



ALIUMINIO-MAGNIO LYDINIO PLAZMINIO PURŠKIMO PROCESO TYRIMAS

Patricija KAVALIAUSKAITĖ¹, Raimonda LUKAUSKAITĖ²,
Gerda VAITKŪNAITĖ³, Jelena ŠKAMAT⁴

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

El. paštas: ¹patricija.kavaliauskaite@stud.vgtu.lt; ²raimonda.lukauskaite@vgtu.lt;

³gerda.vaitkunaite@stud.vgtu.lt; ⁴jelena.skamat@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjamos plazminiu būdu užpurkštos 95Ni-5Al dangos ant aliuminio-magnio ($Mg \approx 2,6-3,6\%$) lydinio substrato. Aliuminio-magnio substratų paviršiai prieš purškimą buvo apdorjami mechaniniu apdorojimo būdu (srautinimas Al_2O_3 dalelėmis). Naudojant skirtingus plazminio purškimo proceso parametrus, buvo užpurkštos nikelio-aliuminio dangos ant aliuminio-magnio lydinių. Nustatytas užpurkštų dangų storis, akytumas ir mikrokietis. Buvo atlikta užpurkštos 95Ni-5Al dangos mikrostruktūros analizė. Darbe taip pat atliktas plazminio purškimo elektrinių ir magnetinių reiškinų skaitinis modeliavimas.

Reikšminiai žodžiai: plazminis purškimas, nikelio-aliuminio dangos, aliuminio-magnio lydinys, užpurkštų dangų eksploatacinės savybės, skaitinis modeliavimas.

Įvadas

Pasaulyje vis labiau augant technikos elementų poreikiui, gamyba turi tenkinti vis didesnę jų paklausą. Mašinoms, jų detalėms bei gaminamiems elementams tenka vis didesnės apkrovos, todėl jos turi būti patvaresnės ir ilgaamžiškesnės. Nusidėvėjimas ir korozijos procesai yra pagrindinės mašinų detalių ir metalo konstrukcijų gedimo priežastys. Vienas iš racionalių ir efektyvių būdų apsaugoti detalių paviršius nuo kenksmingų aplinkos veiksnių, pagerinti eksploatacines savybes ir padidinti gaminių darbinį resursą yra detalių dengimas apsauginėmis dangomis (Lukauskaitė 2015; Lukauskaitė *et al.* 2013).

Vienas iš efektyviausių dangos formavimo būdų yra plazminis purškimas. Plazminis purškimas greta kitų terminių apdorojimų būdų (detonacinis, liepsnos purškimas ir kt.) užtikrina didelius dangų formavimo greičius bei galimybę formuoti įvairių medžiagų dangas. Dangos sudaromos iš metalų (net ir sunkiųjų), jų oksidų, keramikos, polimerų. Tinkamai parenkant proceso parametrus dangos formuojamos ir ant temperatūrai jautrių paviršių (Marcinauskas *et al.* 2006). Šiuo purškimo metodu pagerinamos įvairių mašinų, detalių ir įrenginių paviršiaus savybės (atsparumas karščiui, atmosferinei korozijai, nusidėvėjimui ir kt.) (Davis 2009; Ambroza, Kavaliauskienė 2012; Hsiao *et al.* 2011).

Plazminio purškimo metu gaunamų dangų eksploatacinės ir technologinės savybės priklauso nuo susiformavusios

dangos struktūros ir purškimo proceso parametrų. Siekiant sukurti kokybiškas dangas, turinčias geras tribologines ir korozines savybes, svarbi ne tik užpurškiamos medžiagos cheminė sudėtis, bet ir terminio purškimo parametrai (dujų išeiga, srauto galia, slėgis darbinėje kameroje, plazmą sudarančių dujų sudėtis, dalelių dydis, purškimo atstumas, dujų srauto greitis bei temperatūra, substrato temperatūra ir kt.), kurie turi būti atitinkamai parenkami (Magnani *et al.* 2008; Marcinauskas *et al.* 2006).

Pagrindinis šio tyrimo tikslas yra nustatyti purškimo parametrų įtaką plazminiu būdu užpurkštų nikelio-aliuminio dangų storiui ir akytumui. Taip pat atlikti užpurkštos dangos mikrostruktūros, mikrokietumo analizę ir plazminio purškimo elektrinių, ir magnetinių reiškinų skaitinį modeliavimą.

Tyrimo metodai ir įranga

Aliuminio-magnio lydinių substratai (140×20×4 mm) plazminio purškimo būdu buvo purškiami 95Ni-5Al milteliais. Aliuminio-magnio lydinio substrato cheminė sudėtis parodyta 1 lentelėje.

Visi aliuminio-magnio bandiniai prieš plazminį purškimą buvo apdoroti mechaniniu paviršiaus apdorojimo būdu. Mechaninis substrato paviršiaus apdorojimas buvo

1 lentelė. Aliuminio-magnio lydinio substrato cheminė sudėtis, masės %

Table 1. Chemical composition of aluminium-magnesium alloy, weight %

Al	Mg	Mn	Fe	Si	Kiti
Likęs ~94,2–95,2	2,6–3,6	0,5	0,4	0,4	0,9

atliekamas naudojant srautinimą Al_2O_3 dalelėmis (vidutinis dalelių dydis 600–850 μm). Aliuminio-magnio bandinių šurkštumas po paviršiaus apdorojimo buvo nustatomas paviršiaus šurkštumo matuokliu TR- 200.

Plazminis purškimas buvo atliekamas su UPU-3 įranga. Pagrindiniai plazminio purškimo parametrai pateikti 2 lentelėje. Miltelių padavimo dujų išėja visais atvejais buvo 4 l/min, plazmą sudarančių dujų išėja 40 l/min, plokštelės (substrato) judėjimo greitis 25 cm/min, o purškimo ėjimų skaičius 4.

Plazminio purškimo tyrimai buvo atlikti naudojant dvi skirtingas substrato temperatūras – 20 °C ir 350 °C. Substrato kaitinimui ir temperatūros palaikymui buvo naudojamas kaitinimo įrenginys Heatmasters HM31.

Plazminiam purškimui ir dangų tyrimams buvo naudojamosi standartais: LST EN 1274:2005 „Terminis purškimas. Milteliai. Sudėtis, techninės tiekimo sąlygos“.

2 lentelė. Plazminio purškimo parametrai

Table 2. Parameters of plasma spraying

Bandinio žymuo	Srovė, A	Įtampa, V	Purškimo atstumas, mm	Substrato temperatūra, °C
B1	360	45	110	20
B2	360	45	90	20
B3	360	45	70	20
B4	360	45	50	20
B5	440	47	110	20
B6	440	47	90	20
B7	440	47	70	20
B8	440	47	50	20
B9	520	49	110	20
B10	520	49	90	20
B11	520	49	70	20
B12	520	49	50	20
B13	360	45	110	350
B14	360	45	90	350
B15	360	45	70	350
B16	360	45	50	350
B17	440	47	110	350
B18	440	47	90	350
B19	440	47	70	350
B20	440	47	50	350
B21	520	49	110	350
B22	520	49	90	350
B23	520	49	70	350
B24	520	49	50	350

LST EN 13507: 2010 „Terminis purškimas. Metalinių dalių ir komponentų, skirtų terminiam purškimui, paviršių parengiamasis apdorojimas“, LST EN 14616: 2005 „Terminis purškimas. Terminio purškimo rekomendacijos“.

Užpurkštų dangų storis buvo matuojamas naudojant mikrometrą, o dangų aktyumas buvo nustatomas iš padidintų 100 kartų skersinių bandinių nuotraukų, naudojant optinį mikroskopą Nikon Eclipse MA 200 ir vaizdų analizavimo programą „Scion Image“.

Skersinė neėsdinta ir ėsdinta 95Ni-5Al dangos mikrostruktūra buvo tiriama naudojant SEM JEOL JSM-7600F nuskaitančiosios elektroninės mikroskopijos prietaisą su antrinių elektronų SE detektoriumi, didinant vaizdą nuo x500 iki x1500. Elektroninės mikroskopijos parametrai: 10 kV ir 20 kV įtampa, 9 mm ir 19 mm atstumas iki bandinio. Ėsdintos užpurkštos dangos struktūros dedamųjų cheminė sudėtis buvo analizuojama taškinės rentgeno mikroanalizės metodu (RMA).

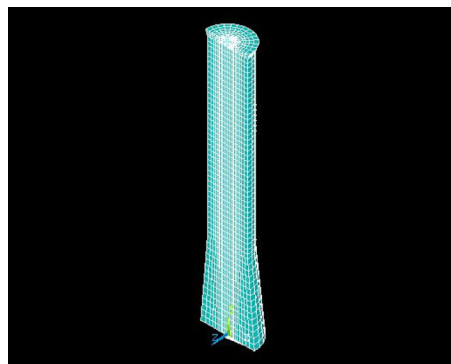
Plazminiu būdu užpurkštos nikelio-aliuminio dangos mikrokiečio matavimai buvo atlikti poliruotuose skersiniuose mikrošlifuose su Zwick Roell ZHμ universaliu automatizuotu kietmačiu. Matavimai atlikti Knopo ir Vikerso metodu su 300 g apkrova ir 15 s išlaikymo laiku. Matuota lygiagrečiai ir statmenai substrato paviršiui. Buvo skaičiuojamas dangos kietumo vidurkis iš 5 matavimo rezultatų, atmetant mažiausią ir didžiausią reikšmę.

Plazminio purškimo metu vykstančių reiškinų modeliavimas buvo atliekamas „Ansys“ programa.

Skaitinio modeliavimo rezultatai

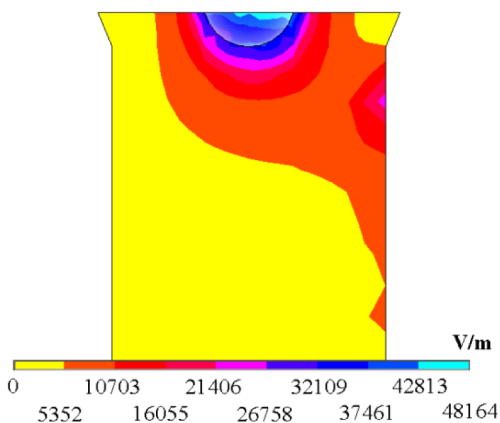
Siekiant geriau suprasti kaip vyksta plazminio purškimo procesas buvo atliekamas skaitinis plazminio purškimo metu vykstančių reiškinų modeliavimas. Programa „Ansys“ buvo sudarytas plazmą sudarančių dujų srauto erdvinis modelis (1 pav).

Modeliuojant buvo laikoma, kad plazmos lanko įtampa yra 49 V, pradinė plazmos lanko temperatūra 15 000 K,

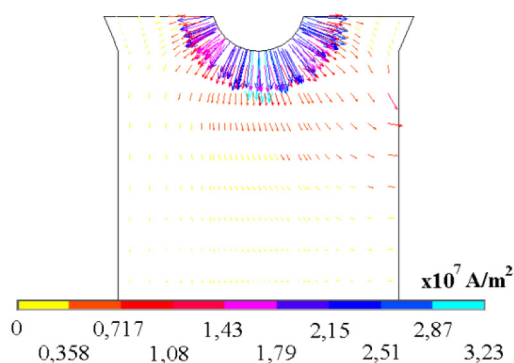


1 pav. Erdvinis plazmos srauto modelis

Fig. 1. A three-dimensional model of plasma flow



2 pav. Plazmos elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas
Fig. 2. Distribution of strength of plasma electric field

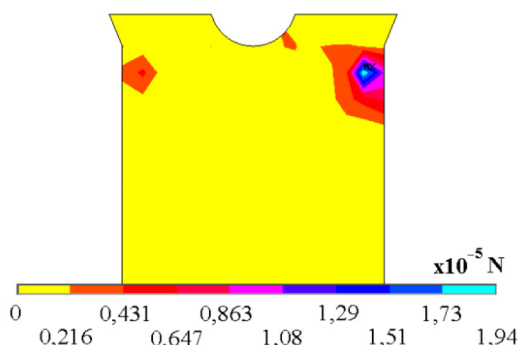


3 pav. Plazmos lanko srovės tankio pasiskirstymas
Fig. 3. Distribution of current density of plasma arc

o santykinė magnetinė skvarba lygi 1. Buvo nustatytas plazmos lanko elektros lauko stiprio ir srovės tankio pasiskirstymas (2–3 pav.).

Didžiausias srovės tankis buvo nustatytas lanko katinėje srityje ir siekė $32,3 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ (3 pav.).

Remiantis plazmos lanko srovės tankio pasiskirstymu, buvo apskaičiuotos elektromagnetinių Lorencio jėgų reikšmės plazmos sraute (4 pav.).



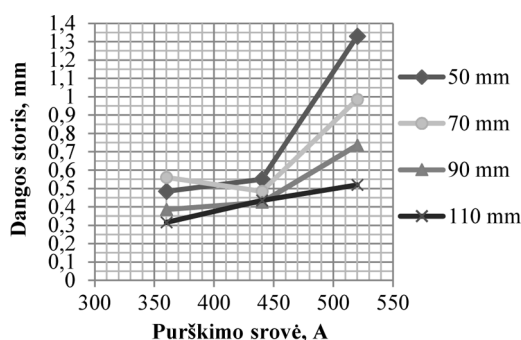
4 pav. Elektromagnetinės Lorencio jėgos reikšmių pasiskirstymas plazmos sraute
Fig. 4. Distribution of Lorentz electromagnetic force in plasma flow

Atlikus plazmos srautų modeliavimą buvo nustatyta, kad dujų srautas plazmotrono viduje pasiskirsto simetriškai ir plazmotrono galo srityje įgauna maksimalų 153,6 m/s greitį.

Eksperimentinių tyrimų rezultatai

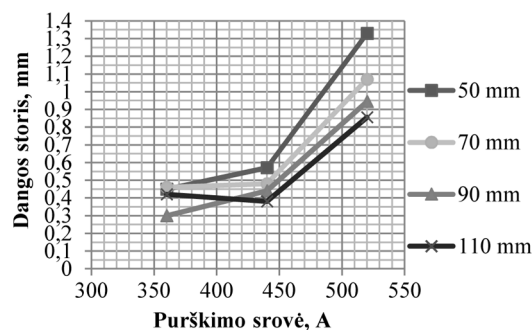
Nikelio-aliuminio dangos buvo purškiamos ant Al-Mg lydinio substrato, keičiant purškimo parametrus: srovę, įtampą, purškimo atstumą. Taip pat buvo keičiamos substrato temperatūros (20 °C ir 350 °C). Užpurškus dangas, buvo matuojamas jų storis mikrometru. 95Ni-5Al dangų storio priklausomybė nuo purškimo srovės, esant skirtingoms substrato temperatūroms parodytos 5–6 pav.

Iš 5 ir 6 paveikslų matome tendenciją, kad esant tiek 20 °C, tiek 350 °C substrato temperatūrai užpurkštos dangos storėja didinant purškimo srovę. Tačiau pastebėta, kad plonesnės nikelio-aliuminio dangos susidaro esant 20 °C aliuminio-magnio substrato temperatūrai. Taip atsitinka



5 pav. Dangos storio priklausomybė nuo plazmos srovės, esant 20 °C substrato temperatūrai ir skirtingiems purškimo atstumams

Fig. 5. The dependence of coating thickness from plasma current at 20 °C substrate temperature and different spray distance



6 pav. Dangos storio priklausomybė nuo plazmos srovės, esant 350 °C substrato temperatūrai ir skirtingiems purškimo atstumams

Fig. 6. The dependence of coating thickness from plasma current at 350 °C substrate temperature and different spray distance

todėl, kad nikelio-aliuminio purškimo dalelės purškimo metu atšoka nuo šaltesnio paviršiaus ir išsisklaido. Todėl mažesnė jų dalis suformuoja dangą. Storesnės dangos susidaro esant 350 °C substrato temperatūrai.

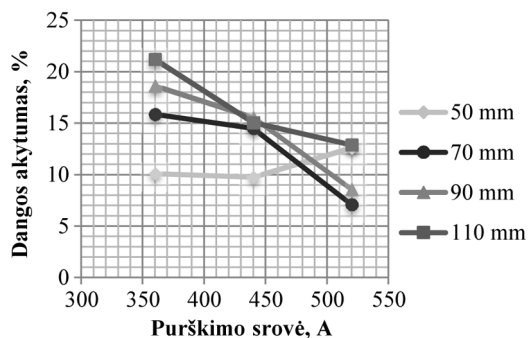
Purškiant visais purškimo atstumais, esant 360 A, 440 A purškimo srovei, kai substratas yra 20 °C ir 350 °C temperatūros, dangos susidaro pakankamai nestoros (0,3–0,55 mm) (B1–B8, B13–B20). Taip atsitinka todėl, kad dalis purškimo miltelių nepasiekia substrato paviršiaus, o kita dalis pasklinda plačiu diapazonu aliuminio-magnio lydinio paviršiuje.

Kai aliuminio-magnio lydinys yra dengiamas purškiant 70 mm atstumu, esant 520 A purškimo srovei, 49 V įtampai ir skirtingoms substrato kaitinimo temperatūroms, dangos storis yra apie 2 kartus didesnis nei purškiant silpnėmis srovėmis (360 A ir 440 A). Taigi, didžiausi dangos storiai yra gaunami esant 520 A purškimo srovei, 49 V įtampai, kai purškimo atstumas 50 mm ir 70 mm, nepriklausomai nuo substrato temperatūros (B11, B12, B23, B24).

Plazminiu būdu purškiant 50 mm atstumu ir esant purškimo srovei 520 A, 49 V įtampai, kai substrato temperatūra yra tiek 20 °C, tiek ir 350 °C, pasiekiamas didžiausias dangos storis (1,33 mm) (B12, B24).

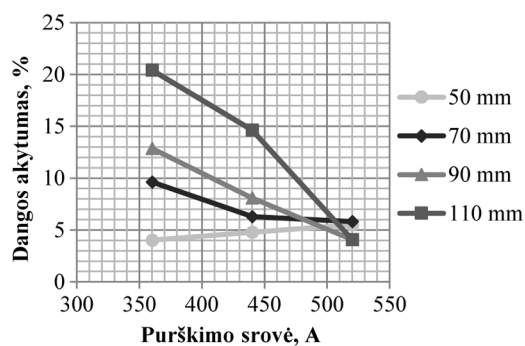
Naudojant „ScionImage“ programą toliau buvo vertinamos suformuotų nikelio-aliuminio dangų akytumas. 7 ir 8 paveiksluose pateiktos užpurkštų dangų akytumo priklausomybės nuo purškimo srovės, esant skirtingiems plazminio purškimo atstumams ir substrato temperatūroms.

Iš 7 ir 8 paveikslų matyti, kad plazminio purškimo metu purškiant dangas ant nekaitintų ir kaitintų substratų paviršių, užpurkštų dangų akytumas yra mažesnis ant kaitintų aliuminio-magnio lydinio substratų, nei ant nekaitintų. Nustatyta, kad stiprinant plazminio purškimo srovę dangų akytumas mažėja.



7 pav. Dangos akytumo priklausomybė nuo plazmos srovės, esant 20 °C substrato temperatūrai ir skirtingiems purškimo atstumams

Fig. 7. The dependence of coating porosity from plasma current at 20 °C substrate temperature and different spray distance



8 pav. Dangos akytumo priklausomybė nuo plazmos srovės, esant 350 °C substrato temperatūrai ir skirtingiems purškimo atstumams

Fig. 8. The dependence of coating porosity from plasma current at 350 °C substrate temperature and different spray distance

Iš 7 paveikslo matyti, kad purškiant dangą ant 20 °C temperatūros substrato, esant 360 A srovei, visais keturiais purškimo atstumais, užpurkštos dangos yra skirtingo akytumo.

Esant 440 A srovei, gautų dangų akytumas yra beveik vienodas, išskyrus purškiant 50 mm atstumu. Tačiau, esant 520 A purškimo srovei, 70 ir 90 mm atstumams, užpurkštos dangos yra mažiausiai akytos.

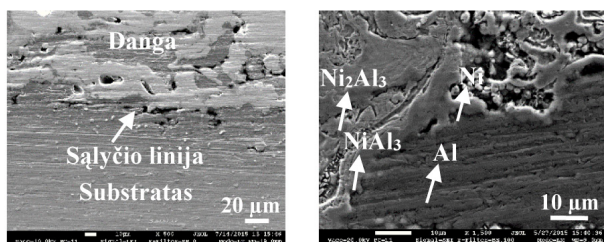
Purškiant dangą ant 350 °C temperatūros substrato, 70, 90 ir 110 mm atstumais, visų gautų dangų akytumui būdingos tos pačios tendencijos – didinant srovės stiprį mažėja dangos akytumas (8 pav.). Purškiant 50 mm atstumu ir stiprinant purškimo srovę, dangos akytumas šiek tiek padidėja. Esant 520 A purškimo srovei, visais nagrinėjama purškimo atstumais dangos akytumas skyrėsi nedaug ir siekė 4,06–5,82 %.

Grafikai patvirtina tendenciją, jog kokybiškesnė danga susiformuoja substratą kaitinant. Optimali srovė išlieka tokia pati kaip ir nagrinėjant dangų storius – 520 A. Tačiau optimalūs purškimo atstumai akytumo atveju yra 70 ir 90 mm, o nagrinėjant storius – 50 ir 70 mm.

Plazminiu būdu užpurkštos nikelio-aliuminio dangos mikrostruktūra buvo tiriama skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM). Elementinė atskirų fazių sudėtis buvo nustatoma rentgeno mikroanalizės RMA metodu.

Tyrimų metu nustatyta, kad sąlyčio zona tarp dangos ir substrato nelygi („banguota“) su kai kur esančiomis mikrotūštomomis (9 pav.). „Banguota“ dangos ir substrato sąlyčio zoną lemia didelis Al-Mg lydinio paviršiaus mikrošūrkštis (9,15 μm) po substrato mechaninio valymo būdo. Toks dangos ir substrato sąlyčio zonos pobūdis rodo didesnę dangos ir substrato kontakto plotą, o tai gali padidinti nikelio-aliuminio dangos sukibimo stiprį.

Nagrinėjant nikelio-aliuminio dangos mikrostruktūrą skenuojančiu elektroniniu mikroskopu, buvo nustatyta, kad



9 pav. Plazminiu būdu užpurkštos nikelio-aluminio dangos mikrostruktūra: (a) neesdintos; (b) esdintos.

Fig. 9. The microstructure of plasma sprayed nickel-aluminium coating: (a) not etching; (b) etching

3 lentelė. Plazminiu būdu užpurkštos nikelio-aluminio dangos nurodytų sričių (9 pav.) cheminė sudėtis

Table 3. The chemical composition of the specified zones (Fig. 9) of plasma sprayed nickel-aluminium coating

Fazės		Ni-K	Al-K	O-K
Ni	Cheminių elementų kiekis, atomų %	89,40	5,78	4,82
Al		1,13	94,71	4,15
NiAl ₃		28,20	68,73	3,07
Ni ₂ Al ₃		35,11	60,73	4,16

plazminiu būdu purkštos 95Ni-5Al dangos pagrindą sudaro metalinė matrica (nikelis ir aliuminis), kuri yra sustiprinta skirtingos rūšies aliuminidų fazėmis. Rentgeno mikroanalizė leido identifikuoti dviejų tipų aliuminidus dangoje: NiAl₃, Ni₂Al₃ (9 pav., 3 lentelė). Įvairių nikelio aliuminidų susidarymas metalinėje dangos matricoje suteikia dangai geresnių savybių (pvz.: didesnę mikrokietį, geresnę atsparumą dilimui ir t. t.).

Mikrokietumo tyrimų rezultatai parodė, kad nikelio-aliuminio dangos vidutinis mikrokietis lygiagrečiai dangos sulydymo linijai (x kryptimi) yra 118–196 HV, o statmenai šiai linijai (y kryptimi) yra 121–222 HV. Tyrimų rezultatai rodo, kad 95Ni-5Al danga yra daugiau kaip du kartus kietesnė negu Al-Mg substratas (51 HV).

Išvados

1. Taikant baigtinių elementų metodą ir įvertinant plazmos srauto savybių priklausomybę nuo temperatūros, buvo nustatytas plazmos lanko įtampos ir srovės tankio pasiskirstymas plazmos sraute. Didžiausias srovės tankis buvo nustatytas lanko katodinėje srityje ir siekė $32,3 \cdot 10^6$ A/m². Dujų srautas plazmotrono viduje pasiskirsto simetriškai ir plazmotrono galo srityje įgauna maksimalų 153,6 m/s greitį.
2. Plazminio purškimo tyrimo metu nustatyta, kad purškiant nikelio-aliuminio dangas ant kaitintų substratų paviršių dangų akytumas yra mažesnis nei ant nekaitin-

tų. Optimaliausia purškimo srovė (purškiant ant 20 °C ir 350 °C temperatūros substratų) dangos akytumo ir storio atveju yra 520 A, o purškimo atstumas – 70 mm.

3. Tiriant 95Ni-5Al dangos mikrostruktūrą buvo nustatyta, kad mikrostruktūros pagrindą sudaro metalinė matrica (nikelis ir aliuminis), kuri yra sustiprinta skirtingos rūšies aliuminidų fazėmis: NiAl₃, Ni₂Al₃. Šių fazių buvimas dangoje sustiprina dangos mikrostruktūrą ir padidina jos mikrokietį.

Literatūra

- Ambroza, P.; Kavaliauskienė, L. 2012. Medžiagų sandaros ir savybių tyrimas: Mokomoji knyga. Technologija. 215 p. <http://dx.doi.org/10.5755/e01.9786090206355>
- Davis, J. R. 2009. *Handbook of thermal spray technology*. Materials Park (Ohio): ASM International. 338 p.
- Hsiao, W. T., et al. 2011. The microstructural characteristics and mechanical properties of Ni-Al/h-BN coatings deposited using plasma spraying, *Journal of Alloys and Compounds* 509: 8239–8245. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.05.095>
- Lukauskaitė, R. 2015. *Daugiavfunkčių nikelio-aluminio dangų ant aliuminio-magnio lydinių tyrimai*: daktaro disertacija. Vilnius. 148 p.
- Lukauskaitė, R., et al. 2013. Aluminio lydinių plazminio purškimo tyrimas, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 5(6): 583–680.
- Magnani, M., et al. 2008. Influence of HVOF parameters on the corrosion and wear resistance of WC-Co coatings sprayed on AA7050T7, *Surface and Coatings Technology* 202: 4746–4757. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.055>
- Marcinauskas, L., et al. 2006. Vienkamerinio linijinio plazmos generatoriaus, kaitinančio vienatomes ir dviatomes dujas, charakteristikų tyrimas, *Energetika* 1: 36–41.

RESEARCH OF PLASMA SPRAYING PROCESS ON ALUMINUM-MAGNESIUM ALLOY

P. Kavaliauskaitė, R. Lukauskaitė, G. Vaitkūnaitė, J. Škamat

Abstract

The article examines plasma sprayed 95Ni-5Al coatings on aluminum-magnesium (Mg ≈ 2,6–3,6%) alloy substrate. Aluminum-magnesium samples prior spraying were prepared with mechanical treatment (blasting with Al₂O₃). 95Ni-5Al coatings on aluminum-magnesium alloys were sprayed with different parameters of process and coating's thickness, porosity, microhardness and microstructure were evaluated. Also numerical simulations in electric and magnetic phenomena of plasma spraying were carried out.

Keywords: plasma spray, nickel-aluminum coatings, aluminum-magnesium alloy, sprayed coatings performance characteristics, numerical simulation.