: (<http://www.gordonengland.co.uk/tsc.htm>). Žiūrėta 2011.02.17.
7. Independent Metallurgist and Consultant to the Thermal Spray Coating Industry. Prieiga per internetą: (<http://www.gordonengland.co.uk/tsc.htm>). Žiūrėta 2011.02.17.
8. Thermal Spray Technologies. Prieiga per internetą: (http://www.tstcoatings.com/electric_arc_spray.html). Žiūrėta 2011.02.17.
9. Thermal Spray Technologies. Prieiga per internetą: (http://www.tstcoatings.com/flame_spray.html). Žiūrėta 2011.02.17.
10. Thermal Spray Technologies. Prieiga per internetą: (<http://www.tstcoatings.com/HVOF.html>). Žiūrėta 2011.02.17.
11. Thermal Spray Technologies. Prieiga per internetą: (http://www.tstcoatings.com/plasma_spray.html). Žiūrėta 2011.02.17.
12. Kocatepe K. 2007. Effect of low frequency vibration on porosity of LM 25 and LM6 alloys. *Materials and design* 28 1767–1775.
13. Lee C.H., Min K.O. 2000. Effects of heat treatment on the microstructure and properties of HVOF-sprayed Ni-Cr-W-Mo-B alloy coatings. *Surface and coatings technology* 132 49–57.

14. Li J. F., Li L., Scott F. H. 2004. Combined laser and flame surface coating of refractory ceramics: phase and microstructural characteristics. *Thin Solid Films* 453 67–71.
15. Li J., Momono T., Tayn Y., Fu Y. 2008. Application of ultrasonic treating to degassing of metal ingots. *Materials letters* 62 4152–4154.
16. 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.
17. LST EN ISO 13144:2003. Metalinės ir kitos neorganinės dangos. Kiekybinio adhezijos matavimo tempimo bandymu metodas ir oksidacijos aukštose temperatūrose. (EN 13144:2003). Galioja nuo 2003.12.28.
18. LST EN ISO 1463:2004. Metalinės ir oksidinės dangos. Dangos storio matavimas. Mikroskopinis metodas. (ISO 1463:2004). Galioja nuo 2001.05.10.
19. LST EN ISO 16348:2004. Metalinės ir kitos neorganinės dangos. Apibrėžtys ir nuostatos dėl išvaizdos. (ISO 16348:2003). Galioja nuo 2004.06.29.
20. LST EN ISO 17834:2004. Terminis purškimas. Dangos apsaugančios nuo korozijos ir oksidacijos aukštose temperatūrose (ISO 17834:2003). Galioja nuo 2004.07.15.
21. LST EN ISO 18332:2008. Apibrėžtys ir nuostatos, susijusios su akytumu. (ISO 18322:2008). Galioja nuo 2008.04.30.
22. LST EN ISO 4516:2002. Metalinės ir kitos neorganinės dangos. Vikerso ir Knopo mikrokietumo bandymai. (ISO 4516:2002). Galioja nuo 2002.12.16.
23. Qinghua L., Ligong C., Chunzhen N. 2007. Improving welded valve quality by vibratory weld conditioning. *Materials Science and Engineering A* 457 9246-253.
24. Rumbutis L., Višniakas I., Jurčius A. 2010. Konstrukcinio plieno suvirinimo siūlių mechaninių savybių tyrimas suvirinimo metu naudojant vibracijos energiją. *Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba. Mokslas – Lietuvos ateitis 2010*, 2 tomas, Nr. 4..
25. Sindhu B. S., Puri D., Prakash S. 2005. Mechanical and metallurgical properties of plasma sprayed and laser remelted Ni-20Cr and Stellite-6 coatings. *Journal of materials Processing Technology* 159 347–355.
26. Sundararajan T., Kuroda S., Abe F., Sodeoka S. 2005. Effect of thermal cycling on the adhesive strength of Ni-Cr coatings. *Surface and Coatings Technology* 194 209–219.
27. Ščemeliovas J. 2008. Inžinerinės medžiagos ir jų gamybos bei apdorojimo technologijos. Vilnius: Technika, 116 p.

28. Škamat J., Valiulis A. V. 2010. Apie galimybes ultragarsą naudoti terminio purškimo technologijose. *Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba. Mokslas – Lietuvos ateitis* 2010, 2 tomas, Nr. 4.
29. Taghavi F., Saghafian H., Kharzari Y. H. K. 2009. Study of the effect of prolonged mechanical vibration on the grain refinement and density of A 356 aluminium alloy. *Materials and Design* 30 1604–1611.
30. Tamulevičius S., Vilys J., Grigaliūnas V., Meškinis Š., Guobienė A. 2007. Paviršiaus inžinerija ir nanotechnologijos. *Mokomoji knyga*. Kaunas: Vitae litera, 225 p.
31. Valiulis A. V. 1988. Plazminis suvirinimas, pjovimas, purkštymas ir aplydymas. Vilnius: Mokslas, 122 p.
32. Valiulis A. V. 2005. Naujos medžiagos. *Vadovėlis*. Vilnius: Technika, 280 p.
33. Valiulis A. V. 2010. Šiuolaikiškos inžinerinės medžiagos. *Kūrimas ir taikymas. Vadovėlis*. Vilnius: Technika, 304 p.
34. Wang S., Li H., Chen X., Chi J., Li M., Chai L., Xu H. 2010. Improving microstructure and wear resistance of plasma clad Fe – based alloy coating by mechanical vibration technique during cladding. *Materials science and engineering A*.
35. Министерство строительного дорожного коммунального машиностроения. Научно – исследовательский институт информации по строительному, дорожному и коммунальному машиностроению. 1966. Москва. Вибрационная техника. 506 ст.

PRIEDAI