

## TERMINIU BŪDU UŽPURKŠTŲ Ni-Cr-Si-Fe-B DANGŲ SAVYBIŲ TYRIMAS

Raimonda Lukauskaitė<sup>1</sup>, Donatas Šiurkus<sup>2</sup>, Olegas Černašėjus<sup>3</sup>

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštai: <sup>1</sup>raimonda.lukauskaite@vgtu.lt; <sup>2</sup>donatassiurkus@gmail.com; <sup>3</sup>olecer@vgtu.lt

**Santrauka.** Straipsnyje nagrinėjamos liepsniniu būdu ant aliuminio lydinių substratų užpurkštos Ni-Cr-Si-Fe-B dangos. Aliuminio bandiniai prieš terminį purškimą buvo apdoroti cheminiais, mechaniniais ir terminiais būdais. Pagrindinis aliuminio paviršiaus apdorojimo tikslas buvo pašalinti oksidų sluoksnį nuo paviršiaus ir pagerinti nikelio pagrindo dangų eksploatacines savybes. Atlikti dangos mikrostruktūros, porėtumo, adhezijos ir mikrokietumo tyrimai. Nustatyta liepsninio purškimo būdu gautų dangų eksploatacinių savybių priklausomybė nuo aliuminio paviršiaus paruošimo būdų ir purškimo technologinių parametrų.

**Reikšminiai žodžiai:** liepsninis purškimas, Ni-Cr-Si-Fe-B dangos, aliuminio lydinių bandiniai, dangų eksploatacines savybės.

## Įvadas

Daugelio mašinų elementų gyvavimo laikas priklauso nuo jų paviršiaus eksploatacinių savybių. Terminio purškimo technologija yra vienas iš efektyviausių procesų, siekiant išvengti paviršių korozijos, oksidacijos ir dilimo. Ji apima dangų dengimo procesus, kurie yra klasifikuojami į tris pagrindines grupes: liepsninis purškimas, elektrinis lankinis purškimas ir plazminis purškimas. Kiekvienas dangų purškimo būdas turi savo privalumų ir trūkumų, tačiau atsižvelgiant į norimą gauti rezultatą galima pasirinkti tinkamiausią purškimo būdą (Davis 2004; Gonzalez *et al.* 2007).

Aliuminis yra plačiai naudojamas įvairiose pramonės srityse dėl mažo tankio, gero šiluminio laidumo ir gero atsparumo korozijai kambario temperatūroje. Tačiau aliuminio paviršiaus kietumas yra mažas, o tribologinės savybės yra labai blogos (Yilbas *et al.* 2009; Magnani *et al.* 2008; Mindivan 2010). Siekiant tai pagerinti, taikomi įvairūs terminio purškimo būdai: didelio greičio dujinis liepsninis, plazminis, šaltasis ir kt. (Barbezat 2005).

Terminio purškimo technologijos yra labai svarbios įvairiose pramonės srityse dengiant detales dilimui atspariomis dangomis iš metalinių, keraminių, kompozicinių arba metalinių medžiagų, turinčių karbidų (Barbezat 2005).

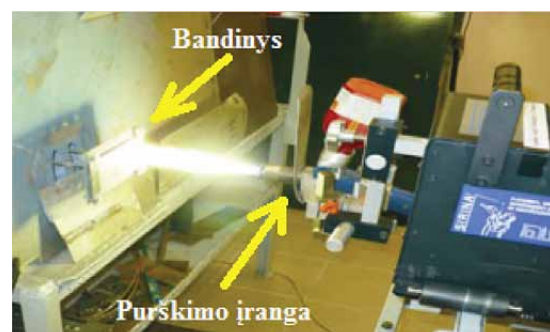
Tinkamas paviršiaus paruošimas terminiam purškimui lemia gerą dangos adheziją su substratu. Kadangi aliuminis pasižymi didele paviršiaus energija, jo paviršius labai greitai reaguoja su deguonimi sudarydamas oksidinę plėvelę, kuri trukdo susidaryti geram dangos sukibimui su aliuminio substratu. Skirtingi dangos ir aliuminio substrato šiluminio plėtimosi ir šiluminio laidumo koeficientai turi įtakos dangos sukibimo su substratu kokybei (Bialucki, Kozerski 2006). Siekiant padidinti dangos adheziją ir patva-

rumą taikomi įvairūs aliuminio paviršiaus apdorojimo būdai (Spadaro *et al.* 2007). Tai mechaninis (SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), cheminis (NaOH, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), mechaninis ir cheminis, katodinis, elektrocheminis, lazerinis valymo būdai ir kt. (Joshi *et al.* 2011; Cherepy *et al.* 2005; Brossard *et al.* 2010; Spadaro *et al.* 2007).

Darbo tikslas – purškiant liepsniniu būdu padengti aliuminio paviršių nikelio pagrindo danga, iširti dangų savybes (porėtumą, kietumą), nustatyti užpurkštų dangų adhezijos priklausomybę nuo aliuminio paviršiaus apdorojimo būdų.

## Tyrimo metodai ir įranga

Eksperimentiniams bandymams buvo naudojami aliuminio lydinių bandiniai (140×20×4 mm), kurie buvo dengiami nikelio pagrindo milteliais liepsninio purškimo būdu (1 pav.). Miltelių ir substrato medžiagos cheminė sudėtis pateikta 1 lentelėje. Visi aliuminio bandiniai prieš liepsninį



1 pav. Liepsninio purškimo įranga

Fig. 1. Technique for flame spray

**1 lentelė.** Ni-Cr-Si-Fe-B dangų miltelių ir aliuminio substrato cheminė sudėtis, %

**Table 1.** A chemical composition (in wt. %) of Ni-Cr-Si-Fe-B powders and Al substrate

Medžiagos	Ni	Fe	B	Si	Cr	C	Al	Mg	Mn
Nikelio lydinys (milteliai)	likutis	3,88	3,13	4,10	14,8	0,78	–	–	–
Aliuminio lydinys (substratas)	–	0,4	–	0,4	–	–	likutis	2,6–3,2	0,5

**2 lentelė.** Aliuminio bandinių apdorojimo būdai ir užpurkštų Ni-Cr-Si-Fe-B dangų storiai, mm

**Table 2.** Methods for aluminum specimen pre-treatment and the thickness of sprayed Ni-Cr-Si-Fe-B layer, mm

Bandiniai	Substratų apdorojimo būdai	Substrato šiurkštis $R_a$ , $\mu\text{m}$	Užpurkštų Ni-Cr-Si-Fe-B dangų storis, mm	Bandiniai	Substratų apdorojimo būdai	Substrato šiurkštis $R_a$ , $\mu\text{m}$	Užpurkštų Ni-Cr-Si-Fe-B dangų storis, mm
I	Valymas smėliu	3,83	0,218	IV	Valymas smėliu + 30 % H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> + pakaitinimas iki 180 °C	3,91	0,226
II	Valymas smėliu + pakaitinimas iki 180 °C	3,83	0,212	V	Valymas smėliu + 10 % NaOH + pakaitinimas iki 180 °C	3,84	0,176
III	Valymas smėliu + pakaitinimas iki 180 °C	3,83	0,384	VI	30 % H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0,91	0,165

purškimą buvo apdoroti skirtingais paviršiaus apdorojimo būdais (2 lentelė). Pagrindiniai liepsninio purškimo parametrai buvo tokie: purškimo atstumas (170 mm), liepsną formuojančios dujos (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> – 0,65 atm ir O<sub>2</sub> – 4 atm.). Skirtingas dangų storis buvo gautas keičiant purškimo ėjimų skaičių. Liepsniniam purškimui ir dangų tyrimams buvo naudojami standartais: LST EN 1274:2005 „Terminis purškimas. Milteliai. Sudėtis, techninės tiekimo sąlygos“, 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“. Aliuminio bandinių šiurkštumas po paviršiaus apdorojimo buvo nustatomas paviršiaus šiurkštumo matuokliu TR-200.

Užpurkštos Ni-Cr-Si-Fe-B dangos mikrostruktūra buvo analizuojama stebint poliruotų ir ėsdintų dangų skersinių mikrošlifų paviršius optiniu mikroskopu „Nicon Eclipse MA 200“. Liepsninio purškimo būdu užpurkštų dangų porėtumas buvo tiriama pasitelkiant programinį paketą „Scion Image“, naudojant optinio mikroskopo vaizdus, padidintus 200 kartų.

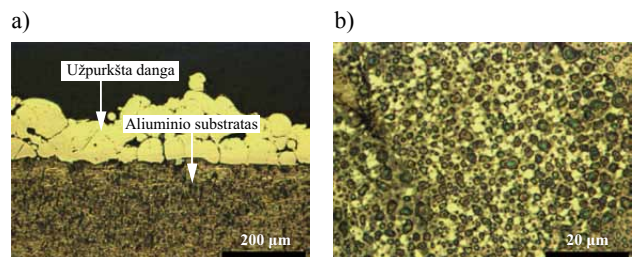
Adhezijai matuoti taikytas klįjavimo metodas. Šis metodas leidžia gauti realias dangos ir substrato sukibimo skaitines reikšmes. Bandymams atlikti buvo naudojami 14 mm skersmens klįjuojami „Dolly“ bandiniai. Dengtų

aliuminio lydinų plokštelių ir pašiurkštintų „Dolly“ bandinių paviršiai buvo suklijuoti vienas su kitu epoksidiniais klįjais. Sukibimo adhezijos stipris buvo matuojamas dangos atplėšimo būdu.

Skersinių dangų mikrokietumas buvo nustatomas Vikerso matavimo metodu, naudojant 50 g apkrovą.

### Tyrimų rezultatai

Metalografiniai tyrimai parodė, kad liepsniniu būdu užpurkštų dangų mikrostruktūrą sudaro nikelio kietasis tirpalas nikelio borido eutektikoje (2 pav.). Dangų kietumą lemia grūdelių paribiuose išsidėstę chromo karbidai.



**2 pav.** Skersinis vaizdas užpurkštos dangos (a) ir Ni-Cr-Si-Fe-B dangos mikrostruktūra (b)

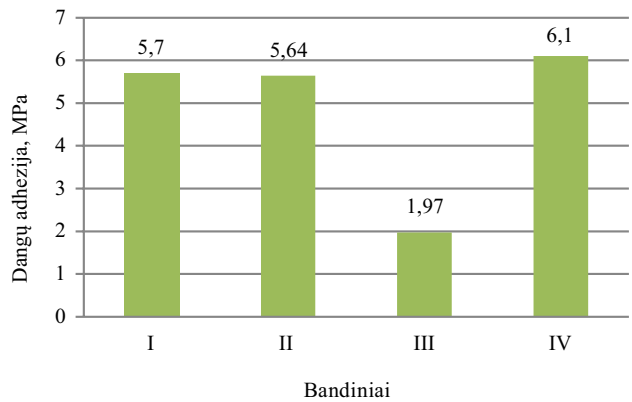
**Fig. 2.** A cross-section of sprayed coatings (a) and the microstructure of Ni-Cr-Si-Fe-B coating (b)

Atlikus Ni-Cr-Si-Fe-B dangų adhezijos tyrimus, nustatyta, kad dangos adhezija priklauso nuo aliuminio substrato paruošimo būdų. Didžiausia dangos adhezija (6,1 MPa) pasiekta, kai substrato paviršius buvo apdorotas taikant valymą smėliu, cheminį valymą naudojant 30 %  $H_3PO_4$  tirpalą ir pakaitintas iki 180 °C temperatūros. Substrato paviršių apdorojus tik taikant valymą smėliu ir pakaitinus iki 180 °C temperatūros dangos adhezijos reikšmė buvo tokia pati kaip ir vien valymo smėliu apdoroto bandinio (3 pav.). Nustatyta, kad adhezija gerokai mažėja padidinus dangos storį (III bandinys). Tai lemia dangos vidiniai įtempiai, atsirandantys dėl skirtingų dangos ir aliuminio substrato šiluminio plėtimosi ir šiluminio laidumo koeficientų. Aliuminio substratų paviršiams taikant valymą smėliu, cheminį valymą, naudojant 10 % NaOH tirpalą, ir pakaitinimą iki 180 °C, taip pat aliuminio paviršiui taikant cheminį valymą, naudojant 30 %  $H_3PO_4$  tirpalą, dangų adhezija nenustatyta, nes Ni-Cr-Si-Fe-B dangos atšoko nuo substrato. Blogą dangos su aliuminio substratu adheziją lėmė įvairių šarminių junginių formavimasis ant aliuminio paviršiaus (V bandinys) ir mažas paviršiaus šiurkštis (VI bandinys).

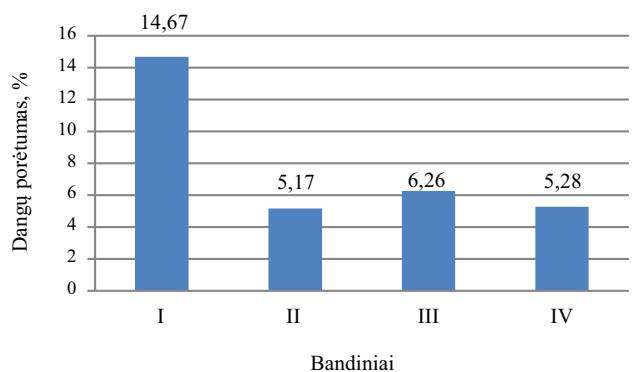
Viena iš dangų kokybės charakteristikų yra dangos porėtumas. Porų kiekis dangoje lemia dangos eksploatacines savybes. Dangų porėtumas buvo nustatytas analizuojant skersinius mikrošlifų vaizdus programa „Scion Image“. Žinant bendrą porų plotą ir analizuojamo mikrošlifto plotą apskaičiuojamas dangos porėtumas.

Nustatyta, kad aliuminio bandinio paviršiui taikant tik valymą smėliu, Ni-Cr-Si-Fe-B dangų porėtumas yra didžiausias ir siekia 14,67 % (4 pav.). Mažiausias dangos porėtumas 5,17–6,26 % pasiektas aliuminio bandinio paviršiui apdoroti taikant valymą smėliu ir pakaitinimą iki 180 °C. Mažesnę dangų porėtumą lemia sumažėjęs temperatūros gradientas tarp dangos ir substrato ir aukštesnė besiformuojančios dangos temperatūra. Storesnės Ni-Cr-Si-Fe-B dangos (III bandinys) porėtumas yra šiek tiek didesnis negu plonesnės dangos (II bandinys) – atitinkamai 6,26 % ir 5,17 %.

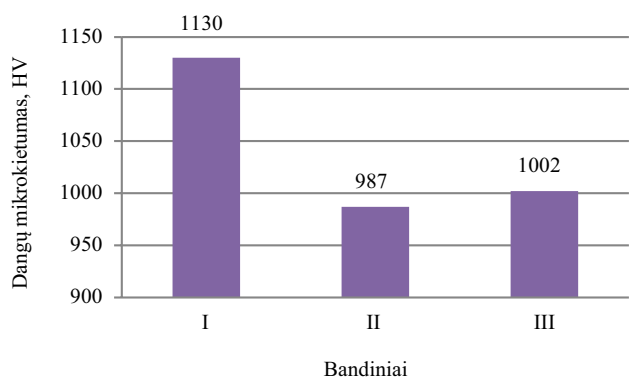
Liepsniniu purškimo būdu sudarytų Ni-Cr-Si-Fe-B dangų mikrokietumas kinta nuo 987 iki 1130 HV (5 pav.). Pastebėta, kad didžiausias dangų kietumas būna, kai paviršiui apdoroti taikomas tik valymas smėliu (1130 HV), o mažesnis dangos kietumas gautas papildomai aliuminio bandinio paviršių pakaitinus 180 °C temperatūroje (987–1002 HV). Dangų mikrokietumo reikšmių svyravimą gali lemti tai, kad purškimo metu besiformuojančios dangos aušimo greitis mažėja, todėl dangos grūdelių paribiuose išsidėstę chromo karbidai gali iš dalies koaguliotis.



3 pav. Užpurkštų Ni-Cr-Si-Fe-B dangų adhezija  
Fig. 3. The adhesion of sprayed Ni-Cr-Si-Fe-B coatings



4 pav. Užpurkštų Ni-Cr-Si-Fe-B dangų porėtumas  
Fig. 4. The porosity of sprayed Ni-Cr-Si-Fe-B coatings



5 pav. Užpurkštų Ni-Cr-Si-Fe-B dangų vidutinis mikrokietumas  
Fig. 5. The average microhardness of sprayed Ni-Cr-Si-Fe-B coatings

## Išvados

1. Nustatyta, kad liepsniniu būdu užpurkštų dangų mikros-  
struktūrą sudaro nikelio kietasis tirpalas nikelio borido  
eutektikoje. Dangų kietumą lemia grūdelių paribiuose  
išsidėstę chromo karbidai.

2. Atlikus užpurkštų Ni-Cr-Si-Fe-B dangų adhezijos tyrimus, nustatyta, kad dangos adhezija nestipriai priklauso nuo aliuminio substrato paruošimo būdo. Dangos adhezija gerokai mažėja padidinus dangos storį. Tai lemia dangos vidiniai įtempiai, atsirandantys dėl skirtingų dangos ir aliuminio substrato šiluminio plėtimosi bei šiluminio laidumo koeficientų.
3. Mažiausias dangos porėtumas – 5,17–6,26 % pasiektas aliuminio paviršiui apdoroti taikant valymą smėliu ir pakaitinus iki 180 °C. Geresnį dangų porėtumą lemia mažesnis temperatūros gradientas tarp dangos ir substrato ir aukštesnė besiformuojančios dangos temperatūra.
4. Aliuminio bandinio paviršiui apdoroti taikant valymą smėliu ir pakaitinus iki 180 °C temperatūros Ni-Cr-Si-Fe-B dangų mikrokietumas yra mažesnis ir siekia 987–1002 HV. Dangų mikrokietumo reikšmių svyravimą gali lemti tai, kad purškimo metu besiformuojančios dangos aušimo greitis mažėja, todėl dangos grūdelių paribiuose išsidėstę chromo karbidai gali iš dalies koaguluotis.

## Literatūra

- Barbezat, G. 2005. Advanced thermal spray technology and coating for lightweight engine block for the automotive industry, *Surface and Technology* 200: 1990–1993. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfco.2009.10.050>
- Bialucki, P.; Kozerski, S. 2006. Study of adhesion of different plasma-sprayed coatings to aluminium, *Surface and Coatings Technology* 201: 2061–2064. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfco.2006.04.043>
- Brossard, S., et al. 2010. Study of the splat formation for plasma sprayed NiCr on aluminum substrate as a function of substrate condition, *Surface and Coatings Technology* 204: 2647–2656. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfco.2010.02.013>
- Cherepy, N. J., et al. 2005. Characterization of an effective cleaning procedure for aluminum alloys: surface enhanced Raman spectroscopy and zeta potential analysis, *Journal of Colloid and Interface Science* 282: 80–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2004.08.064>
- Davis, J. R. 2004. *Handbook of thermal spray*. ASM International, Thermal Spray Society Training Committee. 338 p.
- Gonzalez, R., et al. 2007. Microstructural study of NiCrBSi coatings obtained by different processes, *Wear* 263: 619–624. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.094>
- Yilbas, B. S., et al. 2009. Laser treatment of aluminum surface: Analysis of thermal stress field in the irradiated region, *Journal of Material Processing Technology* 209: 77–88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.01.047>
- Joshi, S., et al. 2011. Effect of alkaline cleaning and activation on aluminum alloy 7075-T6, *Applied Surface Science* 257: 1859–1863. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.08.126>
- Magnani, M., et al. 2008. Influence of HVOF parameters on the corrosion and wear resistance of WC-Co coatings sprayed on AA7050 T7, *Surface and Technology* 202: 4746–4757. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfco.2008.04.055>
- Mindivan, H. 2010. Wear behavior of plasma and HVOF sprayed WC – 12Co + 6% ETFE coatings on AA2024-T6 aluminum alloy, *Surface and Coatings Technology* 204: 1870–1874. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfco.2009.10.050>
- Spadaro, C., et al. 2007. Laser surface treatment for adhesion improvement of aluminium alloys structural joints, *Radiation Physics and Chemistry* 76: 1441–1446. <http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2007.02.047>

## RESEARCH ON THE PROPERTIES OF THERMAL SPRAYED Ni-Cr-Si-Fe-B COATINGS

R. Lukauskaitė, D. Šiurkus, O. Černašėjus

### Abstract

The article deals with the flame sprayed Ni-Cr-Si-Fe-B coating on aluminum alloy substrates. Before the thermal spraying process, aluminum samples were modified applying chemical, mechanical and thermal processing pre-treatment methods. The main aluminum surface treatment was removing an oxide layer from the surface and improving the exploitation properties of nickel-based coatings. The work involved coating microstructure, porosity, adhesion and microhardness tests. The dependence of the estimated exploitation properties of flame spray coatings on aluminum surface preparation methods and technological parameters of spraying has been established.

**Keywords:** thermal spray, Ni-Cr-Si-Fe-B coatings, aluminium alloy specimens, spray coating exploitation properties.