

PSEUDODANGŲ, UŽPURKŠTŲ ELEKTROLANKINIŲ BŪDŲ, TYRIMAS

Tomas RODŽIANSKAS¹, Ovidijus JARAŠIŪNAS², Irmantas GEDZEVIČIUS³, Gediminas MIKALAUSKAS⁴, Justinas GARGASAS⁵, Gintas VISELGA⁶, Ina TETSMAN⁷

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

El. paštas: ¹tomas.rodzianskas@vgtu.lt; ²ovidijus.jarasiunas@vgtu.lt; ³irmantas.gedzevicius@vgtu.lt; ⁴gediminas.mikalauskas@vgtu.lt; ⁵justinas.gargasas@vgtu.lt; ⁶gintas.viselga@vgtu.lt; ⁷ina.tetsman@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjamos elektrolankinio purškimo būdu suformuotos dangos, gautos užpurškus dvi skirtingas pilnavidurės nerūdijančiojo plieno (AISI 316) ir jūrinės bronzos (CuAl8) vielas. Substratas – mažanglis plienas S235J2 (LST EN 10025:2004). Elektrolankinio purškimo įranga – „EuTronic Arc Spray 4“ su papildomu srovės šaltiniu. Eksperimentų metu siekiama parinkti optimalų technologinį purškimo procesą ir gauti dangas, pasižyminčias geriausiomis mechaninėmis, fizikinėmis, tribologinėmis savybėmis, kurios atitinka konkrečius keliamus reikalavimus eksploatuojamoms dangoms. Nustatytas dangų mikrokietumas, tamprumo modulis ir nagrinėta dangų morfologija. Dangų tribologiniai rezultatai vertinti nustatant prastąją bandinių masę.

Reikšminiai žodžiai: adhezija, atsparumas dilimui, dangos, elektrolankinis purškimas, jūrinė bronzos, nerūdijantysis plienas, mikrokietumas, dangų mikrostruktūra, tamprumo modulis.

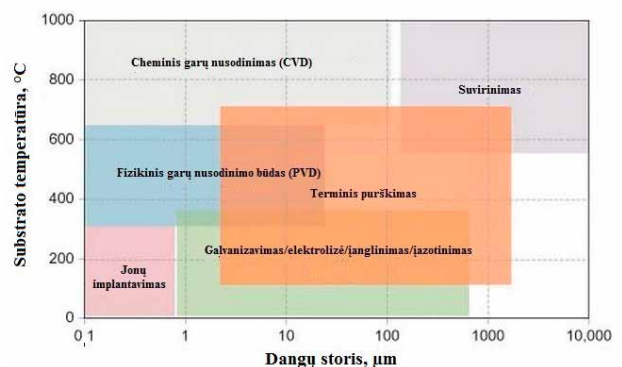
Įvadas

Metalų lydiniais, oksidais, metalų / keramikos mišiniais, karbidais ar įvairių medžiagų kompozitais gali būti padengti įvairūs medžiagų paviršiai, formuojant unikalias dangų mikrostruktūras. Terminio purškimo metu gautos dangos sukuria funkcinį apsauginį paviršių, kuris apsaugo arba modifikuoja substrato medžiagą ar atskiras jo dalis. Terminio purškimo būdas plačiai taikomas aviacijos pramonėje, restauruojant lėktuvų variklius ar atskiras detales, po ilgo naudojimo laiko norint atstatyti pradinius detalių matmenis. Dažnai termiškai užpurkštos dangos naudojamos gaminiui nuo aukštos temperatūros poveikio apsaugoti (aukštatemperatūre oksidacija), taip pat dangos didina gaminių atsparumą dilimui ir korozijai, pagerina gaminių paviršiaus dielektrines savybes arba elektrinį laidumą (Dorform 2012; Espallargas 2015).

Tinkamas medžiagos parinkimas užtikrina ne tik atskiros detalės ar mazgo veiklą, bet ir viso mechanizmo patikimumą, ilgaamžiškumą, o kartu konkuruojančių įmonių ekonomišumą. Kuo ilgiau detalė išlaiko jai paskirtas apkrovas nepakitusi ir išlieka tinkama naudoti, tuo mažesnė dalis jos gamybai sunaudotų išlaidų tenka atlikto darbo vienetui. Tačiau ne visuomet pakanka vien tinkamai parinkti medžiagas, kartais naudinga atskiras detales ar jų komponentus dengti įvairiomis dangomis, pasižyminčiomis itin dideliu atsparumu trinčiai ar atsparumu korozijai.

Elektrolankinis purškimas žinomas kaip vienas pigiausių ir greičiausių dangų dengimo būdų, leidžiančių sukurti tankias ir gerai detales padengiančias dangas. Lankiniu būdu užpurkštos dangos dažniausiai yra tankesnės ir stipresnės nei tos pačios dangos, užpurkštos kitais būdais. Maža kaina ir didelis efektyvumas leidžia užpurkšti didelius plotus per palyginti mažą laiko tarpą. 1 pav. lyginama skirtingais būdais padengtų paviršių dangų storis ir substrato temperatūra.

Dangų storis varijuoja nuo kelių mikronų ir gali siekti daugiau nei 1000 μm. Kaip matyti iš (1 pav.), naudojant



1 pav. Skirtingų dangų, naudojamų pramonėje, palyginimas (Davis 2004)

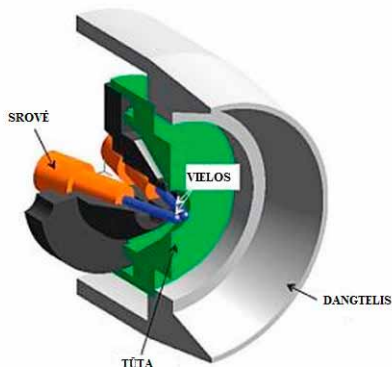
Fig. 1. Comparison of the different coating processes in the market (Davis 2004)

terminio purškimo technologijas, užpurkštos dangos užima plačią sritį pramonėje. Bene pagrindinis šio proceso pranašumas lyginant su kitais dangų dengimo būdais, yra našumas, nes galima nuo kelių iki keliolikos kartų padengti daugiau dangos nei kitais būdais. Didelis dangų storio intervalas terminio purškimo dangas leidžia plačiai taikyti įvairiose pramonės šakose (Planche *et al.* 2003).

Dabartinė nauja įranga, su kuria lengva ir patogiu dirbti, bei patobulėjęs technologinio purškimo procesas labai praplėtė įvairių rūšių termiškai purškiamų dangų spektrą ir ypač jų kokybę. Vis daugiau pramonės sričių imasi spręsti kilusias problemas ne sukurdamos iš esmės naują gaminių, bet tobulindamos tų gaminių paviršių (Bolot *et al.* 2008).

Autoriai, tiriantys dangas, daug dėmesio skiria dangų savybėms ir technologiniams purškimo parametrams, kai tiriamos vienos rūšies medžiagos (vielos). Pasigendama informacijos, kaip galima būtų elektrolankinio purškimo metu suderinti procesą ir gauti kokybiškas dangas purkšti naudojant dvi skirtingas vielas. Vielų cheminės sudėties keitimas leidžia gauti pseudodangas (*duplex*), pasižyminčias unikaliomis savybėmis, nes galima formuoti dangas iš skirtingų lydinių.

Elektrolankinis terminis purškimas – vienas iš dažniausiai ir plačiausiai taikomų terminio purškimo būdų. Šio purškimo metu užpurškiamam metalui išlydyti naudojama elektros lanko šiluma. Purškimo įrenginio išpurškimo tūtoje tarp elektrodų sukuriama tam tikra įtampa, susidaro elektros lankas, kurio veikiamos elektrolankinio purškimo vielos lydosi, lankas dega tarp dviejų nepertraukiamai tiekiamų vielinių elektrodų. Išsiskiria šiluma, kuri juos įkaitina ir išlydo (2 pav.). Išlydytos vielinių elektrodų dalelės suslėgtuoju oru (ar dujomis) užpurškiamos ant substrato. Purškimo fazele charakteristikos ir purškimo kokybiniai bei kiekybiniai parametrai labai priklauso nuo tūtos geometrinės formos. Keičiant fazele lekiančių dalelių greitį, temperatūrą ir tūtos angos skersmenį galima optimizuoti purškimo parametrus ir gauti geresnę adheziją su substratu (Gedzevičius, Valiulis 2003; Newbery, Grant 2000).



2 pav. Elektrolankinio terminio purškimo pistoleto struktūrinė schema (Bolot *et al.* 2008)

Fig. 2. Schematic of the wire – arc spray device (Bolot *et al.* 2008)

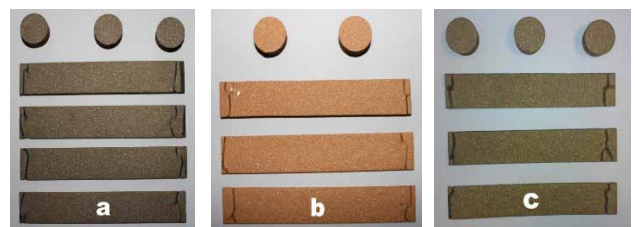
Išskiriami keli pagrindiniai elektrolankinio terminio purškimo pranašumai: tai labai našus procesas, kurio metu galima užpurkšti didelius plotus per trumpą laiko tarpą (Chen *et al.* 2009, 2015). Eksploatacijos išlaidos nedidelės, dangos būna stipresnės ir geriau sukibusios už dujiniu būdu užpurkštas dangas, nes purškiant dalelės įkaista iki aukštesnės temperatūros ir susidūrusios su gaminiu geriau prisivirina. Naudojant skirtingos sudėties vielas, galima gauti kompozicines pseudobemetes dangas. Purškimo procesą lengva robotizuoti, įrangos kaina nedidelė.

Pagrindiniai elektrolankinio terminio purškimo trūkumai yra šie: galima purkšti tik elektrai laidžias medžiagas; purškiant išdega dalis elektrodų vietoje esančių legiravimo elementų (pvz., anglies kiekis dangoje sumažėja 40–50 %, o silicio ir mangano – 10–15 %); medžiagą išpurškiant ir pernešant suslėgto oro srautu, išlydytos dalelės sąveikauja su jame esančiu deguonimi ir azotu, todėl susidaro oksidų ir nitridų, kurie patenka į užpurškiamąją dangą, taip susilpnindami mechanines dangų savybes. Purškiamoji medžiaga gali lengvai perkaisti, jei elektrodinės vielos tiekimo greitis yra mažas, o purškimo srovės didelės, taip danga lengvai oksiduojasi. Dangos pasižymi vidutiniu poringumu (Friesen 2010; Fauchais *et al.* 2014).

Elektrolankiniu būdu siekiama parinkti optimalų technologinį purškimo procesą ir gauti dangas, pasižyminčias gero mechaninėmis, fizikinėmis ir tribologinėmis savybėmis.

Ekspimentinių tyrimų metodika

Buvo purškama naudojant modifikuotą purškimo stendą „Castolin Eutectic EuTronic Arc“. Purškiant naudotas „EuTronic Arc Spray Gun 4“ pistoletas su 7 mm skersmens vidine kiauryme. Eksperimentų metu buvo naudojamos srovės iki 340 A (naudoti didesnes purškimo sroves 1,6 mm vielai netikslinga, nes procesas tampa nestabilus), įtampa – 33 V, elektros lanko išlydytomis dalelėmis pernešti naudotas suslėgtasis 5 MPa nusaustas oras. Visi parametrai purškiant buvo koreguojami neperžengiant ± 1 % ribų. Purkšta



3 pav. Elektrolankinio purškimo metu gautos dangos: a – 316 nerūdijančiojo plieno danga; b – CuAl8 bronzos danga; c – kombinuota 316 nerūdijančiojo plieno + CuAl8 danga

Fig. 3. Arc spraying coatings: a – 316 stainless steel; b – CuAl8 bronze coating; c – 316l stainless steel + CuAl8 coating

2–3 sluoksniais, kiekvieną sluoksną nupurkšti vidutiniškai trunka apie 2 minutes. Užpurškus sluoksnį daroma 5–10 minučių pertrauka, kad plokštelės atvėstų, o dengiamojo substrato temperatūra nesiektų 80 °C ribos. Užpurkštos dangos pavaizduotos 3 pav. Eksperimentai atlikti naudojant dvi skirtingas pilnavidures nerūdijančiojo plieno (AISI 316) ir jūrinės bronzos (CuAl8) vielas. Substratas – mažaauglis plienas S235J2 (LST EN 10025:2004).

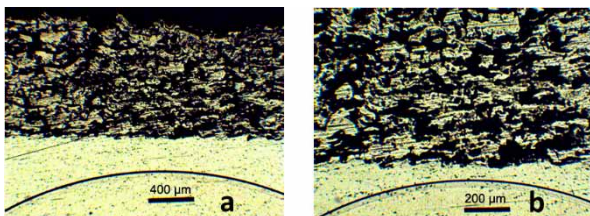
Sausosios trinties metu bandiniai trinami į besisukantį diską su abrazyvu, taip imituojant realias darbo sąlygas. Šis bandymas atliktas su trinties bandymo mašina 2120TPI. Išpjauti reikiamo dydžio bandiniai su danga pritvirtinami prie laikiklių, naudojamų trinties bandymo mašinoje. Naudojami trys skirtingo grūdėtumo abrazyviniai popieriai – 220, 120 ir 80 dalelių cm². Trinties apkrova – 10 N, bandinių masė svarstyklėmis matuojama atlikus bandymą po 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20 ir 30 minučių. Palyginus dangų svorį prieš ir po eksperimentų, daromos išvados apie dangos atsparumą sausajai trinčiai.

Užpurkštų dangų mikrostruktūrų analizė

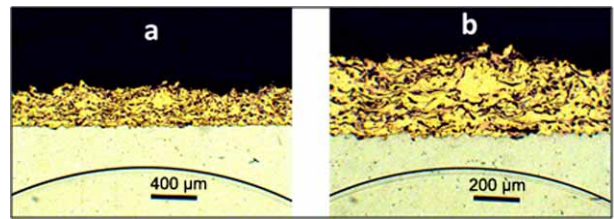
Plokštelės su dangomis supjaustytos į 2 mm storio bandinius, vėliau jos įlietos į epoksidinę dervą ir paruošti mikrošlifai. Bandiniai šlifuoti įvairaus grublėtumo abrazyviniu popieriumi (nuo 220 iki 2000 dalelių cm²) ir poliruojama 2/1 μm dydžio deimantine pasta. Užpurkštų dangų struktūra analizuota optinės mikroskopijos metodais. 316 nerūdijančiojo plieno mikrostruktūra pateikta 4 pav.

Išanalizavus nuotraukas su struktūromis matyti, kad gauta 316 nerūdijančiojo plieno danga nekokybiška, pasižymi dideliu porėtumu ir oksidų kiekiu. Galima daryti prielaidą, kad ši danga yra trapi ir netolygi. Vidutinis dangos storis – 860 μm. CuAl8 mikrostruktūra pavaizduota 5 pav.

Iš nuotraukų matyti, kad gauta CuAl8 danga yra kokybiškesnė nei 316 nerūdijančiojo plieno danga. Dangoje aptikta mažiau oksidų ir porų. Danga turėtų pasižymėti geromis antikorozinėmis savybėmis, nes varis ir aliuminis atsparus korozijai. Vidutinis dangos storis – 360 μm. 316 nerūdijančiojo plieno ir CuAl8 kombinuotos dangos mikrostruktūra parodyta 6 pav.

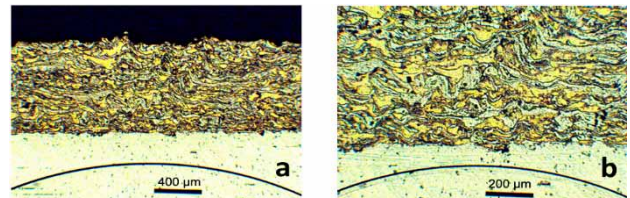


4 pav. 316 nerūdijančiojo plieno dangos mikrostruktūra: a – didinimas 50 kartų; b – didinimas 100 kartų
Fig. 4. The microstructure of 316 stainless steel coating: a – magnification 50; b – magnification 100



5 pav. CuAl8 bronzos dangos mikrostruktūra: a – padidinta 50 kartų; b – padidinta 100 kartų

Fig. 5. The microstructure of CuAl8 bronze coating: a – magnification 50; b – magnification 100



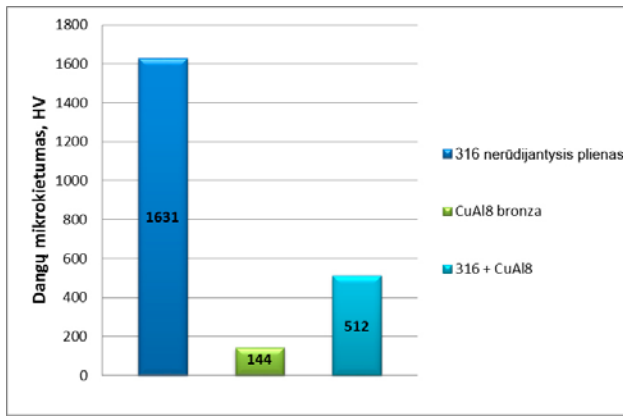
6 pav. 316 nerūdijančiojo plieno ir CuAl8 kombinuotos dangos mikrostruktūra: a – padidinta 50 kartų; b – padidinta 100 kartų

Fig. 6. The microstructure of 316 stainless steel and CuAl8 bronze coating: a – magnification 50; b – magnification 100

Gauta kombinuotos dangos (316+CuAl8) struktūra pasižymi mažiausiu porėtumu ir oksidų kiekiu. Suformuota danga glotniai priglundusi prie dengiamojo substrato. Vidutinis dangos storis – 785 μm.

Dangų mikrokietumo tyrimas

Kietumas – tai medžiagos geba, veikiant išorinėms jėgoms, priešintis kito, už jį kietesnio kūno įsmigimui, išspaudimui. Tamprumo modulis (Jungo modulis) – tai konstrukcinės medžiagos pastovioji, nusakanti medžiagos standumą ir rodanti jos gebą priešintis tampriajai deformacijai. Dėl formavimosi ypatumų ir plokštelinės struktūros terminio purškimo metu gautos dangos pasižymi anizotropinėmis savybėmis, kurios priklauso nuo matavimų krypties. Dangas sudaro daugybė ištiškusių ir sukietėjusių lašelių, suformavusių plokštelinę dangos struktūrą, kurioje yra oksidų intarpų, porų, nesubliūškusių dalelių ir vertikalių plyšių, todėl dangos pasižymi savybių anizotropija. Akivaizdu, kad, priklausomai nuo indentoriaus orientacijos, skirsis ir matavimo rezultatai. Spaudžiant indentorių lygiagrečiai su paviršiumi (pirmoji orientacija), didelė tikimybė, kad išpaudui įtakos turės tarplokštelinė zona, kurioje yra tuštumų ir oksidų sluoksnių, o, matuojant antrąja orientacijos kryptimi, reikia įvertinti vertikalius plyšius. Dėl dangos formavimosi ypatumų jos mechaninės savybės gali skirtis ir statmenai dangos paviršiui, einant nuo substrato plokštumos link dangos paviršiaus. Įvertinus šiuos ypatumus, mikrokietumo matavimai atlikti visame skerspjuvio plote. Matavimai atlikti su „Zwick/Roell“ prietaisu. Kietumas matuotas Knopo metodu, o gautos dangų kietumo reikšmės



7 pav. Vidutinės dangų mikrokietyumo reikšmės
Fig. 7. The average of coatings microhardness value

HK vienetais, konvertuojamos į HV dangų kietumo reikšmes. Dangų mikrokietyumas nustatytas, norint išsiaiškinti, kokią įtaką dangų tribologinėms savybėms turi dangos atskirų dalelių mikrokietyumas. Matuoti penki taškai lygiagrečiai su dangos paviršiumi ir penki taškai statmenai dangos paviršiui. Apkrova – 100 g, apkrovos trukmė – 10 s. Vidutinės dangų mikrokietyumo reikšmės pateiktos 7 pav.

Kietumas pagal Knopo metodą randamas pagal formulę (Trapaga 1991):

$$Hk = 14229 \frac{P}{a^2}, \quad (1)$$

čia Hk – mikrokietyumas, kg/mm^2 ; P – svoris, kuriuo spaudžiamas indentorius, g; a – didžioji išpaudo rombo įstrižainė, μm .

316 nerūdijančiojo plieno dangos vidutinis mikrokietyumas siekė 1631 HV, CuAl8 dangos 144 HV, o 316 nerūdijančiojo plieno kombinuotos kartu su CuAl8 bronzos dangos vidutinė mikrokietyumo reikšmė siekė 512 HV.

Dangų tamprumo modulis

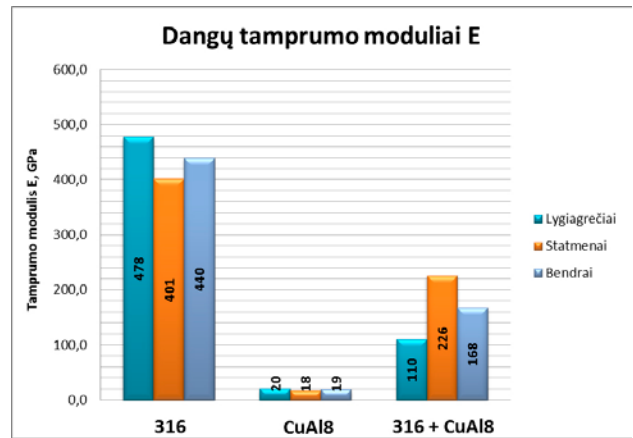
Tamprumo modulis E apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\frac{b}{a} \cong \frac{b}{a'} = \frac{b'}{a'} = \frac{\alpha Hk}{E}, \quad (2)$$

čia a – didžioji išpaudo rombo įstrižainė, μm ; b – mažoji išpaudo rombo įstrižainė, μm ; a' , b' – didžiosios ir mažosios indentoriaus įstrižainių ilgiai, μm ; α – konstanta; $\alpha = 0,45$; E – tamprumo modulis, kg/mm^2 .

Gauti tamprumo modulio E rezultatai pateikti 8 pav.

Dangose tamprumo modulis nustatytas visame skerspjuvio plote dviem kryptimis – vertikaliaja ir horizontaliaja substrato atžvilgiu. Matavimų reikšmės priklauso nuo matavimo krypties. Spaudžiant Knopo indentoriaus ilgąją įstrižainę lygiagrečiai su substrato paviršiumi, matavimo rezultatams daugiau įtakos turi tarpplokštelinės zonos,



8 pav. Vidutinės dangų tamprumo modulio E reikšmės
Fig. 8. The average of coatings modulus of elasticity value

kuriose yra oksidų ir porų. Spaudžiant ilgąją indentoriaus įstrižainę vertikaliai substrato atžvilgiu įvertinti dangoje esantys vertikalūs plyšiai. Matavimų rezultatai rodo, kad dangų tamprumo modulio reikšmės priklauso nuo purškimo metu dangose susiformavusių porų skaičiaus. Pastebėta, kad didelis porų skaičius, nustatant tamprumo modulio reikšmes, turi įtakos tiek matuojant paviršiu vertikaliai, tiek horizontaliai. Matuojant naudota 200 g apkrova, nes, naudojant mažesnes apkrovas, gauti nekorektiški išpaudai.

316 nerūdijančiojo plieno dangos vidutinė tamprumo modulio E reikšmė 439,7 GPa. CuAl8 bronzinės dangos – 18,9 GPa. Kombinuotos 316 nerūdijančiojo plieno ir CuAl8 dangos vidutinė tamprumo modulio reikšmė yra 167,8 GPa.

Dangos adhezijos ir kohezijos matavimas

Adhezijai arba kohezijai pamatuoti naudoti statinio tempimo bandymai. Bandiniai su užpurkštomis dangomis klijuojami prie metalinių laikiklių, kurie tvirtinami statinio tempimo staklėse. Prieš sukljuojant nuo bandinių paviršių pašalinami riebalai, abrazyvu nuvalomi nešvarumai. Bandiniai sukljuojami „Titan“ firmos epoksidinės dervos kljais. Gauti bandymo rezultatai pateikiami 1 lentelėje. Didžiausia veikianti jėga F (N) ir įtempiai nutraukimo metu (MPa) yra pagrindiniai adhezijos rodikliai, lemiantys adhezijos dydį dangose. 1 lentelėje nurodomas laikas ir poslinkis, per kurį danga nutrūko nuo substrato arba dangos atitrūko viena nuo kitos.

Iš gautų rezultatų matyti (2 lentelė), kad 316 nerūdijančiojo plieno dangos adhezija / kohezija yra prasčiausia, vidutiniškai ji siekė tik 2,3 MPa. Tokius prastus rezultatus lėmė didelis dangos porėtumas ir dangos nevienalytiškumas. CuAl8 dangos adhezijos rezultatai kur kas geresni. Adhezija / kohezija vidutiniškai siekė 16,49 MPa. Geriausi adhezijos / kohezijos rezultatai gauti kombinuotoje

1 lentelė. Tempimo bandymo rezultatai

Table 1. Tensile strength test results

Bandinys	Laikas, s	Apkrova, kN	Poslinkis, mm
316 nerūdijantysis plienas (1)	49	1,04	0,4
316 nerūdijantysis plienas (2)	26	1,21	0,19
CuAl8 bronzos (1)	117	7,16	1,00
CuAl8 bronzos (2)	91	9,01	0,77
316 + CuAl8 (1)	110	13,07	0,98
316 + CuAl8 (2)	107	12,99	0,95

2 lentelė. Adhezijos rezultatai

Table 2. Adhesion test results

Bandinys	Paviršiaus plotas, m ²	Jėga, N	Adhezija / kohezija, MPa
316 (1)	4,9·10 ⁻⁴	1044	2,13
316 (2)	4,9·10 ⁻⁴	1212	2,47
CuAl8 (1)	4,9·10 ⁻⁴	7156	14,60
CuAl8 (2)	4,9·10 ⁻⁴	9004	18,38
316 + CuAl8 (1)	4,9·10 ⁻⁴	13068	26,67
316 + CuAl8 (2)	4,9·10 ⁻⁴	12992	26,51

316 nerūdijančiojo plieno ir CuAl8 bronzos dangoje, jos dydis siekė net 26,59 MPa. Toliau pateikiamos bandinių nuotraukos (9–11 pav.) po atliktų bandymų.



9 pav. 316 nerūdijančiojo plieno bandiniai po statinio tempimo bandymo

Fig. 9. The specimens of 316 stainless steel coatings under static tensile testing

9 pav., a ir b, matyti, kad statinio tempimo bandymo metu dalis dangos atplyšo nuo klijuoto paviršiaus, o dalis išplyšo iš pačios dangos, tad šiuo bandymu buvo pamatuota ir adhezija, ir kohezija.



10 pav. CuAl8 bronzos bandiniai po statinio tempimo bandymo

Fig. 10. The specimens of CuAl8 stainless steel coatings under static tensile testing



11 pav. Kombinuotos dangos bandiniai po statinio tempimo bandymo

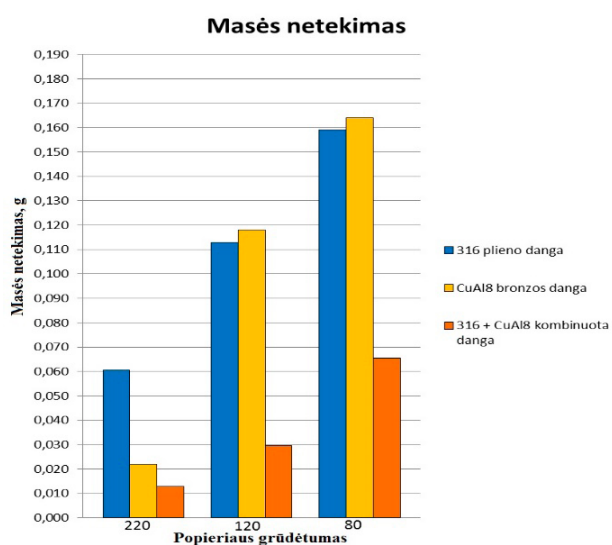
Fig. 11. The specimens of pseudo coatings under static tensile testing

10 pav., a, matyti, kad pusė bandinio paviršiaus išplyšo iš dangos, o kita pusė atplyšo nuo klijuoto paviršiaus. Paveikslo b dalyje matyti, kad šoninė dangos dalis atplyšo nuo klijuoto paviršiaus, o vidurys išplyšo iš pačios dangos, išmatuota 18,38 MPa dangos adhezija / kohezija.

11 pav., a, matyti, kad plyšo pati danga, pamatuota 26,67 MPa kohezija. 11 pav., b, matyti, kad danga atplyšo nuo bandinio paviršiaus, pamatavus 26,51 MPa adhezija.

Sausosios trinties bandymas

Sausosios trinties metu bandiniai trinami į besisukantį diską su abrazyvu, taip imituojant realias darbo sąlygas. Šis bandymas atliktas su trinties bandymo mašina 2120TII. Išpjauti reikiamo dydžio bandiniai su danga pritvirtinami prie laikiklių, naudojamų trinties bandymo mašinoje. Naudojami trys skirtingo grūdėtumo abrazyviniai popieriai – 220, 120 ir 80 dalelių cm². Trinties apkrova 10 N, bandinių masė svarstyklėmis matuojama atlikus bandymą po 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20 ir 30 minučių. Gauti rezultatai pateikti 12 pav.



12 pav. Dangų masės netekimas po 20 minučių trinties bandymo

Fig. 12. The coatings mass loss after 20 min experiment

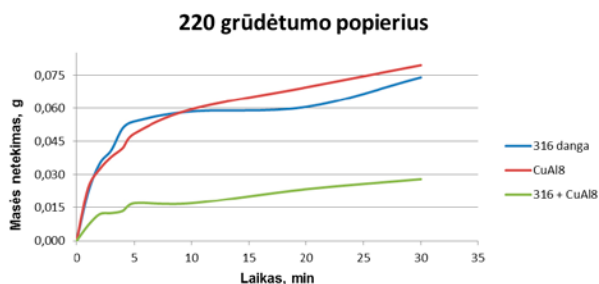
Atliekant bandymus pastebėta, kad CuAl8 bronzos danga neatspari sausajai trinčiai. Norint palyginti gautus rezultatus tarp skirtingų dangų optimali bandymo trukmė – 20 min. Atliekant tolimesnius trinties bandymus, pastebėta, kad CuAl8 danga visiškai pašalinama nuo substrato. Todėl duomenys grafikui visoms dangoms imti po 20 min. bandymo.

Naudojant 220 grūdėtumo popierių, labiausiai nudilo 316 nerūdijančiojo plieno dangos bandiniai. Galima daryti prielaidą, kad taip atsitiko todėl, kad danga buvo labai porėta, tokią dangą kur kas lengviau atplėšti nuo substrato. Naudojant 120 ir 80 grūdėtumo popierių, neatspariausia sausajai trinčiai buvo CuAl8 danga. Bandinys vidutiniškai prarado 165 g dangos svorio. Tokius prastus rezultatus lėmė mažas dangos kietumas. Ši danga neatspari sausajai trinčiai. Labiausiai dilimui atspari kombinuota danga. Dangos svorio netekimo rezultatai yra du kartus mažesni nei CuAl8 dangų.

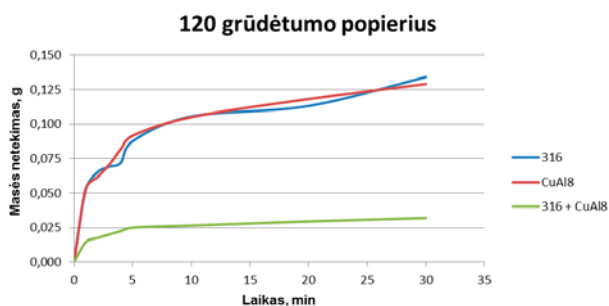
Tolesniuose grafikuose (13–15 pav.) matyti, kaip keitėsi bandinių masės netekimas bėgant laikui ir esant skirtingo grūdėtumo popieriams.

Iš 13 pav. matyti, kad 316 nerūdijančiojo plieno ir CuAl8 bronzos dangos nuo pat pradžių iki 5-os minutės neteko didelio dangos svorio, atliekant bandymus toliau ši tendencija išnyko ir svoris krito tolygiai. Kombinuota danga nuo pat bandymo pradžios iki pabaigos dilo pamažu.

Naudojant 120 grūdėtumo popierių iš 14 pav. matyti, kad 316 nerūdijančiojo plieno ir CuAl8 bronzos dangos nuo

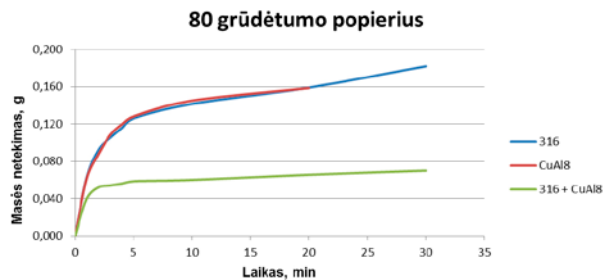


13 pav. Masės netekimas, naudojant 220 grūdėtumo popierių
Fig. 13. The mass loss, using 220 grain paper



14 pav. Masės netekimas, naudojant 120 grūdėtumo popierių
Fig. 14. The mass loss, using 120 grain paper

bandymo pradžios iki ~7 minutės dilo itin greitai. Tolimesni bandymai parodė, kad svorio netekimas sumažėja ir išlieka panašus, kaip ir naudojant 220 grūdėtumo šlifavimo popierių. Kombinuota danga dilo pastoviuoju nedideliu greičiu, pasižymėdama geru atsparumu sausajai trinčiai.



15 pav. Masės netekimas, naudojant 80 grūdėtumo popierių
Fig. 15. The mass loss, using 80 grain paper

Analogiška situacija nustatyta naudojant ir 80 grūdėtumo popierių. Analizuojant 15 pav. pastebėta, kad visais bandymais kombinuota 316 nerūdijančiojo plieno ir CuAl8 bronzos danga labiausiai dilo pirminėje dilimo stadijoje iki 5 minučių, o toliau dilo pastoviuoju nedideliu greičiu. Greitesnį dilimą pradžioje galima paaiškinti, kad paviršiuje susidarę mikronelygumai greičiau dyla sąveikaudami su abrazyvu.

Išvados

1. Nustatyta, kad užpurkšta nerūdijančiojo plieno danga pasižymi dideliu kietumu ir porų skaičiumi, todėl gali būti naudojama kuriant dilimui atsparius paviršius esant ribiniam (minimaliam) tepimui.
2. 316 nerūdijančiojo plieno dangos vidutinės mikrokietumo reikšmės yra 1630 HV matuojant lygiagrečiai su dangos paviršiumi ir 1602 HV matuojant statmenai dangos paviršiumi. Vidutinė tamprumo modulio E reikšmė yra 439,7 GPa. CuAl8 bronzinės dangos vidutinė mikrokietumo reikšmė yra 144 HV, matuojant lygiagrečiai su dangos paviršiumi ir 155 HV matuojant statmenai dangos paviršiumi. Vidutinė tamprumo modulio E reikšmė yra 18,9 GPa. 316 nerūdijančiojo plieno kombinuotos kartu su CuAl8 bronzos dangos vidutinė mikrokietumo reikšmė yra 512 HV matuojant lygiagrečiai su dangos paviršiumi ir 1011 HV matuojant statmenai dangos paviršiumi. Vidutinė tamprumo modulio reikšmė yra 167,8 GPa.
3. Užpurkštos bimetalės (*duplex*) 316 nerūdijančiojo plieno ir CuAl8 bronzos dangos turi dideles adhezijos reikšmes – 26,59 MPa. Nerūdijančiojo plieno dangos pasižymėjo blogiausiomis adhezijos reikšmėmis, jos vidutiniškai siekė 2,3 MPa.

4. CuAl8 danga gali būti naudojama įvairiems slydimo guoliams gaminti, nes vidutinis dangų porėtumas užtikrintų gerą tepamosios terpės buvimą tarp dviejų kūnų.
5. Gautoji bimetalė dviejų skirtingų sudedamųjų dalių danga pasižymi geromis tribologinėmis savybėmis, lyginant su kitomis dviem dangomis. Dilimo bandymais nustatyta, kad 316 nerūdijančiojo plieno ir CuAl8 bronzos dangų rezultatai blogiausi ir jos, kaip pavienės dangos, neatsparios sausajai trinčiai. Per 30 min., naudojant 120 grūdėtumo popierių, 316 nerūdijančiojo plieno danga vidutiniškai neteko 0,134 g, o CuAl8 bronzos danga – 0,129 g. Atspariausia sausajai trinčiai buvo kombinuotoji 316 nerūdijančiojo plieno ir CuAl8 bronzos danga. Ji vidutiniškai neteko tik 0,065 g savo svorio.

Literatūra

- Bolot, R.; Planche, M. P.; Liao, H.; Coddet, C. 2008. A three-dimensional model of the wire-arc spray process and its experimental validation, *Journal of Materials Processing Technology* 200(1–3): 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.08.032>
- Chen, Y.; Liang, X.; Liu, Y.; Xu, B. 2009. Numerical analysis of the effect of arc spray gun configuration parameters on the external gas flow, *Journal of Materials Processing Technology* 209(18–19): 5924–5931. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.07.009>
- Chen, S.; Xiang, J.; Huang, J.; Zhao, X. 2015. Microstructures and properties of double – ceramic – layer thermal barrier coatings of La₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O₇/8YSZ made by atmospheric plasma spraying, *Applied Surface Science* 340: 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.02.173>
- Davis, J. R. 2004. *Handbook of thermal spray technology*. ASM International, 47–59.
- Dorform, M. R. 2012. Thermal spray coatings, Chapter 19, in M. Kutz. *Handbook of environmental degradation of materials*. Elsevier, 569–590.
- Espallargas, N. 2015. *Future development of thermal spray coatings – types, designs, manufacture and applications*. Woodhead Publishing, 19–39.
- Fauchais, P.; Heberlein, J.; Boulos, M. 2014. *Thermal spray fundamentals*. From Powder to Part. NY USA: Springer, 1489–1550. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68991-3>
- Friesen, E. 2010. Analyse des Zusammenhangs zwischen Mikrostruktur und tribologischen Eigenschaften termisch gespritzter Verschleißschuttschichten, *Schriftenreihe Werkstoffe und werkstofftechnische Anwendungen* 19: 2–10.
- Gedzevičius, I.; Valiulis, A. V. 2003. Influence of the particles velocity on the arc spraying coating adhesion, *Materials Science* 9(4): 334–337.
- LST EN 10025:2004. *Karštai valcuoti konstrukcinio plieno gaminiai. 1 dalis. Bendrosios tiekimo sąlygos*. Lietuvos standartizacijos departamentas.
- Newbery, A. P.; Grant, P. S. 2000. Droplet splashing during arc spraying of steel and the effect on deposit microstructure, *Journal of Thermal Spray Technology* 9(2): 250–258. <https://doi.org/10.1361/105996300770350005>
- Planche, M. P.; Liao, C.; Coddet, C. 2003. Relationships between in-flight particle characteristics and coating microstructure with a twin wire arc spray process and different working conditions, *Surface and Coatings Technology* 182(2–3): 215–226. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00873-9](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00873-9)

THE RESEARCH OF PSEUDO COATINGS SPRAYED WITH ELECTRIC ARC SPRAY

T. Rodžianskas, O. Jarašiūnas, I. Gedzevičius, G. Mikalauskas, J. Gargasas, G. Viselga, I. Tetsman

Abstract

The paper presents coatings obtained using two different stainless steel (AISI 316) and marine bronze (CuAl8) wires sprayed with electric arc spraying. Substrate: mild steel S235J2 (LST EN 10025: 2004). Arc spray equipment – “EuTronic Arc Spray 4” with an additional power source. The main task was to select optimal technological spraying process and obtain coatings which possess the best mechanical, physical, tribological properties that meet the requirements of the specific requirements in service coatings. The microhardness, elastic modulus, and morphology was examined. Dry friction wear was assessed in the mass loss of the coatings. The results of tribological coatings properties were assessed in determining the mass lost.

Keywords: adhesion, abrasion resistance, coatings, arc spraying, marine bronze, stainless steel, microhardness, coating microstructure, tensile modulus.