



## NIKELIO-ALIUMINIO DANGOS ANT ALIUMINIO-MAGNIO LYDINIO ATSPARUMO DILIMUI IR KOROZIJAI TYRIMAS

Gerda VAITKŪNAITĖ<sup>1</sup>, Raimonda LUKAUSKAITĖ<sup>2</sup>, Nikolaj VIŠNIAKOV<sup>3</sup>

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

*El. paštas: <sup>1</sup>gerda.vaitkunaite@stud.vgtu.lt; <sup>2</sup>raimonda.lukauskaite@vgtu.lt; <sup>3</sup>nikolaj.visniakov@vgtu.lt*

**Santrauka.** Straipsnyje nagrinėjamos plazminiū būdu purkštos 80Ni-20Al dangos ant aliuminio-magnio ( $Mg \approx 2,6-3,6\%$ ) lydinio substrato, kuris prieš padengiant buvo nuvalytas srautinant  $Al_2O_3$  dalelėmis. Buvo atlikti purkštos dangos, aliuminio-magnio lydinio dilimo ir korozijos tyrimai. Nustatyti dangos ir Al-Mg substrato tūrio nuostoliai, vidutinis išdilusio takelio centrinės dalies skerspjuvio plotas, dilimo sparta, dilimo greitis, atsparumas dilimui ir korozijos srovė. Darbe buvo palygintas nikelio-aliuminio dangos ir aliuminio-magnio substrato atsparumas dilimui ir korozijai. Taip pat buvo atlikta užpurkštos dangos ir substrato dilimo takelių paviršiaus analizė.

**Reikšminiai žodžiai:** plazminis purškimas, nikelio-aliuminio dangos, aliuminio-magnio lydinys, dilimas, elektrocheminė korozija.

### Ivadas

Aliuminis ir jo lydiniai naudojami įvairiose srityse: civilinėje inžinerijoje, aviacijoje, transporte, mechanikos inžinerijoje, elektros inžinerijoje, elektronikoje ir t. t. (He *et al.* 2013, 2014a). Tačiau mažas šių metalų ir jų lydinių lydymosi taškas riboja jų platų pritaikymo mastą esant aukštesnėms temperatūroms. Mažas kietumas lemia prastą aliuminio detalių atsparumą dilimui įvairiomis trinties darbo sąlygomis, taip pat sumažina jų naudojimo trukmę (He *et al.* 2014b). Aliuminio detalių dengimas apsauginėmis dangomis – vienas iš būdų, leidžiančių sumažinti jų dilimo nuostolius, trintį ir atitinkamai pratęsti jų naudojimo trukmę.

Plazminis purškimas – vienas iš universaliausių terminio purškimo būdų, leidžiančių pasirinkti įvairios geometrijos dengiamas detales, įvairias dangas ir išgauti įvairių savybių medžiagų sluoksnius. Tai labai našus, lengvai automatizuojamas būdas, leidžiantis išgauti įvairaus storio dangas, kurios pasižymi dideliu tankiu, geromis adhezijos savybėmis, atsparumu dilimui ir korozijai (Davis 2009; Fauchais 2004 *et al.* 2014). Dėl šių savybių plazminis purškimo būdas yra labai perspektyvus dengiant aliuminį ir jo lydinius.

Plazminio purškimo būdas dėl įvairių dangos medžiagų naudojimo (įskaitant metalus, keramiką, kermetus) leidžia suformuoti įvairių savybių dangas, kurios gali būti plačiai taikomos tokiose srityse, kaip automobilių ir dujų turbinų detalių, celiuliozės ir popieriaus gamyba, biomedicinos implantų, elektros energijos gamyba, taip pat

aeronautikoje ir t. t. (Mariaux, Vardelle 2005; Guo *et al.* 2015; Bobzin *et al.* 2011).

Daugybė darbų rodo (Kim *et al.* 2005; Gui, Kang 2001), kad aliuminio detalės dilimo sąlygomis gali būti pagerintos naudojant apsaugines dangas iš geležies pagrindo lydinių, aliuminio pagrindo lydinių ir jų mišinių su kietosiomis dalelėmis ( $B_4C$ , SiC). Taip pat yra įvairių darbų, kurie rodo teigiamus rezultatus naudojant dvisluoksnes šiluminį barjerą sudarančias oksidines dangas (Gu *et al.* 2012) ir kompozicines dangas, į kurių sudėtį įeina oksidai, turintys retųjų metalų (He *et al.* 2014). Plazminio purškimo būdu dengiant aliuminio detales, nikelio pagrindo dangos taip pat yra labai populiarios ir plačiai naudojamos, dengiant substrato paviršių. Šios dangos pasižymi ne tik geromis savybėmis, esant aukštomis temperatūroms, bet ir geru atsparumu dilimui bei korozijai (Serres *et al.* 2011).

Pagrindinis šio tyrimo tikslas – nustatyti plazminiū būdu purkštų nikelio-aliuminio dangų ant aliuminio-magnio lydinių atsparumą dilimui įvairiomis dilimo sąlygomis ir jų atsparumą korozijai sieros rūgšties terpėje. Taip pat atlikti nikelio-aliuminio dangos ir aliuminio-magnio substrato dilimo takelių paviršiaus analizę.

### Tyrimo metodai ir įranga

Aliuminio-magnio lydinių substratai ( $140 \times 20 \times 4$  mm) plazminio purškimo būdu buvo padengti 80Ni-20Al milteliais, kurie leidžia suformuoti dangas, pasižyminčias geru

atsparumu korozijai ir dilimui. Miltelių ir aliuminio-magnio lydinio substrato cheminė sudėtis pateikta 1 lentelėje.

1 lentelė. Miltelių ir aliuminio-magnio lydinio substrato cheminė sudėtis, masės %

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

	Al	Ni	Mg	Mn	Fe	Si	Kiti
Milteliai	20	80	–	–	–	–	–
Substratas	Likutis	–	2,6–3,6	0,5	0,4	0,4	0,9

Visi aliuminio-magnio bandiniai prieš plazminį purškimą buvo apdoroti srautinant  $Al_2O_3$  dalelėmis (vidutinis dalelių dydis – 600–850  $\mu m$ ). Aliuminio-magnio bandinių šiurkštumas, apdorojus paviršių, buvo nustatomas paviršiaus šiurkštumo parametru matuokliu TR-200. Substrato paviršiaus vidutinis aritmetinis nuokrypis siekė  $Ra = 9,15 \mu m$ .

Plazminis purškimas buvo atliekamas su UPU-3 įranga. Pagrindiniai plazminio purškimo parametrai buvo tokie: srovė – 520 A, įtampa – 49 V, purškimo atstumas – 70 mm, miltelių tiekimo dujų išėiga – 4,5 l/min., plazmą sudarančių dujų išėiga – 40 l/min., plokštelės (substrato) judėjimo linijinis greitis – 50 cm/min., plazmą formuojančios ir miltelių tiekimo dujos – argonas, purškimo ėjimų skaičius – 4.

80Ni-20Al dangos ir Al-Mg lydinio atsparumas dilimui buvo nustatomas *CSM Instruments* tribotesteriu, esant tokiems parametrams: slydimo kelias – 120 m, slydimo greitis – 6 cm/s, kameros temperatūra – 25 °C, aplinkos drėgnis – 30 %. Buvo naudojamas 6 mm skersmens korundo rutuliukas. Bandymai atlikti ore ir tepamojoje terpėje. Atliekant tepamąjį slydimą, naudota sintetinė alyva (5W-30, API:SL/CF), 95A markės benzinas ir dyzelinas. Bandinys buvo veikiamas 10 N jėga, o slydimo amplitudė – 4 mm. Visi bandymai atlikti laikantis ASTM G-99 ir ASTM G-133 standartų reikalavimų. Atsparumas dilimui apskaičiuotas pagal masės nuostolius. Sverti naudotos elektroninės analitinės KERN firmos svarstyklės, matuojančios 0,00001 g tikslumu. 80Ni-20Al ir Al-Mg lydinio tūrio nuostoliai, tankis, dilimo greitis, atsparumas dilimui buvo apskaičiuojami pagal 1–4 formules (Parthasarathi *et al.* 2012)

Bandinio tūrio nuostoliai apskaičiuojami,  $mm^3$ :

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \cdot 1000, \quad (1)$$

čia  $\Delta m$  – bandinio masės nuostoliai, g;  $\rho$  – bandinio tankis,  $g/cm^3$ .

Bandinio tankis 20 °C temperatūroje apskaičiuojamas pagal formulę,  $g/cm^3$ :

$$\rho = \rho_1 \cdot \left( \frac{m_a}{m_a - m_1} \right), \quad (2)$$

čia  $\rho_1$  – vandens tankis 20 °C temperatūroje,  $g/cm^3$ ;  $m_a$  – bandinio masė ore, g;  $m_1$  – bandinio masė vandenyje, g.

Bandinio dilimo greitis ir atsparumas dilimui apskaičiuojami pagal (3) ir (4) formules:

$$v_w = \frac{\Delta V}{l}, \quad (3)$$

$$w = \frac{l}{\Delta V}, \quad (4)$$

čia  $l$  – slydimo kelias, m;  $v_w$  – bandinio dilimo greitis,  $mm^3/m$ ;  $w$  – bandinio atsparumas dilimui,  $m/mm^3$ .

80Ni-20Al dangos ir Al-Mg lydinio dilimo takeliai ištirti naudojant SEM JEOL JSM-7600F nuskaitančiosios elektroninės mikroskopijos prietaisą su antrinių elektronų SE detektoriumi, didinant vaizdą 1000 kartų. Elektroninės mikroskopijos parametrai: 10 kV įtampa, atstumas iki bandinio – nuo 10 mm iki 14 mm.

Plazminiu būdu purkštos nikelio-aliuminio lydinų dangos ir aliuminio-magnio lydinio korozinis atsparumas įvertintas potenciodinaminės poliarizacijos matavimais. Eksperimentiniai bandymai atlikti naudojant potenciostatą PGSTAT302 AUTOLAB. Matavimai atlikti naudojant trijų elektrodų elektrocheminę celę. Platinos viela buvo naudojama kaip pagalbinis elektrodas, o lyginamuoju elektrodu – Ag/AlCl/KCl. Bandomieji paviršiai buvo šlifuoti bei poliruota (pastos dalelių dydis – iki 1  $\mu m$ ) nikelio-aliuminio danga ir šlifluotas bei poliruotas (pastos dalelių dydis – iki 1  $\mu m$ ) Al-Mg lydinio substratas. Korozijos bandymai atlikti 0,1 M  $H_2SO_4$  tirpale, kai  $pH = 1,19$ , esant 21 °C temperatūrai. Elektrolitas buvo 30 min. deaeruojamas Ar dujomis. Šis rūgštinis tirpalas dažniausia taikomas panašių medžiagų potenciodinaminės poliarizacijos matavimams.

Elektrocheminiai matavimai atlikti po 15 min., nusiausybus korozijos potencialui, skleidžiant potencialą į anodinę ir katodinę pusę. Potencialo sklidimo greitis buvo arti 1,0 mV/s. Elektrocheminiai parametrai, tokie kaip korozijos potencialas ( $E_{kor}$ ) ir korozijos srovė ( $j$ ), nustatyti naudojant atitinkamą duomenų apdorojimo programinę įrangą.

### Eksperimentinių tyrimų rezultatai

Siekiant įvertinti 80Ni-20Al dangos ir Al-Mg lydinio atsparumą dilimui „ball on plate“ dilimo bandymais įvairiomis eksploatacijos sąlygomis, buvo pasirinktos keturios skirtingos dilimo terpės: oras, benzinas, dyzelinas, alyva.

80Ni-20Al dangos ir Al-Mg lydinio bandinių vidutinis išdilusio takelio centrinės dalies skerspjūvio plotas ir dilimo sparta skirtingomis dilimo sąlygomis yra parodyti 2 lentelėje.

2 lentelė. Plazminiu būdu purkštos nikelio-aliuminio dangos ir Al-Mg lydinio dilimo parametrai skirtingose dilimo terpėse

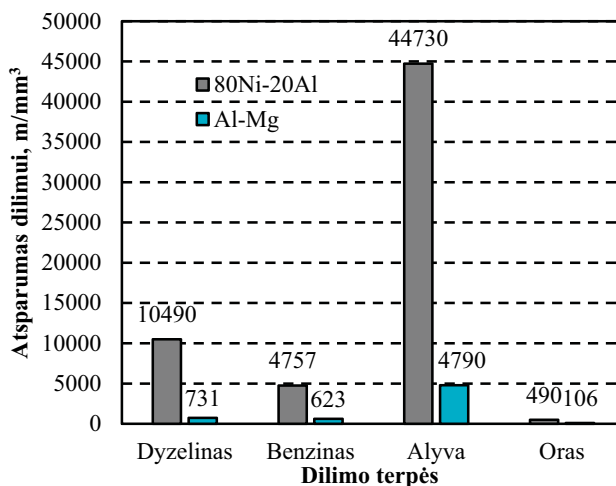
Table 2. The wear parameters of plasma sprayed nickel-aluminum coating and Al-Mg alloy in different wear media

Tyrimo objektas / dilimo terpė	Tūrio nuostoliai, mm <sup>3</sup>	Vidutinis išdilusio takelio centrinės dalies skerspjūvio plotas, μm <sup>2</sup>	Dilimo sparta, μm <sup>2</sup> /1 ciklui
Ni-Al danga / oras	0,245	57947,67	3,86
Ni-Al danga / benzinas	0,025	6087,68	0,41
Ni-Al danga / dyzelinas	0,011	2785,10	0,19
Ni-Al danga / alyva	0,003	665,52	0,04
Al-Mg lydinys / oras	1,130	181600,00	12,11
Al-Mg lydinys / benzinas	0,193	45007,88	3,00
Al-Mg lydinys / dyzelinas	0,164	38378,55	2,56
Al-Mg lydinys / alyva	0,025	5997,67	0,40

Dilimo bandymų rezultatai parodė, kad vidutinis išdilusio takelio centrinės dalies skerspjūvio plotas Al-Mg lydiniių skirtingose dilimo terpėse yra didesnis (nuo 3 iki 14 kartų) negu plazminiu būdu purkštos nikelio-aliuminio lydinio dangos. Tai gali lemti mažesnis aliuminio-magnio lydinio kietumas (51 HV) negu nikelio-aliuminio dangos (110 HV). Nikelio-aliuminio lydinio ir aliuminio-magnio lydinio dilimo spartos skaičiavimai leido įvertinti, kiek nudyla tiriamojo paviršiaus ploto μm<sup>2</sup>, kai judantis kūnas (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rutuliukas) nueina 1 dilimo ciklą. Lyginant visas nikelio-aliuminio dangas skirtingose terpėse, mažiausia nikelio-aliuminio dangos dilimo sparta (0,04 μm<sup>2</sup>/1 ciklui) buvo nustatyta alyvoje dėl tampriai plastinių dilimo sąlygų, o didžiausia dangos dilimo sparta (3,86 μm<sup>2</sup>/1 ciklui) buvo gauta esant dilimui ore. Dilimo bandymų rezultatai parodė, kad Al-Mg lydinio dilimo sparta yra nuo 3 iki 13,5 karto didesnė priklausomai nuo dilimo sąlygų negu nikelio-aliuminio dangų (1 lentelė).

80Ni-20Al dangos ir Al-Mg lydinio atsparumas dilimui skirtingose terpėse rodo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rutuliuko dilimo kelio dydį, kai tiriamasis bandinio paviršius praranda 1 mm<sup>3</sup> tūrio. 80Ni-20Al dangos ir Al-Mg lydinio dilimo greičio reikšmė skirtingose terpėse leidžia įvertinti, kiek nudyla tiriamojo bandinio paviršiaus mm<sup>3</sup> tūrio, kai Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rutuliuko dilimo kelias yra 1 m ilgio.

Nikelio-aliuminio dangos ir aliuminio-magnio lydinio atsparumas dilimui ir dilimo greičiai skirtingose dilimo terpėse pateikti 1 ir 2 pav.

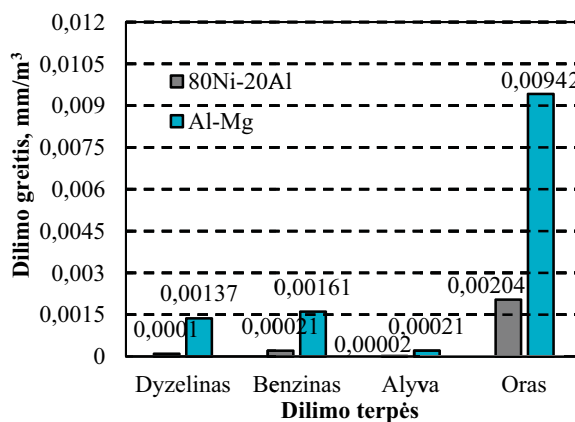


1 pav. Plazminiu būdu purkštos 80Ni-20Al dangos ir Al-Mg lydinio atsparumas dilimui skirtingose dilimo terpėse

Fig. 1. Wear resistance of plasma sprayed 80Ni-20Al coating and Al-Mg alloy in different wear media

80Ni-20Al dangos dilimo bandymai parodė, kad padengtų bandinių atsparumas dilimui yra nuo 4,6 iki 14,35 karto didesnis priklausomai nuo dilimo sąlygų negu aliuminio-magnio lydinio (1 pav.). Didžiausias 80Ni-20Al dangos atsparumo dilimui efektas pasiektas esant dilimui alyvoje (44 730 m/mm<sup>3</sup>), o mažiausias 80Ni-20Al dangos atsparumas dilimui gautas esant dilimui ore (490 m/mm<sup>3</sup>). Nikelio-aliuminio dangos dilimo greičių rezultatai skirtingose dilimo terpėse parodė, kad dangos dilimo greičiai yra nuo 4,6 iki 13,7 karto mažesni negu aliuminio-magnio lydinio (2 pav.).

Po kiekvieno atlikto dilimo bandymo su plazminiu būdu purkštomis nikelio-aliuminio dangomis ir Al-Mg lydinio bandiniais skirtingose dilimo terpėse, taikant skenuojančiąją elektroninę mikroskopiją, buvo atlikta bandinių dilimo takelių topografijos analizė.



2 pav. Plazminiu būdu purkštos 80Ni-20Al dangos ir Al-Mg lydinio dilimo greitis skirtingose dilimo terpėse

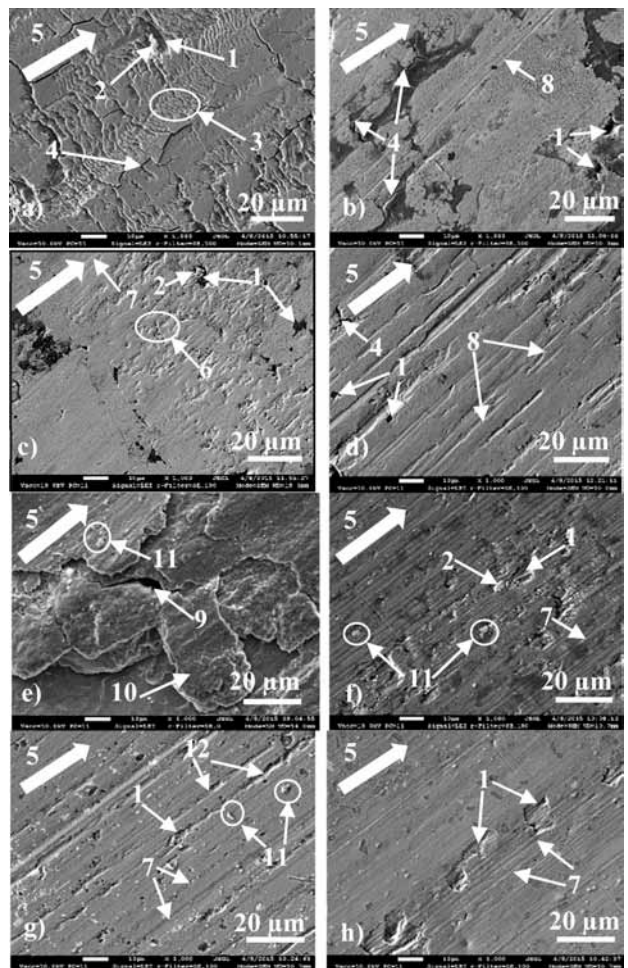
Fig. 2. Wear rates of plasma sprayed 80Ni-20Al coating and Al-Mg alloy in different wear media

Nikelio-aliuminio dangos ir Al-Mg lydinio išdilusių takelių paviršiai, esant skirtingoms dilimo terpėms, parodyti 3 pav.

Nikelio-aliuminio dangos išdilimo takelyje, esant dilimui ore, matyti išsišakojusių mikroįtrūkių tinklo susidarymas, taip pat formuojasi ištrupos, nuolaužos ir daug smulkių užvartų (3 pav., a). Moksliniai tyrimai (Serres *et al.* 2011) rodo, kad purkštoms dangoms dylant ore, didėjant dilimo ciklų skaičiui, paviršiuje gali formuotis oksidinė plėvelė, kuri, pasiekusi kritinį storį, gali suirti ir sudaryti paviršiuje abrazyvines daleles. Dangos nuolaužų su oksidinėmis dalelėmis galima aptikti ant išdilusio dilimo takelio ir rutuliuko paviršiaus. Visa tai rodo, kad dilimo mechanizmą gali paspartinti paviršiaus oksidacija.

Esant benzino ir dyzelino dilimo terpei, 80Ni-20Al paviršiuje matomas skirtingas išdilimo takelių formavimo mechanizmas. Atlikus dilimo bandymus, benzino terpėje dangos išdilimo paviršiuje matyti mikroįtrūkių, gilių šlifavimo įbrėžimų, ištrupų (3 pav., b). Dangos išdilimo takelio paviršiuje dyzelino terpėje formuojasi ištrupos, nuolaužos, negilūs grioveliai (3 pav., c). Nuolaužos dangos paviršiuje formuojasi tada, kai dalis medžiagos atitrūksta nuo bandinio paviršiaus. Susidariusios medžiagos nuolaužos deformuojasi ir lieka įstrigusios bandinio paviršiuje. Taigi susidariusios dribsnių formos dalelės ant dilimo takelio paviršiaus yra intensyvaus dilimo proceso rezultatas. Kietos metalinės dangos fazės taip pat gali lemti dribsnių pavidalo dalelių formavimąsi ant dilimo takelio paviršiaus. Dangos išdilimo takelių nuotraukos benzino ir dyzelino terpėje rodo, kad mažesnis paviršiaus takelio išdilimas yra dyzelino terpėje. Tam gali turėti įtakos dilimo terpės fizikinės savybės ir cheminė sudėtis. Žinoma, kad benzinas yra lengvoji naftos distiliacijos frakcija ir turi mažesnę tankį, klampį negu dyzelinas. Visa tai gali turėti poveikį prastesnėms dangos paviršiaus tepimo sąlygoms negu dyzelino terpėje. Mažiausias nikelio-aliuminio dangos paviršiaus išdilimas buvo nustatytas alyvos terpėje. Paviršiuje formuojasi viena kita ištrupa ir mikroįtrūkis. Dangos išdilimo takelio paviršiuje matyti daug įbrėžimų (3 pav., d). Taip yra todėl, kad visi dangos paviršiai prieš dilimo bandymus skirtingose terpėse buvo šlifuojami iki  $Ra \approx 0,45 \mu m$ . Taip buvo siekiama sumažinti paviršinio dangos sluoksnio vidutinio aritmetinio nuokrypio įtaką dilimo bandymo rezultatams.

Esant aliuminio-magnio lydinio dilimui ore, paviršiuje matomas atsiskuoksnivimas, trūkiai ir oksidinės plėvelės fragmentai (3 pav., e). Tai rodo, kad esant dilimui ore yra didelių Al-Mg bandinio tūrio nuostolių. Tyrimai (Magnani *et al.* 2009) rodo, kad aliuminio lydiniais būdingi du skirtingi dilimo mechanizmai. Kai rutuliuko kietumas yra didesnis už aliuminio lydinį, tai aliuminio lydinio paviršius



3 pav. Nikelio-aliuminio dangos (a–d) ir Al-Mg lydinio (e–h) išdilimo takeliai skirtingose dilimo terpėse: a – 80Ni-20Al danga ore; b – 80Ni-20Al danga benzine; c – 80Ni-20Al danga dyzeline; d – 80Ni-20Al danga alyvoje; e – Al-Mg lydinys ore; f – Al-Mg lydinys benzine; g – Al-Mg lydinys dyzeline; h – Al-Mg lydinys alyvoje; 1 – ištrupa; 2 – nuolauža; 3 – užvartai; 4 – mikroįtrūkis; 5 – slydimo kryptis; 6 – dangos mikroporos; 7 – negilus griovelis; 8 – šlifavimo įbrėžimas; 9 – trūkis; 10 – atsiskuoksnivimas; 11 – oksidinės plėvelės fragmentai; 12 – įbrėžimas

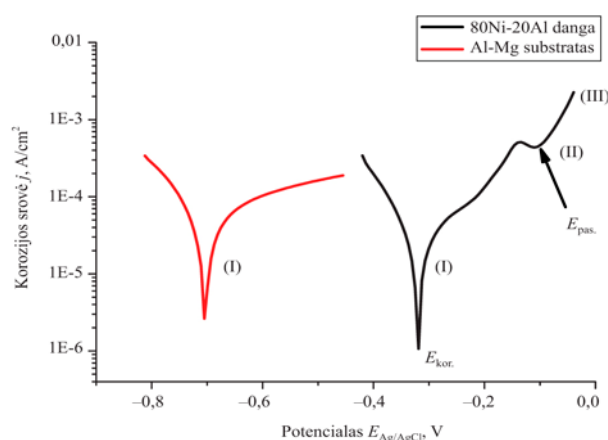
Fig. 3. Wear tracks of nickel-aluminium coating (a–d) and Al-Mg alloy (e–h) in different wear media: a – 80Ni-20Al coating in air; b – 80Ni-20Al coating in petrol; c – 80Ni-20Al coating in diesel fuel; d – 80Ni-20Al coating in oil; e – Al-Mg alloy in air; f – Al-Mg alloy in petrol; g – Al-Mg alloy in diesel fuel; h – Al-Mg alloy in oil; 1 – crater wear; 2 – debris; 3 – prow formation; 4 – microcrack; 5 – sliding direction; 6 – micropores of the coating; 7 – shallow groove; 8 – abrasive scratching; 9 – crack; 10 – delamination; 11 – oxide film fragments; 12 – scratching

yra plastiškai deformuojamas ir dalis paviršinio sluoksnio medžiagos pašalinama dylant. Taip susiformuoja ištrupėjusios nuolaužos, oksidinės plėvelės fragmentai, kurie skatina tūrio bandinio medžiagos praradimą. Taip pat yra žinoma, kad dylantys aliuminio lydiniai yra labai jautrūs temperatūros pokyčiams. Esant dideliame bandinių ciklų skaičiui, pasiekiamos gana aukštos temperatūros. Tokiu būdu bandinio

dilimo pobūdis keičiasi ir procesas vyksta sunkiomis dilimo sąlygomis. Aliuminio-magnio lydiniai dylant, benzine išdilio takelio paviršiuje matoma ištrupų, nuolaužų, negilių griovelių ir oksidinės plėvelės fragmentų (3 pav., f). Al-Mg lydinio takelio paviršiaus išdilio požymiai dyzeline yra šiek tiek mažesni negu benzine. Taip yra todėl, kad dyzelinas pasižymi geresnėmis paviršiaus tepumo savybėmis negu benzinas. Dyzelino aplinkoje Al-Mg lydinio išdilio takelio paviršiuje galima aptikti ištrupų, įbrėžimų, negilių griovelių ir oksidinės plėvelės fragmentų (3 pav., g). Aliuminio-magnio bandinių paviršiuje susidarę įbrėžimai rodo, kad dylant nuo paviršiaus atsiskyla medžiaga ir formuojasi nuolaužos, įvairūs paviršiaus fragmentai. Tai sukelia abrazyvinį dilimą. Išdilusio paviršiaus geometriją ir griovelių formavimąsi gali lemti paviršiuje susidariusių abrazyvinių dalelių dydis ir forma. Mažiausiai pažeistas aliuminio-magnio lydinio paviršius, atlikus dilimo bandymus, buvo gautas naudojant alyvą. Paviršiuje formuojasi viena kita ištrupa ir negilūs grioveliai (3 pav., h). Visi dilimo rezultatai skirtingose dilimo terpėse akivaizdžiai parodė, kad nikelio-aliuminio dangos dilimo pobūdis labai skiriasi nuo Al-Mg lydinio ir nikelio-aliuminio danga turi daug geresnes tribologines savybes, o priklausomai nuo terpės gali iki 14 kartų pagerinti aliuminio-magnio lydiniių detalių atsparumą dilimui.

Siekiant nustatyti nikelio-aliuminio dangos ir aliuminio-magnio lydinio substrato atsparumą korozijai, atlikti elektrocheminės korozijos bandymai. Dangos ir substrato termodinaminis polinkis į elektrocheminę koroziją buvo vertinamas lyginant korozijos srovės  $j$  ir korozijos potencialus  $E_{kor}$ , gautus atliekant potenciodinaminės poliarizacijos matavimus.

Nikelio-aliuminio dangos ir aliuminio-magnio lydinio substrato potenciodinaminės poliarizacijos kreivės 0,1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> tirpale pateiktos 4 pav.



4 pav. 80Ni-20Al dangos ir Al-Mg lydinio potenciodinaminės poliarizacijos kreivės 0,1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> tirpale

Fig. 4. Potentiodynamic polarization curves of 80Ni-20Al coating and Al-Mg alloy in 0.1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution

Plazminiu būdu purkštos 80Ni-20Al dangos poliarizacijos kreivė susidarė esant  $-0,320$  V potencialui. Jį pasiekus dangoje prasideda staigus anodinės srovės didėjimas. Tai yra aktyvi tirpimo stadija (I). Toliau didėjant 80Ni-20Al dangos potencialui iki  $-0,14$  V, korozijos srovė trumpam nustoja didėti ir tiriamasis dangos paviršius pereina į pasyvią būseną (II). Tačiau ji, toliau didėjant plazminiu būdu purkštos 80Ni-20Al dangos potencialui, pereina į tirpimo stadiją ir laipsniškai padidėja anodinė srovė (III). Staigus korozijos srovės didėjimas susijęs su įdubų susidarymu ir vandenilio skyrimosi procesu sieros rūgšties tirpale. Atlikti eksperimentiniai tyrimai ir skaičiavimai parodė, kad 80Ni-20Al dangos korozijos srovė yra  $1,20 \cdot 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>.

Potenciodinaminės poliarizacijos matavimai 0,1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> tirpale taip pat buvo atlikti su aliuminio-magnio lydinio substratu (4 pav.). Tyrimo metu nustatyta, kad Al-Mg lydinio substrato poliarizacijos kreivė susidarė esant  $-0,704$  V potencialui. Pasiekus šį potencialą prasideda aktyvus Al-Mg lydinio substrato anodinis tirpimas, didėjant korozinei srovei. Tyrimų rezultatai parodė, kad Al-Mg lydinio substrato korozijos srovė yra  $2,11 \cdot 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>. Tai rodo, kad Al-Mg lydinio substrato korozijos srovė  $\sim 1,8$  karto didesnė negu nikelio-aliuminio dangos.

Apibendrinus elektrocheminės korozijos bandymo rezultatus galima teigti, kad 80Ni-20Al dangos kreivės persilinkimas į elektroteigiamesnių potencialų sritį ir mažesnė korozinė srovė rodo didesnę termodinaminę dangos stabilumą negu aliuminio-magnio lydinio substrato sieros rūgšties terpėje. Tai rodo, kad plazminiu būdu purkšta nikelio-aliuminio danga koroziniu atžvilgiu yra geresnė negu Al-Mg lydinio substratas.

## Išvados

1. Dilimo bandymų rezultatai parodė, kad vidutinis išdilusio takelio centrinės dalies skerspjūvio plotas ir dilimo sparta Al-Mg lydiniių, skirtingose dilimo terpėse, yra didesnė (nuo 3 iki 14 kartų) negu plazminiu būdu purkštos nikelio-aliuminio lydinio dangos.
2. 80Ni-20Al dangos dilimo bandymai parodė, kad padengtų bandinių atsparumas dilimui yra nuo 4,6 iki 14,35 karto didesnis priklausomai nuo dilimo sąlygų negu Al-Mg lydinio. Didžiausias 80Ni-20Al dangos atsparumo dilimui efektas pasiektas esant dilimui alyvoje ( $44\,730$  m/mm<sup>3</sup>), o mažiausias 80Ni-20Al dangos atsparumas dilimui gautas esant dilimui ore ( $490$  m/mm<sup>3</sup>).
3. Išdilio takelių analizė skirtingomis dilimo sąlygomis parodė, kad mažesni dilimo takelių pažeidimai matyti 80Ni-20Al dangos paviršiuose negu Al-Mg lydinio paviršiuose.

4. Atlikus elektrocheminės korozijos bandymus, nustatyta, kad Al-Mg lydinio substrato korozijos srovė ~1,8 karto didesnė negu nikelio-aliuminio dangos. Tai rodo, kad plazminiū būdu purkšta nikelio-aliuminio danga korozijos atžvilgiu yra atsparesnė negu Al-Mg lydinio substratas.

## Literatūra

- Bobzin, K.; Bagecivan, N.; Zhao, L.; Petkovic, I.; Schein, J.; Hartz-Behrend, K.; Kirner, S.; Marqués, J.-L.; Forster, G. 2011. Modelling and diagnostics of multiple cathodes plasma torch system for plasma spraying, *Frontiers of Mechanical Engineering* 6(3): 324–331. <https://doi.org/10.1007/s11465-011-0125-2>
- Davis, J. R. 2009. *Handbook of thermal spray technology*. Materials Park, Ohio: ASM International. 338 p.
- Fauchais, P. 2004. Understanding plasma spraying, *Journal of Physics D: Applied Physics* 37(9): R86–R108. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/9/R02>
- Fauchais, P. L.; Heberlein, J. V. R.; Boulos, M. I. 2014. *Thermal spray fundamentals: from powder to part*. New York: Springer. 1566 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68991-3>
- Gu, L.; Fan, X.; Zhao, Y.; Zou, B.; Wang, Y.; Zhao, S.; Cao, X. 2012. Influence of ceramic thickness on residual stress and bonding strength for plasma sprayed duplex thermal barrier coating on aluminum alloy, *Surface and Coatings Technology* 206(21): 4403–4410. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.04.070>
- Gui, M.; Kang, S. B. 2001. Aluminum hybrid composite coatings containing SiC and graphite particles by plasma spraying, *Materials Letters* 51(5): 396–401. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(01\)00327-5](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(01)00327-5)
- Guo, Z.; Yin, S.; Liao, H.; Gu, S. 2015. Three-dimensional simulation of argon-hydrogen DC non-transferred arc plasma torch, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 80: 644–652. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.059>
- He, L.; Tan, Y.; Tan, H.; Zhou, Ch.; Gao, L. 2013. Tribological properties of nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40 %TiO<sub>2</sub> multiphase ceramic particles reinforced Ni-based alloy composite coatings, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 23: 2618–2627. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62776-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62776-4)
- He, L.; Tan, Y.; Tan, H.; Tu, Y.; Zhang, Z. 2014. Microstructure and tribological properties of WC-CeO<sub>2</sub>/Ni-base alloy composite coatings, *Rare Metal Materials and Engineering* 43(4): 823–829. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(14\)60092-8](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(14)60092-8)
- He, L.; Tan, Y.; Wang, X.; Xu, T.; Hong, X. 2014a. Microstructure and wear properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub>/Ni-base alloy composite coatings on aluminum alloys by plasma spray, *Applied Surface Science* 314: 760–767. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.07.047>
- He, L.; Tan, Y.; Tan, H.; Tu, Y.; Zhang, Z. 2014b. Microstructure and Tribological Properties of WC-CeO<sub>2</sub>/Ni-base alloy composite coatings, *Rare Metal Materials and Engineering* 43(4): 823–829. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(14\)60092-8](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(14)60092-8)
- Kim, W. J.; Ahn, S. H.; Kim, H. G.; Kim, J. G.; Ozdemir, I.; Tsunekawa, Y. 2005. Corrosion performance of plasma-sprayed cast iron coatings on aluminum alloy for automotive components, *Surface and Coatings Technology* 200(1–4): 1162–1167. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.220>
- Magnani, M.; Suegama, P. H.; Espallargas, N.; Fugivara, C. S.; Dosta, S.; Guilemany, J. M.; Benedetti, A. V. 2009. Corrosion and wear studies of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>NiCr-HVOF coatings sprayed on AA7050 T7 under cooling, *Journal of Thermal Spray Technology* 18(3): 353–363. <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9305-6>
- Mariaux, G.; Vardelle, A. 2005. 3D time – dependent modelling of the plasma spray process. Part 1: flow modelling, *International Journal of Thermal Sciences* 44: 357–366. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2004.07.006>
- Parthasarathi, N. L.; Duraiselvam, M.; Borah, U. 2012. Effect of plasma spraying parameter on wear resistance of NiCrBSiFe plasma coatings on austenitic stainless steel at elevated temperatures at various loads, *Materials and Design* 36: 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.051>
- Serres, N.; Hlawka, F.; Costil, S.; Langlade, C.; Machi, F. 2011. An investigation of the mechanical properties and wear resistance of NiCrBSi coatings carried out by *in situ* laser remelting, *Wear* 270(9–10): 640–649. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.025>

## RESEARCH OF WEAR RESISTANCE AND CORROSION OF NICKEL-ALUMINIUM COATING ON ALUMINUM-MAGNESIUM ALLOY

G. Vaitkūnaitė, R. Lukauskaitė, N. Višniakov

### Abstract

The article examines the plasma sprayed 80Ni-20Al coatings on aluminum-magnesium (Mg ≈ 2.6–3.6 %) alloy substrate, which before plasma spraying was cleaned using blasting with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles. The wear resistance and corrosion tests of sprayed coating and aluminum-magnesium alloy were performed. The volume loss, average central part of the cross-sectional area of wear track, wear rapidity, wear rate, wear resistance and corrosion current of coating and Al-Mg substrate were evaluated. The wear resistance and corrosion of nickel-aluminum coating and aluminum-magnesium substrate were compared at the work. Furthermore the wear tracks analysis of sprayed coating and substrate surface was carried out.

**Keywords:** plasma spray, nickel-aluminum coatings, aluminum-magnesium alloy, wear, electrochemical corrosion.