

Ni-Cr-Si-B DANGOS, UŽPURKŠTOS ANT ALIUMINIO SUBSTRATO
PLAZMINIO PURŠKIMO BŪDU, TYRIMASRaimonda Lukauskaitė¹, Algirdas Vaclovas Valiulis², Olegas Černašėjus³, Jelena Škamat⁴

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹raimonda.lukauskaite@vgtu.lt; ²algirdas.valiulis@vgtu.lt; ³olecer@vgtu.lt; ⁴jelena.skamat@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjamas Ni-Cr-Si-B dangos dengimas ant aliuminio substratų plazminiu purškimo būdu. Tyrimo tikslas – sukurti aliuminio lydinių paviršiuje geresnių fizinių ir mechaninių savybių dangas. Aliuminio lydinių terminį purškimą apsunkina tanki, aukštos lydymosi temperatūros oksido plėvelė substrato paviršiuje. Aliuminio substratų paviršiai prieš purškimą buvo apdorojami cheminiais ir mechaniniais apdorojimo būdais. Pagrindinis aliuminio lydinių apdorojimo tikslas buvo pašalinti oksidų sluoksnį nuo aliuminio paviršiaus ir paveikti substrato paviršiaus šiurkštumą. Aliuminio paviršiaus šiurkštis po apdorojimų buvo tiriama profilometru. Dangų mikrostruktūra ir porėtumas buvo nagrinėjami optinės mikroskopijos būdu taikant fazių ir morfologijos analizės programą. Buvo nustatyta plazminio purškimo dangų adhezijos reikšmių priklausomybė nuo aliuminio paviršiaus apdorojimo būdų. Eksperimentinių tyrimų metu buvo analizuojama purškimo proceso technologinių parametų įtaka užpurkštų dangų porėtumui ir kietumui.

Reikšminiai žodžiai: plazminis purškimas, Ni pagrindo dangos, aliuminio lydinio substratas, užpurkštų dangų adhezija.

Įvadas

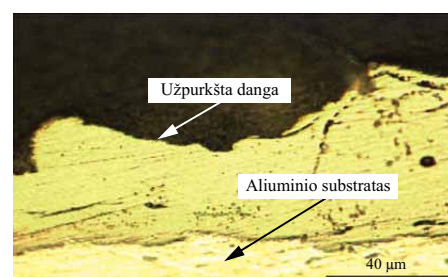
Aliuminio lydiniai dėl gerų mechaninių savybių, mažo tankio, didelio elektrinio ir šiluminio laidumo yra vieni iš universaliausių medžiagų. Šie lydiniai yra lengvai deformuojami, pasižymi geru koroziniu atsparumu ir yra nebrangūs. Tačiau nedidelis kietumas ir žema lydymosi temperatūra lemia aliuminio lydinių blogas tribologines savybes ir atsparumą karščiui. Aliuminio lydiniai neturi alotropinio virsmo, kaip kad geležies, kobalto arba titano lydiniai, todėl įprastų metalo lydinių kietinimo būdų taikymas yra ribotas (Liang *et al.* 2000; Fu *et al.* 1998).

Aliuminio lydiniai labai plačiai taikomi pramonėje. Daugelis mašinų dalių gaminami iš aliuminio lydinių ir kai kurie jų dengiami terminio purškimo būdu. Šiuo metu daugiau kaip 60 proc. automobilių variklių blokų gaminami iš liejamųjų aliuminio lydinių. Per paskutinius 20 metų terminio purškimo dangų technologijos buvo intensyviai plėtojamos, nes pasižymėjo dideliu dangų sudarymo našumu. Naujų dangų taikymas leidžia padidinti daugelio gaminių resursą ir sumažinti savikainą. Automobilio pavarų dėžės dalių (synchronizavimo žiedų ir perėjimo šakučių) dengimas molibdeno liepsninio purškimo būdu sumažina darbinio paviršiaus trinties koeficientą ir dilimo spartą. Automobilių variklių stūmoklių kanalai paprastai dengiami metalų karbidais, keramika ir kompozitais plazminiu purškimo būdu, o kai norima pasiekti gerų eksploatacinių savybių, dyzelinių

variklių stūmoklių kanalai dengiami didelio greičio liepsninio purškimo būdu (Bialucki, Kozerski 2006; Barbezat 2005; Uozato *et al.* 2005).

Siekiant pagerinti aliuminio lydinių korozinį atsparumą naudojamos įvairių rūšių dangos (1 pav.).

Tai organinės silano, polimerų, elektrocheminės nikelio, nikelio ir chromo, keraminės ir metalokeramikos (kermetai) dangos. Nikelio dangos su silicio karbido priedais yra plačiai naudojamos mažo galingumo variklių detalėms padengti. Siekiant sukurti dangas, pasižyminčias geromis tribologinėmis ir korozinėmis savybėmis, svarbu ne tik purškiamos medžiagos cheminė sudėtis, bet ir terminio purškimo parametrai (dujų išėiga, srauto galia, dalelių dydis, purškimo atstumas, dujų srauto greitis ir kt.), kurie turi būti optimizuojami (Magnani *et al.* 2008).



1 pav. Užpurkšta Ni-Cr-Si-B danga ant aliuminio substrato
Fig. 1. Ni-Cr-Si-B coatings sprayed onto aluminum substrate

Dengiant aliuminio lydinius dangomis kyla daug daugiau problemų, negu dengiant plieno lydinius, nes aliuminio lydinių paviršius greitai pasidengia plona, tvirta oksidinė plėvele, kuri trukdo susidaryti geram dangos sukibimui su aliuminio lydinių substratu. Kita vertus, aliuminio lydiniams būdingi dideli šiluminio plėtimosi ir šiluminio laidumo koeficientai, kurie dažnai labai skiriasi nuo dangų medžiagos šiluminio plėtimosi ir šiluminio laidumo koeficientų. Šių fizikinių parametų skirtumai labai lemia dangos sukibimo su substratu kokybę (Bialucki, Kozerski 2006).

Siekiant sumažinti oksido formavimąsi ant aliuminio paviršiaus ir gauti gerą dangos sukibimą su dengiamuoju metalu, prieš purškimą taikomi įvairūs substrato paviršiaus apdorojimo būdai. Tai mechaninis (SiC, Al₂O₃), cheminis (NaOH, H₃PO₄), mechaninis ir cheminis, katodinis, lazerinis valymo būdai (Joshi *et al.* 2011; Cherepy *et al.* 2005; Brossard *et al.* 2010).

Pagrindinis šio tyrimo tikslas yra nustatyti paviršiaus apdorojimo būdų, paviršiaus šiuurkščio ir purškimo parametų įtaką plazminiu būdu užpurkštos nikelio pagrindo dangos adhezijai, mikrostruktūrai, porėtumui ir mikrokietumui.

Tyrimo metodai ir įranga

Aliuminio lydinių substratai (140×20×4 mm) plazminio purškimo įranga buvo dengiami nikelio pagrindo milteliais (2 pav.).

Miltelių ir substrato medžiagos cheminė sudėtis pateikta 1 lentelėje. Visi aliuminio bandiniai prieš plazminį purškimą buvo apdoroti skirtingais paviršiaus apdorojimo būdais (2 lentelė).

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

Table 1. Chemical composition (in wt. %) of Ni-Cr-Si-B powders and Al substrate

Medžiagos	Ni	Fe	B	Si	Cr	C	Al	Mg	Mn
Nikelio lydinys (milteliai)	likutis	max 2	2,5	4	12	0,5	–	–	–
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-B dangų storis, mm

Table 2. Pre-treatment methods of aluminum specimens and the thickness of sprayed Ni-Cr-Si-B layers, mm

Bandiniai	Substratų apdorojimo būdai	Substrato šiuurkštis R_a , μm	Užpurkštų Ni-Cr-Si-B dangų storis, mm	Bandiniai	Substratų apdorojimo būdai	Substrato šiuurkštis R_a , μm	Užpurkštų Ni-Cr-Si-B dangų storis, mm
I	Valymas smėliu	3,83	0,31	V	Valymas smėliu + 30 % H ₃ PO ₄	3,91	0,18
II	Valymas smėliu	3,83	0,16	VI	Valymas smėliu + 30 % H ₃ PO ₄	3,91	0,13
III	Valymas smėliu	3,83	0,12	VII	20 % NaOH	1,00	0,14
IV	Valymas smėliu + 30 % H ₃ PO ₄	3,91	0,32				



2 pav. Plazminio purškimo įranga

Fig. 2. Equipment for plasma spray

Pagrindiniai plazminio purškimo parametrai buvo tokie: srauto galia 33,4 kW, purškimo atstumas 90 mm; naudotos apsauginės dujos – argonas, plazmą formuojančios dujos – azotas. Skirtingas dangų storis buvo gautas keičiant purškimo skaičių. Plazminiam purškimui ir dangų tyrimams buvo taikomi standartai: 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 šiuurkštumas po paviršiaus apdorojimo buvo nustatomas paviršiaus šiuurkštumo matuokliu TR-200.

Užpurkštos nikelio pagrindo dangos mikrostruktūra buvo analizuojama stebint poliruotų ir ėsdintų dangų skersinių mikrošlifų paviršius, naudojant optinį mikroskopą „Nicon Eclipse MA 200“. Pačių Ni-Cr-Si-B miltelių struktūra buvo tiriama pasigamintais specialiais briketais. Milteliai maišomi su epoksidiniais klijais, iš šio mišinio daromi briketai, kurie vėliau šlifuojami, poliruojami, ėsdinami

ir tiriami optiniu mikroskopu. Plazminiu būdu užpurkštų dangų porėtumas buvo tiriamas naudojant programinį paketą „Scion Image“, pasitelkiant optinio mikroskopo vaizdus, padidintus 500 kartų.

Adhezijai matuoti buvo taikomas klijavimo metodas, kuris leidžia gauti realias dangos ir substrato sukibimo skaitines reikšmes. Bandymams atlikti pasirinkti 14 mm skersmens klijuojami „Dolly“ bandiniai. Dengtų aliuminio lydinii plokštelių ir pašiuurkštintų „Dolly“ bandinių paviršiai buvo suklijuoti vienas su kitu „Araldite 2011“ klijuojais. Siekiant gauti tvirtą dangos ir „Dolly“ bandinio sukibimą, suklijuoti paviršiai 14 val. buvo laikomi 40 °C temperatūroje ir 24 val. – kambario temperatūroje. Sukibimo adhezijos stipris buvo matuojamas dangos atplėšimo būdu.

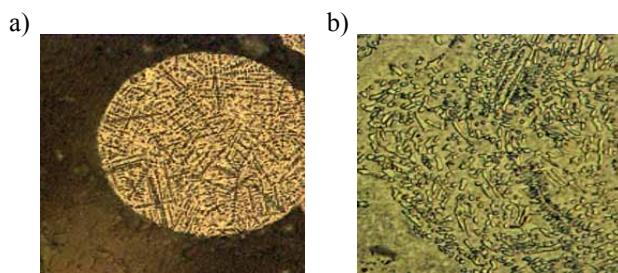
Skersinių dangų mikrokietumas buvo nustatomas Vikerso matavimo metodu, naudojant 50 g apkrovą.

Tyrimų rezultatai

Atlikus Ni-Cr-Si-B miltelių ir purkštinių dangų eksperimentinius tyrimus optiniu mikroskopu, nustatyta, kad nikelio pagrindo milteliai buvo gauti išlydytą skystą lydinį greitai aušinant dujinėje arba skystoje terpėje. Naudotas aušinimo greitis leido grūdeliuose kristalizacijos metu susiformuoti dendritiniams kristalams (3 pav., a).

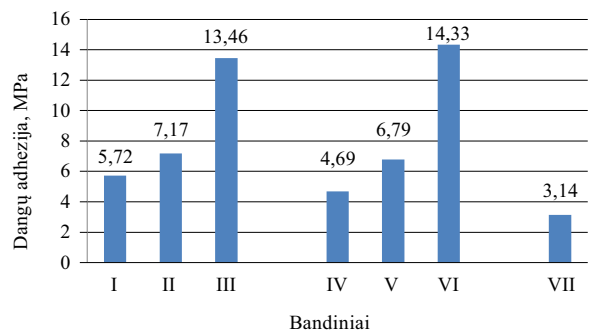
Tiriant plazminiu būdu Ni-Cr-Si-B užpurkštą dangą, nustatyta, kad dangų mikrostruktūrą sudaro nikelio kietasis tirpalas nikelio borido eutektikoje (3 pav., b). Dangų kietumą lemia grūdelių paribiuose išsidėstę chromo karbidai.

Eksperimentiniai duomenys rodo, kad dangos adheziją lemia ne tik užpurkštos dangos storis, bet ir aliuminio paviršiaus apdorojimo būdai.



3 pav. Ni-Cr-Si-B miltelių (a) ir dangos (b) mikrostruktūra
Fig. 3. The microstructure of Ni-Cr-Si-B powders (a) and coatings (b)

Atlikus Ni-Cr-Si-B dangų adhezijos tyrimus (4 pav.), nustatyta, kad dangos adhezija priklauso nuo substrato paviršiaus paruošimo būdo. Didžiausia dangos adhezija (13,46–14,33 MPa) buvo, substrato paviršiumi taikant valymą smėliu ir valymą smėliu naudojant 30 % H₃PO₄ priedą, o mažiausia (3,14 MPa), kai substrato paviršiumi apdoroti naudotas 20 % NaOH tirpalas. Blogą dangos su aliuminio



4 pav. Užpurkštų Ni-Cr-Si-B dangų adhezija
Fig. 4. The adhesion of sprayed Ni-Cr-Si-B coatings

substratu adheziją lėmė įvairių šarminių junginių formavimasis ant aliuminio paviršiaus po cheminio apdorojimo.

Taip pat pastebėta, kad mažėjant dangos storiui, dangos adhezija didėja. Tai susiję su dangoje susidarančiais vidiniais įtempiais. Kuo plonesnė danga, tuo joje įtempiai yra mažesni ir tai lemia geresnį dangos sukibimą su pagrindiniu metalu.

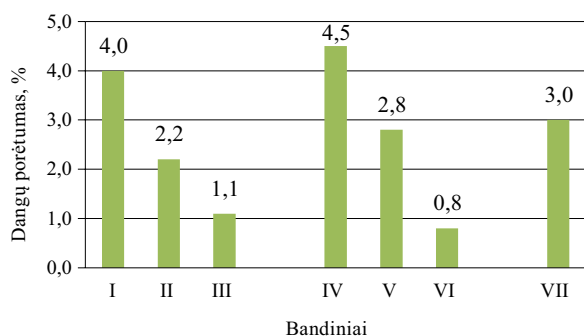
Viena iš dangų kokybės charakteristikų yra dangos porėtumas. Porų kiekis dangoje lemia dangos eksploatacines savybes. Poros dangose dažniausiai atsiranda, kai lašeliams kristalizuojantis mažėja dujų tirpumas. Formuojantis dangai lašeliai kristalizuojasi ir vyksta ištirpusių skystoje fazėje dujų išsiskyrimas. Dujos, negalinčios prasiskverbti į paviršius, lieka dangoje ir suformuoja mažas sferos pavidalo poras (Gedzevičius 2005). Dangų porėtumas buvo nustatytas analizuojant skersinius mikrošlifų vaizdus programa „Scion Image“. Žinant bendrą porų plotą ir analizuojamo mikrošlifų ploto santykį apskaičiuojamas dangos porėtumas.

Mažiausias dangos porėtumas yra (0,8–1,1 %) nustatytas esant 0,12 ir 0,13 mm dangų storiui, o didžiausias užpurkštos dangos porėtumas (4,5–4,0 %) pasiektas esant 0,31 ir 0,32 mm storio dangoms (5 pav.). Substrato paviršiaus apdorojimo būdų vienareikšmio poveikio dangos porėtumui nenustatyta.

Plazminio purškimo būdu sudarytų Ni-Cr-Si-B dangų mikrokietumas kinta nuo 674 iki 882 HV (6 pav.). Dangų mikrokietumo reikšmių svyravimą lemia tai, kad jų formavimosi metu dalis purškiamų dalelių neišsilydo. Nustatyta, kad dangų mikrokietumas nepriklauso nuo aliuminio substrato paruošimo būdų ir dangų storio.

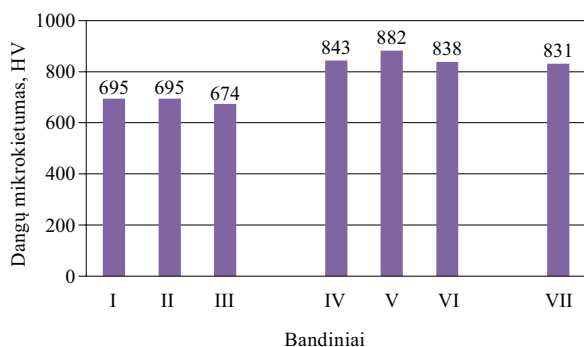
Išvados

1. Mikrostruktūros tyrimai parodė, kad nikelio pagrindo dangas sudaro nikelio kietasis tirpalas nikelio borido eutektikoje. Dangos kietumą lemia grūdelių paribiuose susidarę chromo karbidai.
2. Dangų adhezijos matavimai parodė, kad Ni-Cr-Si-B dangų adheziją su aliuminio substratu lemia aliuminio paviršiaus paruošimo būdai ir dangų storis. Tai yra su-



5 pav. Užpurkštų Ni-Cr-Si-B dangų porėtumas

Fig. 5. The porosity of sprayed Ni-Cr-Si-B coatings



6 pav. Užpurkštų Ni-Cr-Si-B dangų vidutinis mikrokietumas

Fig. 6. The average microhardnes of sprayed Ni-Cr-Si-B coatings

siję su dangų vidiniais įtempiais. Kuo plonesnė danga, tuo joje formuojasi mažesni vidiniai įtempiai, o tai lemia geresnę dangos adheziją su pagrindiniu metalu. Dėl cheminio aliuminio substrato valymo dangos sukibimas su substratu būna blogesnis, negu kai aliuminio substratas valomas mechaniniu arba mechaniniu ir cheminiu valymo būdais.

- Dangų porėtumo matavimai parodė, kad plonėjant Ni-Cr-Si-B dangai, dangos porėtumas mažėja.
- Plazminiu būdu užpurkštos Ni-Cr-Si-B dangos pasižymi dideliu mikrokietumu – 674–831 HV. Dangų mikrokietumo reikšmių svyravimą lemia tai, kad dangos formavimosi metu dalis purškiamų dalelių neišsilydė. Nustatyta, kad dangų mikrokietumas nepriklauso nuo aliuminio substrato paruošimo būdų ir dangų storio.

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.surfcoat.2005.08.017>
- 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.surfcoat.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.surfcoat.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>
- Fu, Y., et al. 1998. Laser alloying of aluminum alloy AA 6061 with Ni and Cr. Part I. Optimization of processing parameters by X-ray imaging, *Surface and Technology* 99: 287–294. [http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00569-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00569-0)
- Gedzevičius, I. 2005. *Metalinių purkštųjų dangų struktūros ir savybių priklausomybės nuo technologinių parametrų tyrimas*. Doctoral Dissertation. Vilnius. 119 p.
- 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>
- Liang, G. Y., et al. 2000. A study of wear resistance of plasma-spray and laser-remelted coatings on aluminium alloy, *Surface and Coatings Technology* 127: 233–238. [http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00551-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00551-X)
- 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.surfcoat.2008.04.055>
- Uozato, S., et al. 2005. Evaluation of ferrous powder thermal spray coatings on diesel engine cylinder bores, *Surface and Technology* 200: 2580–2586. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.05.042>

RESEARCH INTO Ni-Cr-Si-B COATING SPRAYED ONTO ALUMINIUM SUBSTRATE USING THE METHOD OF PLASMA SPRAY

R. Lukauskaitė, A. V. Valiulis, O. Černašėjus, J. Škamat

Abstract

The article deals with Ni base coatings deposited on aluminium substrate applying the method of plasma spray. The purpose of the conducted research is to improve the physical and mechanical properties of coatings on the surface of aluminium alloy work pieces. Spraying on aluminium alloys encounters serious problems, and therefore this work analyses the ways to make the situation more favourable. Before spraying, the surfaces of substrates were modified employing chemical and mechanical pre-treatment methods. The aim of pre-treating aluminium alloys was to remove oxide layers from the aluminium surface. Coating microstructures and porosity were characterised applying optical microscopy. Differences in the roughness of pre-treated surfaces have been determined referring to profilometry. The paper investigates the influence of the adhesion of plasma spray coatings on aluminium surface pretreatment. Microhardness technique was applied for measuring the hardness of coatings. The study also describes and compares the mechanical properties of Ni base coatings deposited on different pre-treated aluminium substrates using plasma spray.

Keywords: plasma spray, Ni based coatings, aluminium alloy substrate, adhesion strength of spray coatings.