



PLAZMINIO PURŠKIMO PROCESŲ TYRIMAS BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODU

Raimonda LUKAUSKAITĖ¹, Jonas GARJONIS², Olegas ČERNAŠĖJUS³

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹raimonda.lukauskaite@vgtu.lt; ²jonas.garjonis@pbs.lt; ³olegas.cernasejus@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjami fizikiniai procesai, vykstantys plazminio purškimo metu. Taikant baigtinių elementų metodą, skaitinio modeliavimo metu buvo nustatytas plazmos lanko įtampos ir srovės tankio pasiskirstymas plazmos sraute. Panaudojant eksperimentinių rezultatų duomenis, buvo įvertinta reali elektros lanko anodo dėmės padėtis plazminio purškimo procese. Buvo apskaičiuotos elektromagnetinių Lorencio jėgų reikšmės ir nustatyta jų įtaka plazmos srautui. Taikant dvisluoksnės aplydytos nikelio dalelės modelį, buvo imituojamas dalelės kontaktas su substratu purškiant.

Reikšminiai žodžiai: plazminis purškimas, fizikiniai procesai, baigtinių elementų metodas, dalelės kontaktas.

Įvadas

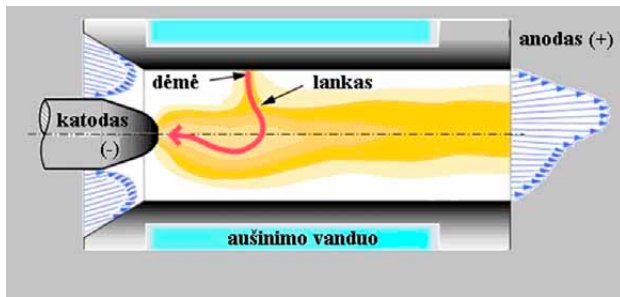
Nuolatinės srovės plazmos lankas yra plačiai naudojamas pramonėje: plazminiam purškimui; dalelių sintezei; metalams suvirinti ir pjauti; metalurgijoje; atliekų apdorojimo srityje; biodujų gavyboje. Ši plazmos technologija leidžia valdyti šiluminius, cheminius ir elektrinius procesus. Ja galima modifikuoti arba apdoroti medžiagą, to dažnai negalima padaryti naudojant kitą įrangą (Trelles *et al.* 2009, 2006; Huang *et al.* 2013).

Plazminis purškimas taikomas nusodinant metalų, keramikos, polimerų ir kompozicines dangas. Pastaruoju metu tokios dangos naudojamos automobilių ir dujų turbinų detalėse, celiuliozės ir popieriaus pramonėje, plieno pramonėje, biomedicinos implantuose, elektros energijos gamyboje, aeronautikoje ir t. t. (Mariaux, Vardelle 2005; Guo *et al.* 2015; Bobzin *et al.* 2011). Nepaisant plazminio purškimo universalumo, platesnį jo pritaikomumą labai riboja plazmos srauto degimo proceso nestabilumas. Pagrindinis veiksnys, ribojantis plazmos degimo proceso stabilumo užtikrinimą, yra žinių trūkumas apie lanko dinamiką purškimo srauto viduje ir erozijos proceso įtaką anodo vidiniam paviršiui, veikiant plazmos srautui (Selvan *et al.* 2010; Moreau *et al.* 2006; Huang *et al.* 2012). Nors plazminis purškimas žinomas kaip viena iš pagrindinių dangų formavimo technologijų, tačiau temperatūros ir greičio svyravimai plazmos sraute dėl lanko dinamikos plazmotrono viduje gali neišlydyti purškiamų dalelių ir taip sumažinti purškimo proceso efektyvumą bei dangos kokybę. Šie reiškiniai daugiausiai yra susiję su elektrinio lanko dėmės judėjimu

plazmotrono anodo sienelėmis. Šis elektrinio lanko dėmės judėjimas lemia lanko ilgio svyravimus, kurie daro įtaką lanko įtampos svyravimams, šilumos mainams procese, plazmos srauto nestabilumui ir elektrodų tarnavimo laikui. Taigi, labai svarbu suprasti fizikinius procesus, vykstančius plazmos sraute, siekiant pagerinti plazminio purškimo proceso efektyvumą (Selvan, Ramachandran 2009; Mariaux, Vardelle 2005; Bobzin *et al.* 2011).

Nuolatinės srovės plazmos lanką sudaro trys pagrindinės dalys: katodinė sritis, jonizuotų dujų srautas ir anodinė sritis. Plazmotrono viduje plazmą formuojančių (darbinių) dujų srautas „apiplauna“ volframinį katodą ir išeina pro varinį anodo antgalį, kuris aušinamas vandeniu. Įprastai plazmos srautas formuojamas naudojant didelės įtampos impulsą (išlydį), kuris sukuria elektros lanką tarp katodo ir anodo. Darbinės dujos elektriniu lanku yra įkaitinamos iki aukštos temperatūros (didesnės kaip 10 000 °K), disocijuoja, jonizuojasi ir formuoja plazmos srautą (1 pav.) (Li, Pfender 2007; Alaya *et al.* 2015).

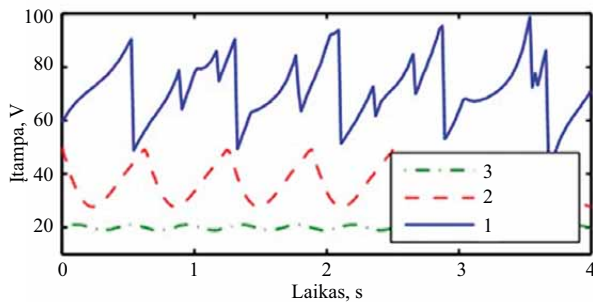
Nustatyta, kad lanko ilgis yra proporcingas lanko įtampos dydžiui. Lanko įtampos pokyčių per tam tikrą laiką nustatymas leidžia geriau suprasti dinaminį procesų eigą plazmos sraute. Lanko anodinės dėmės padėtis nuolatinės srovės plazmos sraute gali būti nustatoma pagal Steenbeck's minimumų principą (minimalios lanko įtampos arba minimalios entropijos). Kai kurie mokslininkai taiko dar ir terminio efektyvumo kriterijų, kuris lemia lanko ilgį (Trelles *et al.* 2006; Selvan, Ramachandran 2009).



1 pav. Nuolatinės srovės lanko plazmos srautas
(šaltinis: Trelles *et al.* 2009)

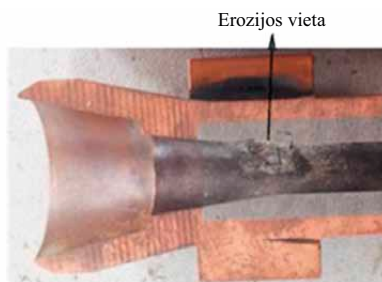
Fig. 1. DC arc plasma flow (source: Trelles *et al.* 2009)

Lanko elgsena plazmos sraute pagal įtampos svyravimo pobūdį leidžia identifikuoti tris skirtingus proceso degimo režimus, jie yra tokie: statinis (*steady*), dinaminis (*takeover*) ir pasikartojančio uždegimo (*restrike*) (Selvan *et al.* 2010; Alaya *et al.* 2015). Statiniam plazmos degimo režimui būdingas nežymus lanko įtampos svyravimas ir nejudanti lanko dėmė anodo paviršiuje (2 pav. 3 kreivė). Šis režimas nėra pageidaujamas atliekant terminį purškimą dėl greito anodo paviršiaus suardymo (3 pav.).



2 pav. Plazmos degimo proceso elektrinio lanko įtampos svyravimai: 1 – pasikartojančio uždegimo režimas; 2 – dinaminis režimas; 3 – statinis režimas
(šaltinis: Trelles *et al.* 2006)

Fig. 2. Variations in the voltage of the electric arc of the plasma combustion process: 1 – restrike mode; 2 – takeover mode; 3 – steady mode (source: Trelles *et al.* 2006)



3 pav. Susidėvėjusio anodo skersinis pjūvis
(šaltinis: Guo *et al.* 2015)

3. Fig. The used cross-section of an anode
(source: Guo *et al.* 2015)

Dinaminiam plazmos degimo režimui būdingas periodinis arba kvaziperiodinis lanko ilgio ir įtampos svyravimas (2 pav. 2 kreivė). Šis režimas yra labai pageidautinas plazminio purškimo procese, tačiau taikant šį režimą gali būti pasiektos tik vidutinės srovės ir vidutiniai plazmos srauto greičiai. Dinaminis plazmos degimo režimas leidžia tolygiau paskirstyti šilumą anodo paviršiuje. Šis režimas gali būti pasiektas taikant sūkurinį plazmą formuojančių dujų padavinį ir esant nuolatiniam lanko anodinės dėmės judėjimui anodo paviršiumi. Plazmos proceso pasikartojančio uždegimo režimą charakterizuoja dideli kvaziperiodiniai įtampos svyravimai esant labai nestabiliam lanko elgsenai (2 pav. 1 kreivė). Šis režimas būdingas terminiam purškimui nuolatinė srove. Visi šie 3 plazmos srauto degimo režimai yra taikomi šiluminiam proceso parametrui arba plazmos srauto greičiui keisti (Trelles *et al.* 2006; Bolot *et al.* 2011).

Vykstant plazminiam purškimui, milteliai yra paduodami į karštą dujų plazmą, kur jie yra aplydomi arba išlydomi iki skystosios būsenos, ir dideliu greičiu, per kelias milisekundes, blokškiami ant paruošto substrato paviršiaus. Taip yra formuojama danga, turinti lamelinę mikrostruktūrą (Huang *et al.* 2013; Bobzin *et al.* 2011).

Šiuo metu atliekama daug mokslinių tyrimų tam, kad būtų pasiektas stabilus plazmos degimo režimas ir užtikrinta ilgesnė anodo eksploataavimo trukmė nuolatinės srovės plazmotrone. Didelių dėmesį tyrėjai skiria plazmos proceso tyrimams plazmotrono viduje. Tyrimai atliekami eksperimentiniais ir skaitiniais metodais. Eksperimentiniai metodai leidžia tirti plazmos lanko pokyčius ir geriau suprasti jų priklausomybę nuo srauto geometrijos ir proceso darinių parametrų. Tačiau eksperimentinius tyrimus riboja didelė įrangos kaina ir sudėtingas plazmos srauto vidinių parametrų registravimas. Kaip alternatyva eksperimentiniams tyrimams yra taikomas skaitinis modeliavimas, kuris yra efektyvus būdas tirti plazminį purškimą, ypač nagrinėjant lanko elgseną, šilumos mainus plazmos sraute, lanko elektrinius ir magnetinius reiškinius bei purškiamos medžiagos dalelių pernešimo procesus (Selvan *et al.* 2010; Chen, Li 2003). Taigi, modeliavimas yra ekonomiškai nebrangus būdas lyginant su eksperimentiniais tyrimais, bet gaunama didesnė rezultatų paklaida (Guo *et al.* 2015). Tiek eksperimentiniai, tiek skaitinio modeliavimo darbai, tiriantys plazmos procesų įtaką purškiamų miltelių dalelės elgsenai ir dangos formavimui, rodo, kad stabilus plazmos lanko degimo režimas užtikrina geresnę dangos kokybę (mažesnis porėtumas, mažesnis neišlydytų dalelių kiekis ir didesnis dangos nusodinimo efektyvumas) (Moreau *et al.* 2006).

Tyrimų metodika

Plazmos srauto skaičiavimai. Taikant baigtinių elementų metodą ir naudojant keturkampius elementus, buvo sudarytas plazmos srauto erdvinis modelis (4 pav.). Skaičiavimams taikytas matematinio modeliavimo programinis paketas ANSYS. Skaičiuojant fizikinius procesus, vykstančius plazminio purškimo metu, buvo įvertinta argono plazmos fizinių savybių priklausomybė nuo temperatūros (1 lentelė). Modeliuojant buvo laikoma, kad plazmos lanko įtampa yra 50 V, pradinė plazmos lanko temperatūra 15 000 °K, o santykinė magnetinė skvarba lygi 1.

Tiriant elektrinius reiškinius, vykstančius plazmos lanko, buvo taikomas analitinis skaičiavimo metodas. Taikant Omo dėsnį buvo nustatytas lanko įtampos ir srovės tankio pasiskirstymas plazmos sraute.

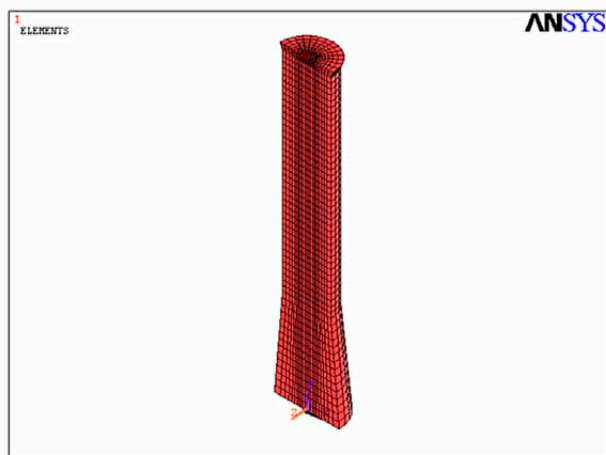
Pagal Omo dėsnį:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{(V_2 - V_1)}{R}, \quad (1)$$

čia $(V_2 - V_1)$ – plazmos lanko įtampos potencialų skirtumas, I – srovė, R – elektrinė varža.

Plazmos lanko elektrinė varža (R):

$$R = \rho \int \frac{dL}{A}. \quad (2)$$



4 pav. Plazmos srauto erdvinis modelis, sudarytas iš BEM keturkampių elementų

Fig. 4. A spatial model for plasma flow made of FEM square elements

Elektros laidininko magnetinių laukų uždaviniui spręsti taikomos potencialų funkcijos. Galimos dvi potencialų funkcijos: magnetinis vektorinis potencialas ir magnetinis skaliarinis potencialas. Jų pasirinkimas priklauso nuo magnetinių laukų dinamikos, laukų dydžių, srovės šaltinio konfigūracijos ir tiriamosios srities matmenų.

Vektorinis potencialas taikomas modeliuojant dvimačius ir trimačius elektromagnetinius laukus. Skaičiuojant statinius ir dinامينius plazmos srauto magnetinius laukus buvo taikomos Maksvelo lygtys:

$$\nabla \times \{H\} = \{J\}, \quad (3)$$

$$\nabla \times \{E\} = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \{B\} = 0, \quad (5)$$

čia $\{H\}$ – magnetinio lauko stiprio vektorius, $\{J\}$ – srovės tankio vektorius, $\{E\}$ – elektrinio lauko stiprio vektorius, $\{B\}$ – magnetinės indukcijos vektorius.

Magnetinės jėgos, atsirandančios srovei tekant laidininko skerspjūviu, buvo nustatomos pagal tokią formulę:

$$\{F^{jb}\} = \int_V \{N\}^T (\{J\} \times \{B\}) d(V), \quad (6)$$

čia $\{N\}$ – formos funkcijos vektorius.

Terminio purškimo plazmos srauto dinamika buvo aprašoma diferencialinėmis lygtimis, įvertinančiomis jėgų (slėgimo ir elektromagnetinės jėgos), veikiančių plazmos srautą, pasiskirstymą. Taikant Navje ir Stokso lygtis nustatytas svarbiausių plazmos srautą veikiančių jėgų poveikis.

Plazmos srauto judėjimo impulso lygtis, įvertinus rotacinę koordinatinių sistemą, transformuojama į vektorinę formą:

$$\rho \frac{D\{v\}}{Dt} + 2\rho\{\omega\} \times \{v\} + \rho\{\omega\} \times \{\omega\} \times \{r\} = \rho\{g\} - \nabla P + \mu \nabla^2 \{v\}, \quad (7)$$

čia $\{v\}$ – greičio vektorius rotacinėje koordinatinių sistemoje, μ – srauto klampis, P – slėgis, ρ – medžiagos tankis, $\{g\}$ – pagreičio vektorius, $\{r\}$ – srauto tūrio vietos vektorius rotacinės koordinatinių sistemos atžvilgiu, $\{\omega\}$ – koordinatinių sistemos kampinio greičio vektorius.

1 lentelė. Argono plazmos fizinių charakteristikų priklausomybė nuo temperatūros

Table 1. The dependence of the physical characteristics of argon plasma on temperature

Temperatūra, °K	5000	6000	7500	10 000	12 500	15 000
Tankis, kg/m ³ ×10 ⁻¹	0,9733	0,811	0,6484	0,4757	0,333	0,2054
Šiluminis laidumas, W/m×°K	0,13	0,16	0,20	0,52	2	3
Šiluminė talpa, J/kg×°K	520,8	525,6	597,6	1724	6393	8734
Klampus, kg/m×s×10 ⁻⁴	0,184	0,209	0,2445	0,29	0,213	0,711
Specifinė elektrinė varža, Ω×m×10 ⁻¹	0,2	0,025	0,0143	0,00333	0,002083	0,001666

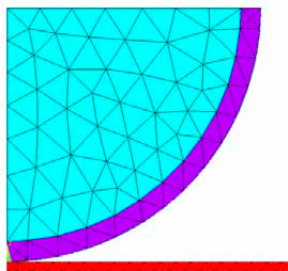
Dalelės kontakto parametrų skaičiavimai. Buvo sukurtas dalelės kontakto su substratu skaitinis skaičiavimo modelis. Skaičiavimams pasirinktas baigtinių elementų metodas ir programa ANSYS.

Skaičiavimams buvo sukurtas paprogramis. Optimizuotas pradinių duomenų įvedimas ir automatizuotas skaičiavimų rezultatų gavimas.

Paprogramyje buvo sukurtas deformuojamos dalelės su ketvirčio sluoksniu ir nedeformuojamo substrato geometrinis modelis (5 pav.). Dalelės išorinio sluoksnio storis buvo kintamas ir priklausė nuo purškiamos dalelės įkaitimo proceso imitacijos. Dalelės branduolio ir išorinio sluoksnio medžiagų savybės buvo nustatomos parenkant pradinis duomenis (2 lentelė). Dalelės vertikali ašis buvo įtvirtinama nejudamai, o keičiamas tik dalelės suspaudimo laipsnis, didinant horizontalios ašies poslinkį.

2 lentelė. Nikelio purškiamos dalelės savybės
Table 2. Properties of the sprayed nickel particle

Savybės	Išorinio sluoksnio	Branduolio
Temperatūra, °K	1700	1500
Tamprumo modulis, MPa	935	500
Puansono koeficientas	0,31	0,31



5 pav. Purškiamos nikelio dalelės geometrinis ir baigtinių elementų modelis

Fig. 5. The geometric and finite element model for the sprayed nickel particle

Modelio validavimas buvo atliktas pagal analitinį sprendinį, kur pasirinktas vienalytės dalelės kontaktas su substratu. Buvo lyginamos jėgos, kontakto slėgio ir kontakto ploto reikšmės pagal Hertz formules.

Jėgos formulė:

$$F = \frac{4}{3} \times K \times R^2 \times h^{\frac{3}{2}}, \quad (8)$$

čia R – sferos spindulys, h – horizontalios linijos, einančios per sferos centrą, poslinkis, K – efektyvusis sferos tamprumo modulis, E – tamprumo modulis, ν – puansono koeficientas.

$$\frac{1}{K} = \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2}.$$

Kontakto plotas:

$$a = \left(\frac{3FR}{4K} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (9)$$

Kontakto slėgis:

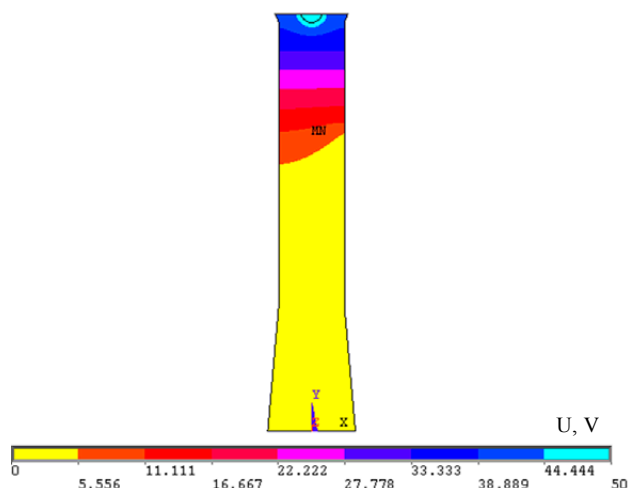
$$P_0 = \frac{3F}{2\pi a^2}. \quad (10)$$

Tyrimų rezultatai

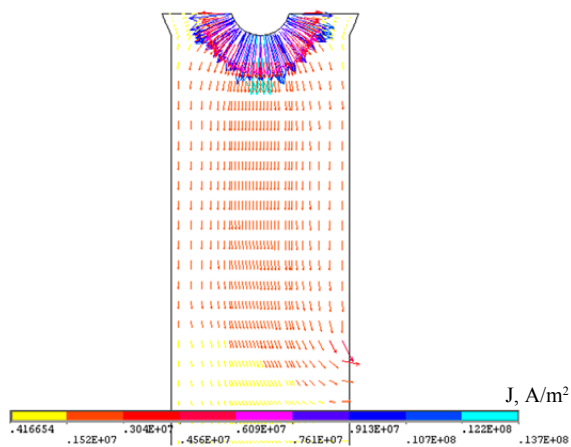
Nuolatinės srovės lanko plazmos modeliavimas yra sudėtingas uždavinys, nes plazmos srautas iš prigimties yra trimatis, dinaminis, netiesinis ir turi didelius savybių reikšmių gradientus.

Taikant baigtinių elementų metodą ir įvertinant plazmos srauto savybių (šiluminio laidumo, šiluminės talpos ir specifinės elektrinės varžos) priklausomybę nuo temperatūros, buvo nustatytas plazmos lanko įtampos ir srovės tankio pasiskirstymas plazmos sraute. Plazmos srauto elektros lanko katodo dėmė buvo ties nelydziojo volframo elektrodo darbinės dalies paviršiumi. Reali elektros lanko anodo dėmės padėtis plazmotrono kanalo viduje buvo nustatyta iš eksperimentinių rezultatų. Plazmos srauto lanko įtampos kritimas tarp katodinės ir anodinės dėmių buvo 50 voltų (6 pav.). Didžiausias srovės tankis buvo lanko katodinėje srityje ir siekė $13,7 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ (7 pav.).

Skaičiuojant plazmotrono magnetinio lauko stiprio ir indukcijos reikšmes buvo taikomos Maksvelo lygtys. Įvertinant elektrinio lanko srovės tankio vektorių kryptį ir dydį kiekviename plazmos srauto taške, buvo apskaičiuotos elektromagnetinių Lorencio jėgų reikšmės ir nustatyta jų įtaka plazmos srautui (8 pav.). Dėl nesimetriško lanko aktyviųjų dėmių išsidėstymo elektromagnetinės Lorencio jėgos poveikis plazmos srautui yra tai pat nesimetris.

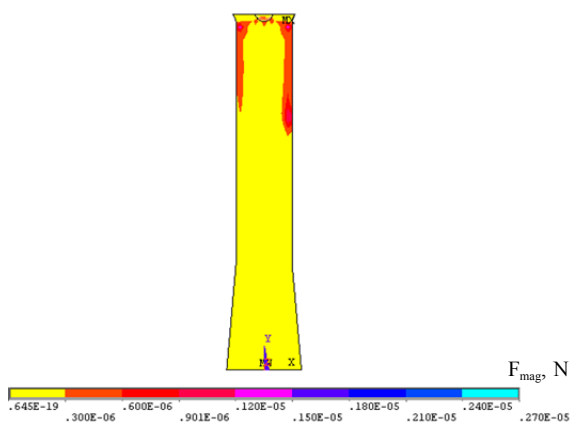


6 pav. Įtampos potencialų pasiskirstymas plazmos sraute
Fig. 6. The distribution of voltage potential in plasma flow



7 pav. Plazmos srauto elektrinio lanko srovės tankio pasiskirstymas

Fig. 7. The distribution of the current density of the electric arc of plasma flow



8 pav. Elektromagnetinės Lorencio jėgos reikšmių pasiskirstymas plazmos sraute

Fig. 8. The distribution of the values of electromagnetic Lorentz force in plasma flow

Plazminio purškimo metu įkauptos nikelio miltelių dalelės skrieja link substrato ir smūgiuodamos formuoja dangos tiškalus substrato paviršiuje. Taikant dvisluoksnės aplydytos nikelio dalelės modelį, buvo apskaičiuotas dalelės kontaktas su substratu purškiant. Deformuotos, sluoksniuotos dalelės įtempimų pasiskirstymas ir deformacijos gylis parodytas 9 pav. Dalelės deformacijos metu maksimalūs tiškalo įtempiai yra vertikaliuos ašies srityje ir siekė 1129 MPa.



9 pav. Deformuotos dvisluoksnės dalelės įtempimų pasiskirstymas

Fig. 9. The distribution of the stresses of the deformed two-layer particle

Išvados

1. Taikant baigtinių elementų metodą ir įvertinant plazmos srauto savybių priklausomybę nuo temperatūros, buvo nustatytas plazmos lanko įtampis ir srovės tankio pasiskirstymas plazmos sraute. Didžiausias srovės tankis buvo nustatytas lanko katodinėje srityje ir siekė $13,7 \times 10^6 \text{ A/m}^2$.
2. Įvertinant elektrinio lanko srovės tankio vektorių kryptį ir dydį kiekviename plazmos srauto taške, buvo apskaičiuotos elektromagnetinių Lorencio jėgų reikšmės ir nustatyta jų įtaka plazmos srautui.
3. Buvo sukurtas modelis ir paprogramis purškiamos dalelės deformacijos procesams (kontakto su substratu metu) tirti. Modelis buvo validuotas pagal analitines formules. Skaičiuojant buvo pasiektas sluoksniuotos dalelės suspaudimas iki 10 % nuo pradinio dalelės skersmens.

Literatūra

- Alaya, M.; Chazelas, C.; Mariaux, G.; Vardelle, A. 2015. Arc-cathode coupling in the modeling of a conventional DC plasma spray torch, *Journal of Thermal Spray Technology* 24(1–2): 3–10. <http://dx.doi.org/10.1007/s11666-014-0162-6>
- Bobzin, K.; Bagcivan, N.; Zhao, L.; Petkovic, I.; Schein, J.; Hartz-Behrend, K.; Kirmer, S.; Marques, 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. <http://dx.doi.org/10.1007/s11465-011-0125-2>
- Bolot, R.; Coddet, C.; Allimant, A.; Billieres, D. 2011. Modelling of the plasma flow and anode region inside a direct current plasma gun, *Journal of Thermal Spray Technology* 20(1–2): 21–27. <http://dx.doi.org/10.1007/s11666-010-9560-6>
- Chen, X.; Li, H. P. 2003. Three-dimensional flow and heat transfer in thermal plasma systems, *Surface and Coatings Technology* 171: 124–133. [http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00252-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00252-4)
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.059>
- Huang, R.; Fukunuma, H.; Uesugi, Y.; Tanaka, Y. 2012. Simulation of arc root fluctuation in a DC non-transferred plasma torch with three dimensional modelling, *Journal of Thermal Spray Technology* 21(3–4): 636–643. <http://dx.doi.org/10.1007/s11666-011-9710-5>
- Huang, R.; Fukunuma, H.; Uesugi, Y.; Tanaka, Y. 2013. Comparisons of two models for the simulation of a DC arc plasma torch, *Journal of Thermal Spray Technology* 22(2–3): 183–191. <http://dx.doi.org/10.1007/s11666-012-9860-0>
- Li, H. P.; Pfender, E. 2007. Three dimensional modeling of the plasma spray process, *Journal of Thermal Spray Technology* 16(2): 245–260. <http://dx.doi.org/10.1007/s11666-007-9023-x>

- Mariaux, G.; Vardelle, A. 2005. 3D time – dependent modeling of the plasma spray process. Part 1: flow modelling, *International Journal of Thermal Sciences* 44: 357–366. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2004.07.006>
- Moreau, E.; Chazelas, C.; Mariaux, G.; Vardelle, A. 2006. Modeling the restrike mode operation of a DC plasma spray torch, *Journal of Thermal Spray Technology* 15(4): 524–530. <http://dx.doi.org/10.1361/105996306X147306>
- Selvan, B.; Ramachandran, K. 2009. Comparisons between two different three-dimensional arc plasma torch simulations, *Journal of Thermal Spray Technology* 18(5–6): 846–857. <http://dx.doi.org/10.1007/s11666-009-9343-0>
- Selvan, B.; Ramachandran, K.; Sreekumar, K. P.; Thiyagarajan, T. K.; Ananthapadmanabhan, P. V. 2010. Numerical and experimental studies on DC plasma spray torch, *Vacuum* 84: 444–452. <http://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.09.009>
- Trelles, J. P.; Chazelas, C.; Vardelle, A.; Heberlein, J. V. R. 2009. Arc plasma torch modeling, *Journal of Thermal Spray Technology* 18(5–6): 728–752. <http://dx.doi.org/10.1007/s11666-009-9342-1>
- Trelles, J. P.; Pfender, E.; Heberlein, J. 2006. Multiscale finite element modeling of arc dynamics in a DC plasma torch, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 26: 557–575. <http://dx.doi.org/10.1007/s11090-006-9023-5>

RESEARCH ON THE PLASMA SPRAY PROCESS APPLYING THE FINITE ELEMENT METHOD

R. Lukauskaitė, J. Garjonis, O. Černašėjus

Abstract

The article investigates the physical processes of plasma spraying. The application of the finite element method has assisted in establishing the distribution of the voltage of the plasma arc and current density in the plasma stream during numerical simulation. With reference to the results of experimental data, the real location of an anode spot of the electric arc in the plasma spray process has been evaluated. The paper has calculated the values of electromagnetic Lorentz forces and established their influence on plasma flow. With the help of the two-layer model for the semi-molten nickel particle, contact between the particle and substrate during plasma spraying has been simulated.

Keywords: plasma spraying, physical processes, finite element method, particle contact.