



PURKŠTINIŲ NI-CR IR NI-CR-WC DANGŲ SAVYBIŲ TYRIMAS

Ovidijus JARAŠŪNAS¹, Olegas ČERNAŠĖJUS²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva
El. paštas: ¹o.jarasunas@gmail.com; ²olegas.cernasejus@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjamos liepsninio purškimo būdu ant konstrukcinio S235 plieno substrato užpurkštos Ni-Cr dangos. Substrato paviršiai prieš purškiant buvo apdoroti mechaniniu būdu. Naudojant skirtingos cheminės sudėties Ni-Cr ir Ni-Cr-WC purškimo miltelius ir papildomai pakaitinus substratą iki 250–290 °C temperatūros, buvo užpurkštos dangos. Darbe ištirta gautų Ni-Cr ir Ni-Cr-WC dangų mikrostruktūra, aktyumas, kietumas, tamprumo modulis ir atsparumas dilimui. Įvertinta dangų cheminės sudėties ir WC karbidų įtaka įvairioms dangų fizikinėms, tribologinėms savybėms, nustatytos šių dangų charakteristikų priklausomybės.

Reikšminiai žodžiai: konstrukcinis plienas, Ni-Cr ir Ni-Cr-WC dangos, liepsninis purškimas, aktyumas, atsparumas dilimui.

Įvadas

Terminio purškimo technologija yra vienas iš efektyviausių procesų, siekiant išvengti paviršiaus korozijos, oksidacijos, dilimo. Tai procesas, kai koncentruoto energijos šaltinio išlydyti maži skystos medžiagos lašeliai labai dideliu greičiu bloškiami ant medžiagos, kurią norima padengti (substrato), kristalizuojasi ir taip suformuoja paviršiuje dangą (Vilys *et al.* 2007). Šiuo būdu gaunamos įvairios dangos, kurios apsaugo dengiamą detalių paviršių nuo neigiamo aplinkos poveikio, pagerina jų eksploatacines savybes. Terminiškai purkštos dangos plačiai naudojamos aviacijoje, mašinų gamyboje, transporto detalėms restauruoti arba dengti, chemijos pramonėje, elektronikoje ir t. t. (Davis 2009). Svarbių detalių paviršiai terminio purškimo būdu gali būti dengiami metalų lydiniais, karbidais, metalų oksidais, metalų / keramikos mišiniais, siekiant suformuoti dilimui, korozijai ir oksidacijai atsparias dangas (Dorfman 2012).

Vienas iš seniausių ir plačiai taikomų terminio purškimo būdų yra liepsninis purškimas. Tai technologiškai nesudėtingas, pigus, kompaktiškas, universalus ir mobilus procesas, užtikrinantis aukštą našumą ir palyginti gerą dangos kokybę (Davis 2009). Purškiamoji medžiaga gali būti strypo, vielos arba miltelių pavidalo. Vielos arba strypelio gamyba iš kai kurių medžiagų yra labai brangus arba neįmanomas būdas, o, gaminant miltelių pavidalu, galima pagaminti bet kokios cheminės sudėties medžiagas. Taigi miltelinis liepsninis purškimas – vienas iš populiariausių terminio purškimo būdų. Šiuo būdu galima užpurkšti dangas iš daugelio medžiagų.

Vienas iš populiariausių ir plačiausiai taikomų liepsninio purškimo dangų yra nikelio pagrindo dangos. Nikelio pagrindo dangos efektyviausiai taikomos, kai reikalaujamas paviršiaus atsparumas dilimui esant korozijos terpei ir aukštatemperatūrei oksidacijai (Yu *et al.* 2016; Dong *et al.* 2015). Apsauginės nikelio pagrindo dangos labai paplito įvairiose pramonės srityse pirmiausia dėl išskirtinių paties nikelio savybių. Grynas nikelis yra tašus ir plastiškas, nes iki lydymosi taško (1453 °C) išlaiko kubinę centruotą paviršiaus gardelę, todėl tašus / trapus perėjimas nikelio lydiniams nebūdingas. Su daugeliu elementų nikelis sudaro kietąjį tirpalą ir gali ištirpinti jų daug ir įvairiais santykiais. Tai leidžia, keičiant legiravimo elementų kiekį ir santykį, varijuoti specialiąsias lydinų savybes plačiu diapazonu: pagerinti mechaninį atsparumą sustiprinant kietąjį tirpalą, suformuojant dispersines fazes ir kietuosius intarpus, taip pat pagerinti atsparumą korozijai ir aukštatemperatūrei oksidacijai. Dėl minėtų priežasčių nikelis yra puikus pagrindas apsauginėms dangoms kurti (Davis 2000; Škamat 2013).

Siekiant pagerinti purškiamų dangų savybes, į purškimo miltelius įmaišoma metalų karbidų (WC, TiC, VC, B₁₃C₂, SiC ir kt.), boridų (TiB₂), oksidų (CeO₂, La₂O₃, Y₂O₃, Al₂O₃ ir kt.) ir pan. (Cai *et al.* 2013; Serres *et al.* 2011; Praveen *et al.* 2015; Umanskii *et al.* 2015). Tyrimai rodo, kad volframo ir kitų metalų karbidai turi stiprų poveikį pirmiausia mechaniniam dangų atsparumui: padidėja kietumas, atsparumas dilimui. Dėl labai gerų vilgomųjų savybių nikelio pagrindo matricoje komerciniuose mišiniuose dažniausia naudojami volframo karbidai WC. Jų buvimas

matricoje taip pat skatina kietųjų fazių, tokių kaip NiB₃ arba M₆C, susidarymą (Serres *et al.* 2011; Martin *et al.* 2001; Niranatlumpong, Koiprasert 2011; Škamat 2013).

Pagrindinis šio tyrimo tikslas – ištirti liepsniniu būdu užpurkštų skirtingos cheminės sudėties Ni-Cr dangų ant konstrukcinio plieno S235 fizikines ir tribologines savybes: akytumą, kietumą, tamprumo modulį ir atsparumą dilimui. Palyginti Ni-Cr-WC dangų savybes su Ni-Cr dangomis.

Eksperimentinių tyrimų metodika

Dangos buvo purškiamos liepsniniu purškimo būdu ant S235 konstrukcinio plieno bandinių, kurių matmenys yra 160×30×8 mm. Liepsninio purškimo standas parodytas 1 pav. Tyrimo metu buvo naudojama komercinė liepsninio purškimo įranga Castolin Eutectic „ROTOTEC 80“.



1 pav. Liepsninio purškimo standas

Fig. 1. Stand of flame spraying

Buvo panaudoti komerciniai Ni-Cr pagrindo liepsninio purškimo milteliai, kurių cheminė sudėtis parodyta 1 lentelėje.

1 lentelė. Liepsninio purškimo miltelių cheminė sudėtis, masės %

Table 1. Chemical composition (in wt. %) of flame spray powder

Ni	Cr	Si	Fe	Al	C
Likutis	14–20	4–4,5	3–7	0,8–1,2	0,6–1

Siekiant pagerinti purškimo miltelių fizikines ir eksploatacines savybes, į komercinius standartinius miltelius skirtingomis proporcijomis buvo dedami volframo karbido (WC) milteliai. Tokiu būdu buvo gaunamos keturios skirtingos savo chemine sudėtimi dangos: standartinė Ni-Cr pagrindo danga, Ni-Cr danga su 10 % WC, Ni-Cr danga su 15 % WC ir Ni-Cr danga su 20 % WC. Bandinių žymenys, priklausomai nuo WC kiekio Ni-Cr dangoje, pateiktas 2 lentelėje.

2 lentelė. Bandinių žymenys

Table 2. Designation of samples

Miltelių cheminė sudėtis, %	Bandinio žymuo
100Ni-Cr	B0
90Ni-Cr–10WC	B1
85Ni-Cr–15WC	B2
80Ni-Cr–20WC	B3

Prieš liepsninį purškimą milteliai buvo gerai išmaišomi, esant staklių apsuokų skaičiui $n = 60 \text{ min}^{-1}$ ir trukmei 20 min. Purškimo milteliai taip pat buvo džiovinami elektrinėje krosnelėje 30 min. 350 °C temperatūroje.

Visų konstrukcinio plieno S235 bandinių paviršiai prieš liepsninį purškimą buvo apdoroti karpytos vielos (girgždais) srautu, laikantis standarto LST EN 14616:2005. Prieš purškiant konstrukcinio plieno plokštelės buvo pakaitintos acetileno ir deguonies neutralia liepsna iki 250–290 °C temperatūros, kai staklių apsuokų skaičius $n = 60 \text{ min}^{-1}$, o linijinis kaitinimo greitis $v = 0,046 \text{ m/min}$.

Pagrindiniai liepsninio purškimo parametrai buvo tokie: purškimo atstumas – 70 mm, liepsną formuojančios dujos – deguonis (4 bar) ir acetilenas (0,6 bar), purškimo ėjimų skaičius – 22, purškimo linijinis greitis – $v = 0,6 \text{ m/min}$, staklių apsuokų skaičius – $n = 768 \text{ min}^{-1}$.

Užpurkštų dangų mikrostruktūra buvo analizuojama stebint šlifuoatų ir poliruotų dangų skersinių mikrošlifų paviršius optiniu mikroskopu „Nicon Eclipse MA 200“. Taip pat buvo atlikta miltelių su volframo karbida mikrostruktūros analizė naudojant SEM JEOL JSM-7600F skenuojantįjį elektroninį mikroskopą su antrinių elektronų SE detektoriumi, didinant vaizdą 200 ir 5000 kartų. Elektroninės mikroskopijos parametrai: 15 kV įtampa, atstumas iki bandinio – 14,7 mm.

Liepsniniu būdu užpurkštų dangų akytumas buvo tiriama mikroskopiniu metodu, naudojant programinį paketą „Scion Image“. Juo buvo apdorotos optiniu mikroskopu gautos mikrostruktūros nuotraukos, padidinant 100 kartų.

Įvairių dangų kietumas buvo matuojamas Rokvelo matavimo prietaisu pagal HRB skalę, naudojant 1,6 mm skersmens rutuliuką. Dangų kietumas buvo perskaičiuotas į HV vienetus.

Dangų tamprumo modulis buvo nustatomas Knupo matavimo metodu, kai bandymo apkrova – 300 g, o bandymo trukmė – 15 s. Atliekant matavimus, indentoriaus įspaudu vietoje nustatomas dangos kietumas, pagal kurį apskaičiuojamas dangos tamprumo modulis E. Matuojant mikrokietumą Knupo metodu, indentoriaus įspaudu rombo įstrižainės yra skirtingos. Jų proporcijas lemia indentoriaus geometrija.

Įstrižainių ilgių santykis $b' / a' = 0,14$. Panaikinus apkrovą, tampriosios deformacijos sumažina įstrižainių įspaudų ilgį, bet didžiosios įstrižainės ilgio pokytis yra nedidelis, todėl laikoma, kad $a \cong a'$.

Kietumas pagal Knupo metodą nustatomas taikant šią formulę:

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

čia HK – mikrokietumas, kg/mm^2 ; P – svoris, kuriuo spaudžiamas indentorius, g; a – didžioji įspaudu rombo įstrižainė, μm .

Tamprumo modulis E apskaičiuojamas pagal tokią formulę (Gargasas *et al.* 2011):

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

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

Siekiant nustatyti užpurkštų dangų atsparumą dilimui buvo atliekamas bandymas specialiame stende. Tam buvo pritaikytos dviejų suklių plokščio poliravimo staklės „NLP 125“ ir iš aliuminio lydinio pagamintas specialus bandinio laikiklis su indu. Šiam bandymui buvo pasirinkta „ball on plate“ bandymo schema ir cirkonio oksido 5 mm skersmens rutuliukas. Eksperimentui buvo pasirinktas sausos trinties bandymas, kai vieno bandymo trukmė 60 min, o staklių apsisukimų skaičius $n = 200 \text{ min}^{-1}$. Taip pat bandymui buvo pasirinktos trys skirtingos apkrovos (12,5 N, 11,5 N ir 10,5 N).

Visi bandymai atlikti laikantis ASTM G-99 standarto reikalavimų. Atsparumas dilimui apskaičiuotas pagal masės nuostolius. Svėrimui naudotos elektroninės analitinės KERN 770-14 svarstyklės, matuojančios 0,1 mg tikslumu. Po kiekvieno dilimo bandymo plokštelė buvo nuvaloma oro srautu, kad būtų pašalinti visi nešvarumai. Prieš atliekant dilimo bandymą plokštelės buvo šlifuojamos abrazyvinėmis šlifavimo staklėmis 3F71, kad būtų sumažinta šiurkščio įtaka bandymo rezultatams. Šlifuočių bandinių šiurkštis buvo matuojamas profilometru 296 ir Ra siekė 0,7–1,5 μm .

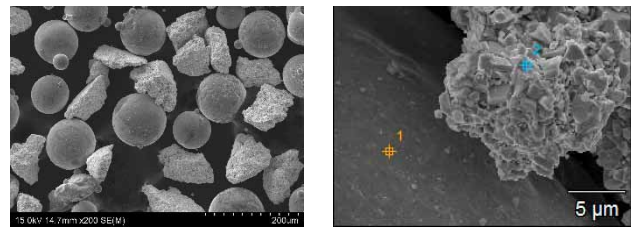
Eksperimentinių tyrimų rezultatai

Atlikus skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu Ni-Cr-WC miltelių analizę, nustatyta, kad purškimo miltelius sudaro skirtingos formos ir frakcijos dalelės (2 pav. a, b). Rentgeno mikroanalizės rezultatai parodė, kad apvalios formos dalelės yra Ni-Cr dalelės, o netaisyklingos formos dalelės yra WC.

Mikroskopiniu būdu tiriant liepsniniu būdu užpurkštas Ni-Cr ir Ni-Cr-WC dangas (B0-B3), nustatyta, kad užpurkšti dangos sluoksniai turi sluoksniuotą struktūrą su nemažu dangos akytumu, kuri būdinga liepsniniu būdu purkštoms dangoms (3 pav.).

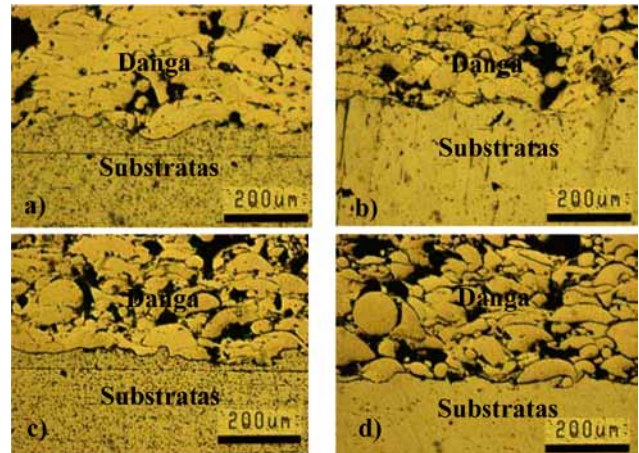
Pastebėta, kad vietomis tarp gerai išiškusių plokštelių dangoje matyti neišsilydžiusių ir savo pradinę formą išlaikiusių purškimo miltelių dalelių.

Analizuojant Ni-Cr ir Ni-Cr-WC dangų mikrostruktūras, pastebėta, kad Ni-Cr danga (B0) be WC pasižymi vientisesne mikrostruktūra, kurią sudaro nikelio kietasis tirpalas su dispersiniais karbidais (chromo karbidai ir kt.).



2 pav. Liepsninio purškimo miltelių mikrostruktūra, kai padidinta: a – $\times 200$ kartų; b – $\times 5000$ kartų

Fig. 2. Microstructure of flame spraying powder, when magnification: a – $\times 200$ times; b – $\times 5000$ times



3 pav. Užpurkštų dangų mikrostruktūra ($\times 100$): a – Ni-Cr (B0); b – 90Ni-Cr/10WC (B1); c – 85Ni-Cr/15WC (B2); d – 80Ni-Cr/20WC (B3)

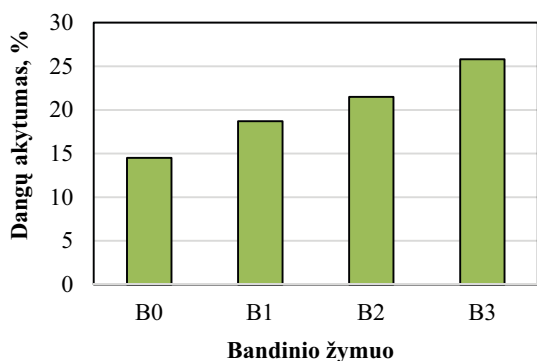
Fig. 3. Microstructure of sprayed coatings ($\times 100$): a – Ni-Cr (B0); b – 90Ni-Cr/10WC (B1); c – 85Ni-Cr/15WC (B2); d – 80Ni-Cr/20WC (B3)

Tačiau priešingai negu Ni-Cr dangos, Ni-Cr-WC dangos (B1–B3) pasižymi dideliu mikrostruktūros nevientisumu. Tai galėjo nulėmti didelis dangų akytumas ir dangos dalelių ištrupėjimas poliruojant. Analizė rodo, kad Ni-Cr-WC dangų (B1–B3) mikrostruktūrą sudaro Ni-Cr dangos struktūros fazės ir stambios WC dalelės.

Tiriant liepsniniu būdu užpurkštų dangų suludymo zonas, nustatyta, kad visuose bandiniuose dangos yra priglundusios prie substrato paviršiaus reljefo nelygumų, o sandūros linijos yra aiškiai matomos. Tikėtina, kad šioms Ni-Cr ir Ni-Cr-WC dangoms yra būdingas mechaninio sukibimo su substratu pobūdis. Pagrindiniai dangų sandūros srities defektai yra nedideli tarpeliai ir poros.

Tokios struktūriškai nevientisos Ni-Cr-WC dangos (B1–B3), nemažai aktytos, gali būti taikomos kuriant dilimui atsparius paviršius, esant ribiniam (minimaliam) tepimui.

Dangų akytumas buvo nustatytas analizuojant polirotų skersinių mikrošlifų vaizdus su „Scion Image“ programiniu paketu ir išreikštas kaip porų užimamo ploto ir viso analizuojamo mikrošlifo ploto santykis procentais. Dangų akytumo rezultatai pateikti 4 pav.



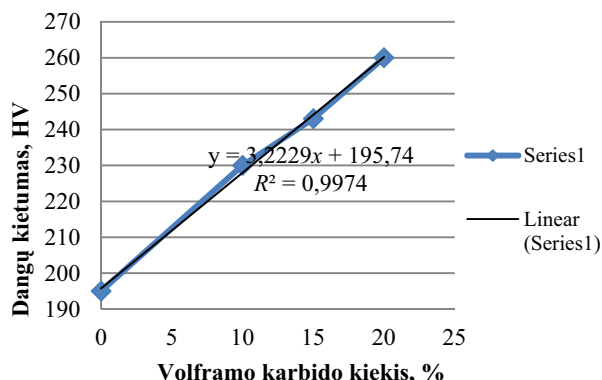
4 pav. Užpurkštų Ni-Cr ir Ni-Cr-WC dangų akytumas, %
Fig. 4. Porosity of Ni-Cr and Ni-Cr-WC sprayed coatings, %

Atlikus analizę, nustatyta, kad Ni-Cr dangos akytumas siekia 14,5 %.

Didžiausia akytumo reikšmė, kuri siekė beveik 25,8 %, buvo aptikta Ni-Cr dangoje su 20 % WC (B3). Mažiausia Ni-Cr-WC dangos akytumo reikšmė (18,7 %) nustatyta dangoje su 10 % WC (B1).

Taigi, atliekant eksperimentinius tyrimus, bandinio paviršiuje buvo gautos nevientisos dangos, kurių akytumas kinta nuo 14,5 iki 25,8 %. Tokios susidariusios paviršinės poros akytose dangose gali atlikti tepimo funkciją įvairiose tepimo terpėse ir apsaugo paviršių nuo dilimo (Davis 2009).

Ni-Cr ir Ni-Cr-WC dangų kietumo reikšmių priklausomybė nuo dangoje esančio volframo karbidų kiekio pateikta 5 pav. Iš grafiko matyti, kad, didinant WC kiekį Ni-Cr dangose, tolygiai didėja užpurkštų dangų kietumas. Eksperimentiniai duomenys buvo aproksimuoti tiesine funkcija, turinčia tokią išraišką: $y = 3,2229x + 195,74$, čia x – volframo karbido kiekis (masės procentais) Ni-Cr miltelių sudėtyje, o y – kietumas (HV). Determinacijos koeficiento R^2 reikšmė yra labai arti vieneto (0,9974). Tai rodo, kad ši tiesinė funkcija gali būti taikoma norint prognozuoti dangų kietumą esant kitoms Ni-Cr-WC purškimo miltelių sudėtims.

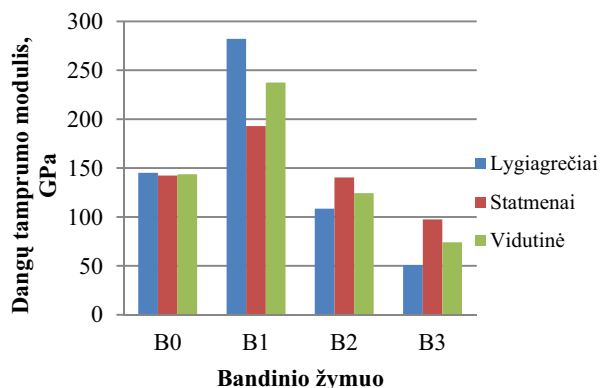


5 pav. Užpurkštų dangų kietumo priklausomybė nuo volframo karbido kiekio

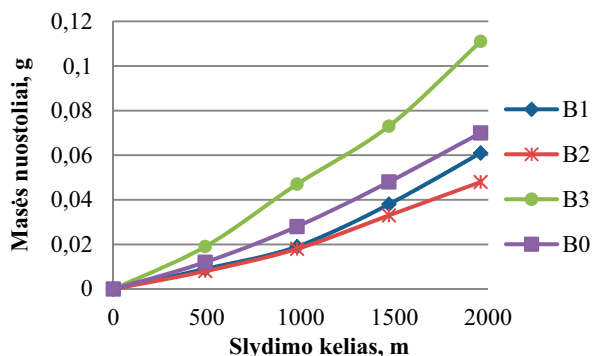
Fig. 5. Hardness of sprayed coatings dependence from content of tungsten carbide

Dangų tamprumo modulio matavimų rezultatai parodė, kad didžiausias tamprumo modulis 237,5 GPa nustatytas nikelio ir chromo dangoje su 10 % volframo karbidų, o mažiausias tamprumo modulis 74,2 GPa nustatytas nikelio ir chromo dangoje su 20 % volframo karbidų (6 pav.). Analizuojant Ni-Cr ir Ni-Cr-WC dangų tamprumo modulio matavimus pastebėta, kad Ni-Cr-10WC (B1) dangos tamprumo vidutinė reikšmė artima konstrukcinio plieno S235 ($E = 211$ GPa) tamprumo modulio reikšmei. Tai gali nulemti mažesnius vidinius dangos įtempius substrato sulydymo linijos srityje esant didelėms eksploatacinėms apkrovoms, veikiančioms statmenai paviršiui. Kitų dangų Ni-Cr, Ni-Cr-15WC, Ni-Cr-20WC (B0, B2, B3) tamprumo modulio reikšmės yra nuo 1,5 iki 2,8 karto mažesnės negu konstrukcinio plieno S235 tamprumo modulio reikšmė.

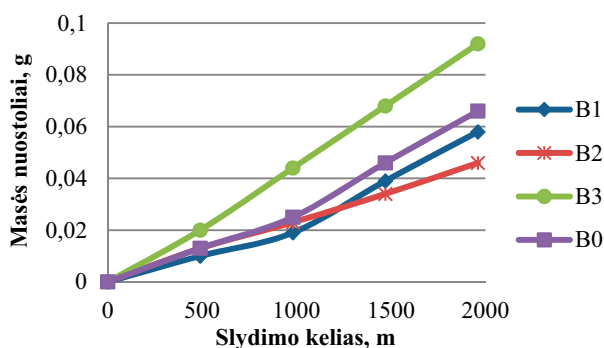
Atlikus užpurkštų Ni-Cr ir Ni-Cr-WC dangų dilimo bandymus ore, buvo nustatyti užpurkštų bandinių masės nuostoliai esant skirtingoms apkrovoms: 12,5 N, 11,5 N, 10,5 N (7–9 pav.). Rezultatai parodė, kad, esant skirtingoms dilimo bandymo apkrovoms, didžiausi masės nuostoliai užfiksuoti su Ni-Cr-20WC danga (B3). Tai galėjo nulemti didelis dangos trapumas ir blogas sukibimas tarp atskirų dangos dalelių. Tyrimų rezultatai parodė, kad, esant 12,5 N



6 pav. Užpurkštų dangų tamprumo modulis
Fig. 6. Elastic modulus of sprayed coatings

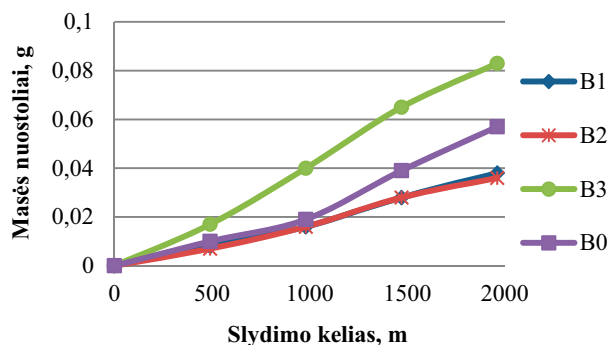


7 pav. Bandinių masės nuostoliai, kai apkrova 12,5 N
Fig. 7. Weight losses of samples, when the load of 12.5 N



8 pav. Bandinių masės nuostoliai, kai apkrova 11,5 N

Fig. 8. Weight losses of samples, when the load of 11.5 N



9 pav. Bandinių masės nuostoliai, kai apkrova 10,5 N

Fig. 9. Weight losses of samples, when the load of 10.5 N

apkrovai, Ni-Cr-10WC ir Ni-Cr-15WC dangos (B1 ir B2) yra atsparesnės dilimui negu Ni-Cr danga (B0). Bandymai rodo, kad esant 11,5 N apkrovai, Ni-Cr ir Ni-Cr-15WC dangos (B0 ir B2) dilo beveik vienodai, kai slydimo kelias buvo 1000 m (8 pav.). Tačiau po 2000 m slydimo kelio Ni-Cr danga (B0) dilo greičiau negu Ni-Cr-10WC ir Ni-Cr-15WC dangos (B1 ir B2). Eksperimentiniai dilimo tyrimai taip pat atskleidė, kad Ni-Cr-10WC ir Ni-Cr-15WC dangos (B1 ir B2) dilo identiškai ir yra atsparesnės dilimui ore nei Ni-Cr dangos (B0), kai dilimo apkrova buvo 10,5 N.

Išvados

Naudojant skirtingų proporcijų Ni-Cr ir WC mišinio purškimo miltelius ant mechaniškai apdoroto ir pakaitinto konstrukcinio plieno paviršiaus, liepsniniu purškimo būdu buvo suformuotos purkštinės dangos. Ištirta dangų mikrosuktūra, akytumas, kietumas ir atsparumas dilimui. Gauti rezultatai leidžia suformuoti tokias pagrindines išvadas:

1. Metalografinių tyrimų metu buvo nustatyta, kad užpurkštų Ni-Cr ir Ni-Cr-WC dangų sulydymo linijos yra be įtrūkių, tačiau dangos yra labai akytos. Mažiausias dangos akytumas nustatytas nikelio ir chromo dangoje (14,5 %) bei nikelio ir chromo dangoje su 10 % volframo karbidų (18,7 %). Nikelio ir chromo dangos su 20 % volframo karbidų akytumas yra didžiausias ir siekė 25,8 %.

2. Volframo karbidų įmaišymas į nikelio ir chromo liepsninio purškimo miltelius labai veikia bendrą dangos kietumą. Bandymais nustatyta, kad didžiausias dangos kietumas (260 HV) buvo gautas su nikelio ir chromo danga, turinčia 20 % volframo karbidų.
3. Dangų tamprumo modulio rezultatai parodė, kad didžiausias tamprumo modulis (237,5 GPa) nustatytas dangoje su 10 % volframo karbidų, o mažiausias tamprumo modulis (74,2 GPa) dangoje su 20 % volframo karbidų.
4. Atlikus atsparumo dilimui bandymą, nustatyta, kad nikelio ir chromo danga su 15 % volframo karbidų yra atsparesniausia dilimui, o nikelio ir chromo danga bei nikelio ir chromo danga su 20 % volframo karbidų yra mažiausiai atspari dilimui. Nikelio ir chromo dangos su 10 % volframo karbidų atsparumas dilimui nedaug skyrėsi nuo nikelio ir chromo dangos su 15 % volframo karbidų.
5. Atlikus liepsninio purškimo būdu suformuotų nikelio ir chromo dangų su volframo karbidais fizikinių ir tribologinių savybių tyrimus, nustatyta, kad optimalus volframo karbidų kiekis dangoje yra 10–15 %.

Literatūra

- Cai, B.; Tan, Y.-f.; Tan, H.; Jing, Q.-f.; Zhang, Z.-w. 2013. Tribological behavior and mechanism of NiCrBSi-Y₂O₃ composite coatings, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 23(7): 2002–2010. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62689-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62689-8)
- Davis, J. R. 2000. *Nickel, cobalt and their alloys*. ASM Specialty Handbook. Materials Park: ASM International. 442 p.
- Davis, J. R. 2009. *Handbook of thermal spray technology*. Materials Park (Ohio): ASM International. 338 p.
- Dong, S.; Song, B.; Liao, H.; Coddeta, Ch. 2015. Deposition of NiCrBSi coatings by atmospheric plasma spraying and dry-ice blasting: Microstructure and wear resistance, *Surface and Coatings Technology* 268: 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.09.025>
- Dorfman, M. R. 2012. Thermal spray coatings, in *Handbook of environmental degradation of materials*. 2nd ed. Elsevier, 569–596. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4377-3455-3.00019-5>
- Gargasas, J.; Gedzevičius, I.; Nagurnas, S. 2011. Terminiškai purkštų dangų tyrimas ultragarsiniais metodais, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 3(6): 75–78.
- LST EN 14616:2005. *Terminis purškimas. Terminio purškimo rekomendacijos*. Lietuvos standartizacijos departamentas. 22 p.
- Martin, A.; Rodríguez, J.; Fernández, J. E.; Vijande, R. 2001. Sliding wear behaviour of plasma sprayed WC-NiCrBSi coatings at different temperatures, *Wear* 251(1–12): 1017–1022. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00703-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00703-7)
- Niranatlumpong, P.; Koiprasert, H. 2011. Phase transformation of NiCrBSi-WC and NiBSi-WC arc sprayed coatings, *Surface and Coatings Technology* 206: 440–445. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.07.057>

- Praveen, A. S.; Sarangan, J.; Suresh, S.; Siva Subramanian, J. 2015. Erosion wear behaviour of plasma sparyed NiCrSiB/ Al_2O_3 composite coating, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 52: 209–218.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2015.06.005>
- Serres, N.; Hlawka, F.; Costil, S.; Langlade, C.; Machi, F. 2011. Microstructures and mechanical properties of metallic NiCrBSi and composite NiCrBSi–WC layers manufactured via hybrid plasma/laser process, *Applied Surface Science* 257(12): 5132–5137.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.11.062>
- Škamat, J. 2013. *Vibracinio apdorojimo poveikis purkštųjų nikelio pagrindo dangų struktūrai ir savybėms*: daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 100 p.
- Umanskii, A. P.; Storozhenko, M. S.; Hussainova, I. V.; Terentiev, A. E.; Kovalchenko, A. M.; Antonov, M. M. 2015. Structure, phase composition, and wear mechanisms of plasma sprayed NiCrSiB-20 wt.% TiB_2 coating, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* 53(11): 663–671.
<https://doi.org/10.1007/s11106-015-9661-3>
- Vilys, J.; Tamulevičius, S.; Grigaliūnas, V.; Meškiniš, Š.; Guobienė, A. 2007. *Paviršiaus inžinerija ir nanotechnologijos*: mokomoji knyga. Kaunas: Vitae litera. 225 p.
- Yu, H. L.; Zhang, W.; Wang, H. M.; Yin, Y. L.; Ji, X. C.; Zhou, K. B. 2016. Comparison of surface and cross-sectional micro-nano mechanical properties of flame sparyed NiCrBSi coating, *Journal of Alloys and Compounds* 672: 137–146.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.02.118>

INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF SPRAYED NI-CR AND NI-CR-WC COATINGS

O. Jarašūnas, O. Černašėjus

Abstract

The article deals with the flame sprayed Ni-Cr and Ni-Cr-WC coatings on construction S235 steel substrates. Before spraying, the surfaces of substrates were treated mechanically. Using the different chemical composition of Ni-Cr and Ni-Cr-WC spraying powder and additional substrate heating till 250–290 °C, were sprayed coatings. The microstructure, porosity, hardness, elastic modulus, wear resistance of the Ni-Cr and Ni-Cr-WC coatings were investigated in the work. The influence of the chemical composition and WC content of the coatings on the various physical and tribological properties of the coatings were evaluated. Also the dependence of these coatings characteristics was investigated.

Keywords: construction steel, Ni-Cr and Ni-Cr-WC coatings, flame spray, porosity, wear resistance.