

Vienkamerinio linijinio plazmos generatoriaus, kaitinančio vienatomes ir dviatomes dujas, charakteristikų tyrimas

Liutauras Marcinauskas^{1, 2},

Vitas Valinčius¹,

Pranas Valatkevičius¹,

Alfonsas Grigonis²

¹ Lietuvos energetikos institutas,
Plazminių technologijų sektorius,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas

² Kauno technologijos universitetas,
Fizikos katedra,
Studentų g. 50, LT-51368 Kaunas

Nustatytos ir apibendrintos 0,4–7,7 kW galios vienkamerinio nuolatinės srovės plazmotrono, kaitinančio vienatomes (argoną) ir dviatomes (orą, azotą, vandenilį) dujas bei argono ir vandenilio dujų mišinį, naudojamo anglies darinių dangoms formuoti bei nerūdijančio plieno paviršiams modifikuoti, charakteristikos. Rezultatai apibendrinti naudojant panašumo teoriją ir palyginti su kitų autorių bei mūsų ankstesnių darbų rezultatais. Kaitinant skirtingų fizinių savybių dujas, rezultatams apibendrinti panaudotos kritinės dujų elektros laidumo (σ_0) ir entalpijos (h_0) reikšmės. Tinkamai parenkant argono ir vandenilio mišinių srautus bei įpučiant į srautą įvairius acetileno dujų kiekius valdomos anglies darinių dangų savybės.

Raktažodžiai: plazmotronas, elektros lankas, lanko voltamperinės ir šiluminės charakteristikos, dujų mišiniai

1. ĮVADAS

Vystantis šiuolaikinei technikai vis daugiau dėmesio skiriama konstrukcinių medžiagų paviršių modifikavimui. Vienas perspektyviausių būdų tai vykdyti – plazmos panaudojimas. Naudojant plazmines technologijas ant įvairių medžiagų paviršių galima suformuoti labai skirtingų savybių dangas, keisti medžiagų paviršiaus savybes ir struktūrą.

Vienas reikšmingiausių ir bene plačiausiai pramonėje bei moksliniuose tyrimuose taikomų dangų formavimo metodų yra plazminis purškimas. Plazminis purškimas greta kitų terminių apdorojimo metodų (detonacinis, liepsnos purškimas ir kt.) užtikrina didelius dangų augimo greičius bei galimybę formuoti įvairių medžiagų dangas. Dangos sudaromos iš metalų (net ir sunkiųjų lydžių), jų oksidų, keramikos, polimerų. Tinkamai parenkant proceso parametrus dangos formuojamos ir ant temperatūrai jautrių paviršių.

Nustatyta, kad yra keliasdešimt skirtingų parametrų, lemiančių formuojamos dangos savybes. Pagrindiniai iš jų yra: plazmos generatoriaus (PG) galia ir konstrukcijos ypatumai, slėgis darbinėje kameroje, darbinių dujų sudėtis, atstumas nuo plazmotrono iki padėklo, ant kurio formuojama danga, plazmos srauto greitis bei temperatūra, padėklo temperatūra ir t. t. [1–3].

PG pagalba galima gauti įvairių dujų (oro, azoto, vandenilio, argono, deguonies, angliavandenilių, vandens garo) bei jų mišinių plazmos srautus. Formuojant anglies darinių dangas, azotinant nerūdijančio plieno pa-

viršius, reikalingi švaraus argono, azoto bei vandenilio stabilūs plazmos srautai. Eksperimentiniams tyrimams, kai reikia kaitinti brangias dujas, naudojami nedidelės galios linijiniai plazmotronai, kurie pasižymi paprasta konstrukcija. Todėl darbe pateikiamos tokio PG apibendrintos elektrinės ir šiluminės charakteristikos tekant skirtingų fizinių savybių dujomis.

2. LANKE VYKSTANČIŲ PROCESŲ APIBENDRINIMAS

Elektros lanko tyrimai vyksta beveik du amžius. Šiuo metu sukurti specialūs maitinimo šaltiniai bei ilgą laiką dirbantys stabilių parametrų plazmotronai, tačiau dėl vykstančių procesų sudėtingumo ir savitumo sukurti patikimiems skaičiavimams būtini eksperimentų duomenys. Aukšto slėgio lanke elektronų ir sunkiųjų dalelių temperatūros atskiruose taškuose yra panašios, t. y. sąlygos artimos terminiai pusiausvyrai. Tačiau absoliučios terminės pusiausvyros lanke nėra, nes elektros lauko energija perduodama elektronams dujose, o po to, jų susidūrimų metu – sunkiosioms dalelėms.

Elektros lanke vykstantys reiškiniai aprašomi vientisumo, tvermės, impulso, energijos, Maksvelo bei Omo dėsnio lygtimis. Jų pagalba, remiantis panašumo teorija, sudaromos kriterijinės lygtys. Daugumoje darbų [2–5] plazmos generatoriaus voltamperinės charakteristikos (VACH) buvo apibendrintos kaitinant vienos rūšies dujas, pvz., orą, azotą, vandenilį. Mokslo tyrimo darbams dažnai reikia tuo pačiu įrengimu kaitinti įvairias dujas

arba jų mišinius. Šiuo atveju rezultatams apibendrinti reikia įvertinti dujų savybių įtaką. Ši užduotis yra labai sudėtinga, nes temperatūros gradientas lanke siekia tūkstančius ir net dešimtis tūkstančių laipsnių [6], o ir aplinkos fizinės savybės kinta labai intensyviai. Paprastai priimama viena temperatūra ir savybės vertinamos temperatūros faktoriumi, kuris yra ribinių temperatūrų santykis. Deja, elektros lankui toks metodas netinka, nes viršutinė temperatūros riba nežinoma. Ji priklauso nuo srovės stiprio, dujų kiekio, geometrinių parametrų, slėgio. Nors žemutinė – įtekančių į plazmotroną dujų temperatūra yra žinoma, tačiau viena svarbiausių dujų savybių – elektros laidumas (σ), esant šiai temperatūrai, praktiškai lygus nuliui. Didelių srovių lanke beveik visi atomai esti jonizuoti ir dujų elektros laidumas jau nepriklauso nuo temperatūros. Didelė temperatūros priklausomybė nuo elektros laidumo pastebima periferinėje lanko zonoje. Nustatyta [6], kad ši zona neturi lemiamos reikšmės bendrai lanko charakteristikai, todėl siūloma panaudoti σ reikšmę, kurią galima nustatyti.

Elektros laidumo kitimo nuo temperatūros kreivė pakeičiama dviem tiesėmis, turinčiomis lūžį, kai pasireiškia visa dujų jonizacija. Šių tiesių susikirtimo taškas nustatytas pakankamai tiksliai. Jis atitinka didelės srovės elektros lanko ribas. Šį tašką siūloma laikyti temperatūrų intervalo apatine riba, pagal kurią nustatomos savybės.

Savybių kitimą lanko viduje galima įvertinti aproksimuotą tiesių laipsnio rodikliu n . Kai $h \leq h_0$, $\sigma = 0$, kai $h \geq h_0$, $\sigma = \sigma_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^n$. Apskaičiuotos savybių reikšmės [6] pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. Koeficientų (σ_0 , h_0 , n) reikšmės, skaičiuojant elektros laidumo priklausomybę nuo entalpijos [6]

Aplinka	$\sigma_0 \frac{1}{\Omega} \cdot M$	h_0 J/kg	n
Vandenilis	1400	$400 \cdot 10^6$	1,38
Azotas	2700	$46 \cdot 10^6$	1,21
Oras	2900	$44 \cdot 10^6$	1,19
Argonas	4000	$4 \cdot 10^6$	0,48

Nedidelių srovių lanke, kai dujų temperatūra nepakankama visų atomų jonizacijai, susikirtimo taškas taip pat apibūdina vykstantį procesą, nes jis nusako σ intensyvaus kitimo ribas.

Kitas svarbus klausimas apibendrinimui – lemiančiųjų kriterijų parinkimas. Apibendrinant įvairių dujų plazmos rezultatus, be energetinio kriterijaus $\frac{I^2}{Gd\sigma_0 h_0}$, dujų fizinėms savybėms bei lanko sukimui įvertinti [6] pasiūlytas specialus iš judesio lygties gautas kriterijus $\rho_0 p_0 D^4 / G^2$. Kaip teigia autoriai [6], šiuo metodu apibendrinant, paklaida siekia iki 25%.

Vėlesniuose darbuose [2, 5] priimta, kad, jeigu lanko sukimo greitis atitinka dujų sukimosi greitį, pagrindinis veiksnys, nusakantis lanko ilgį, bus dujų įkaitinimas ir jų prapūtimas tarp lanko ir sienelės. Tokiu būdu, vietoje $\rho_0 p_0 D^4 / G^2$ kriterijaus siūloma naudoti Reindoldso (Re) ir Knudseno (Kn) kriterijus.

Kaitinant orą, azotą, argoną, vandenilį, duomenims apibendrinti naudojama lygtis turėtų būti:

$$\frac{Ud\sigma_0}{I} = \left(\frac{I^2}{Gd\sigma_0 h_0} \right)^a \text{Re}^b \cdot \text{Kn}^n \cdot n^K. \quad (1)$$

Kaitinamam orui, argonui, azoto plazmos lankui VACH tiksliai apibendrinti siūloma naudoti jų savybes: σ_0 , h_0 , μ_0 , T_0 , λ_0 , esant 1% jonizacijos laipsniui [7].

Plazmotrono efektyvumui ir plazmos srauto greičiui bei temperatūrai nustatyti naudojamas srautingo koeficientas (η), kuris parodo, kiek lanke išsiskiriančios energijos perduodama dujoms:

$$\eta = \frac{I \cdot U - G_V \cdot c_p \cdot \Delta t}{I \cdot U} = \frac{G_d \Delta H}{I \cdot U}. \quad (2)$$

Šis dydis priklauso nuo konvekcinį šilumos mainų tarp kaitinamų dujų ir plazmotrono sienelių paviršiaus, šilumos nuostolių lanko prisilietimo vietoje bei nuostolių spinduliavimu.

Rezultatams apibendrinti naudojamas dydis $\left(\frac{1-\eta}{\eta} \right)$,

kuris proporcingas Stantonio kriterijui (St):

$$\frac{1-\eta}{\eta} = \left(\frac{4l}{d} \right) St; \quad (3)$$

čia $St = \frac{Nu}{\text{Re} \cdot \text{Pr}}$ – šilumos atidavimo intensyvumo

ir bendro šilumos našumo santykis, Pr – Prandtlio kriterijus [8].

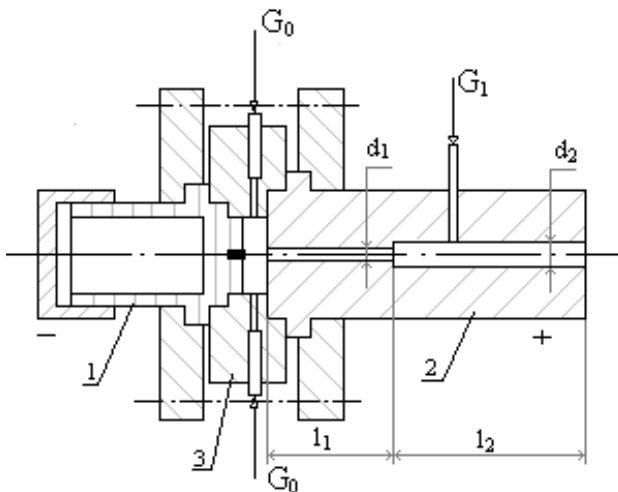
Šiluminės plazmotrono charakteristikos apibendrinamos priklausomybe

$$\frac{1-\eta}{\eta} = c \left(\frac{I^2}{Gd} \right)^i \text{Re}^b \text{Pr}^k. \quad (4)$$

3. EKSPERIMENTINIS ĮRENGINYS IR DUOMENŲ SURINKIMAS

Anglies darinių dangoms formuoti ir medžiagų paviršiams modifikuoti reikalingam plazmos srautui gauti buvo sukurtas nedidelės galios (0,4–7,7 kW) linijinis vienkameris PG, kurio pagalba kaitinamos įvairios dujos (oras, argonas, azotas, vandenilis bei šių dujų mišiniai) atmosferos ir praretinto slėgio aplinkoje.

PG (1 pav.), susidedantis iš karšto (su hafnio emiteriu) katodo (1), izoliacinio žiedo (3) ir laiptuoto anodo (2), tiekia aukštos temperatūros stabilijų parametrų dujų



1 pav. Plazmos generatorius (pažymėjimai tekste)

srautus. Anodo kameros sekcijų ilgiai l_1 ir l_2 yra 20 ir $30 \cdot 10^{-3}$ m, skersmenys d_1 ir d_2 – 2 ir $4 \cdot 10^{-3}$ m. Lankas stabilizuojamas pro izoliacinį žiedą į elektrinio lanko zoną tiekiamomis dujomis. Reikalingam (50 – 150 m/s) tangentiniam greičiui gauti izoliaciniam žiede buvo tangentiškai išgręžtos dvi $1 \cdot 10^{-3}$ m skersmens kiaurymės (G_0). Laiptuotas anodas sumažina lanko pulsacijas (šuntavimą) ir užtikrina srauto parametrų pastovumą.

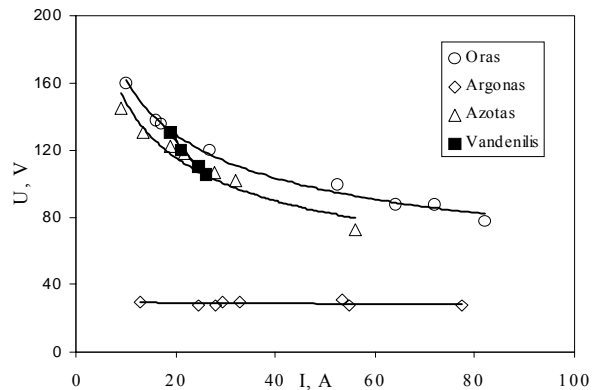
PG maitinamas dviejų nuosekliai sujungtų nuolatinės srovės mašininių generatorių, kurių srovės stipris iki 100 A, o potencialų skirtumas iki 600 V. Generatorių charakteristikos krentančios, todėl, keičiant parametrus, mažiau reikia papildomų varžų. Plazmotronas aušinamas $0,3$ – $0,5$ MPa slėgio vandeniu, uždegamas 20 kV iškrova (osciliatoriumi).

Angliavandenilines dujas arba dispersines daleles tiekti į lanko zoną galima papildomai išgręžus kiaurymę anode (G_1) arba jas įvedant į plazmos srautą už anodo. Dujų kiekiai matuojami taruotomis diafragmomis, su U formos manometrais, silfoniniais manometrais ir difmanometrais, turinčiais elektrinius keitiklius (MDDFU). Aušinančio vandens kiekis matuojamas diafragma bei tūriniu metodu, o pašilimas – keturguba Cu-K (vario–konstantano) diferencialine termopora. Lanko srovės stipris ir įtampos kritimas matuojami skaitmeniniais ampermetru ir voltmetru DI3-72, termoporų ir slėgio keitiklių rodmenys matuojami multimetru Keithley 2700. Gauti matavimo duomenys siunčiami į kompiuterį.

Ekspertimentų metu buvo matuojami srovės stipris, įtampos kritimas, kaitinamų dujų ir aušinamo vandens kiekiai bei vandens pašilimas, sudarytas šiluminis balansas ir nustatyti plazmos srauto vidutinės temperatūros ir greičiai. Nustatyti plazmotrono, kaitinančio skirtingas dujas, plazmos srauto parametrai pateikti 2 lentelėje.

4. TYRIMO REZULTATAI, JŲ ANALIZĖ IR APIBENDRINIMAS

Keičiant generatorių žadinimo įtampos dydį, kaitinamų dujų kiekį, plazmotrono grandinėje įjungtos balastinės



2 pav. Plazmotrono įtampos priklausomybė nuo srovės kaitinant skirtingas dujas (oro ir azoto – $0,2$, argono – $0,22$ ir vandenilio – $0,008 \cdot 10^{-3}$ kg/s)

varžos dydį, buvo keičiamas ir matuojamas srovės stipris ir įtampos kritimas lanke, nustatomos lanko VACH.

Mūsų plazmotrono, kaitinančio dviatomes dujas, VACH yra krentančios (2 pav.), o kaitinant vienatomes (argoną), ekspertimentų paklaidų ribose jos yra horizontalios. Kaip matyti, esant pastoviams kaitinamų dujų (oro, N_2 ir Ar) kiekiams, priklausomai nuo dujų elektros laidumo, įtampos kritimas labai skiriasi. Jeigu orui ir N_2 , tekant 20 A srovei, įtampos kritimas lanke yra 120 – 130 V, tai argonui jis atitinkamai bus apie 30 V. Įtampos kritimas lanke didėja didinant kaitinamų dviatomų dujų srautus [3]. Kaitinant vandenilį, kurio elektros laidumas 2 kartus mažesnis, įtampos kritimas panašus kaip kaitinant $2,5$ karto mažesni oro arba N_2 dujų kiekį.

VACH apibendrintos naudojant energetinį kriterijų.

$$\text{Nustatyta, kad } \frac{Ud\sigma_0}{I} \sim \left(\frac{I^2}{Gd\sigma_0 h_0} \right)^{-0,66}$$

Dujų savybių įvertinimui panaudotas kriterijus

$$\sqrt{\frac{\rho_0}{p_0}} \cdot \frac{pd^2}{G}. \text{ Gautos oro, azoto, argono ir vandenilio}$$

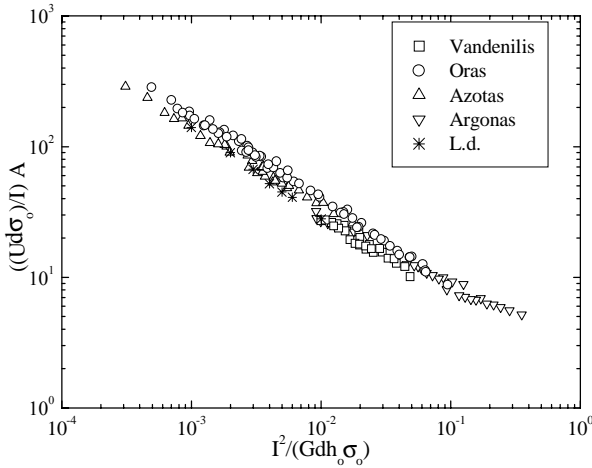
dujų lanko VACH, kurios $\pm 25\%$ tikslumu, energetinio kriterijaus kitimo intervale 10^{-4} – 10^{-1} , gali būti aprašomi priklausomybe

$$\frac{Ud\sigma_0}{I} = 0,84 \left(\frac{I^2}{Gd\sigma_0 h_0} \right)^{-0,66} \left(\sqrt{\frac{\rho_0}{p}} \cdot \frac{pd^2}{G} \right)^{0,29} \cdot n^{-0,4}. \quad (5)$$

Tikslesniam rezultatų apibendrinimui panaudojamas Reynoldsso kriterijus ir laipsnio rodiklis n , vertinantis dujų elektros laidumo priklausomybę nuo entalpijos. Gautus duomenis galima aprašyti lygtimi:

$$\frac{Ud\sigma_0}{I} = 1,8 \left(\frac{I^2}{Gd\sigma_0 h_0} \right)^{-0,66} \cdot \text{Re}^{-0,25} \cdot n^{-0,4}. \quad (6)$$

Kaip matyti 3 pav., apibendrintų VACH rezultatai gana gerai sutampa su kitų autorių gautomis apiben-



3 pav. Apibendrintos plazmotrono voltamperinės charakteristikos; čia $A = \text{Re}^{0,25} \cdot n^{0,4}$, (L. d. – duomenys paimti iš [9], kaitinant Ar ir N_2 dujas)

drintomis VACH kaitinant azoto ir argono dujas [9]. Re kriterijus, kaip ir [9], buvo apskaičiuotas imant dujų dinaminį klampio koeficientą esant 3000 K plazmos srauto temperatūrai. Kadangi naudojamo plazmotrono kanalo skersmuo pastovus ($d = \text{const}$), o eksperimentai atlikti esant atmosferos slėgiui, Knudseno kriterijaus galima nepaisyti.

Gautų rezultatų analizė parodė, kad kaitinant oro, azoto, vandenilio ir argono srautus, elektros lanko įtampos kritimo priklausomybės dėl fizinių dujų savybių įtakos nežymiai skirtingos. Jas galima įvertinti papildomu parametru $\left(\frac{I}{G}\right)^m$. Kaip žinome [10],

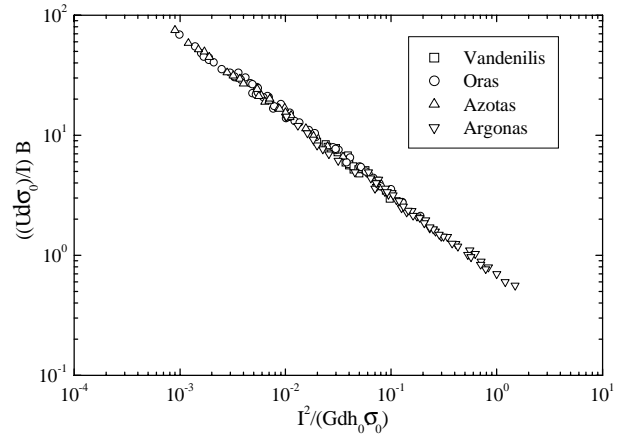
$$\frac{I}{G} = \left(\frac{I^2}{Gd}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{G}{d}\right)^{-0,5}. \quad (7)$$

Jeigu dviatomėms dujoms – orui, azotui, vandeniliui – m lygus atitinkamai 0; 0,08; 0,06, tai argonui $m = 0,29$. Tokiu būdu, vienkamerinio linijinio plazmotrono, kaitinančio orą, azotą, vandenilį ir argoną, VACH (4 pav.) siūloma aprašyti priklausomybe:

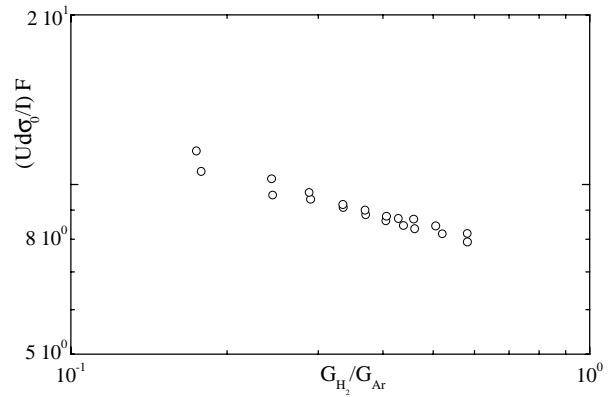
$$\frac{Ud\sigma_0}{I} = 0,71 \left(\frac{I^2}{Gd\sigma_0 h_0}\right)^{-0,66} \cdot \text{Re}^{-0,25} \cdot n^{-0,4} \cdot E \left(\frac{I}{G}\right)^m; \quad (8)$$

čia E reikšmės yra: orui – 1,08; azotui – 0,35; vandeniliui – 0,34; argonui – 0,03. Pastebėta, kad vienatomių dujų E ir m reikšmės ženkliai skiriasi nuo dviatomių. Tai siejama su skirtingomis šių dujų fizinėmis savybėmis bei nevienoda plazmos temperatūra.

Formuojant anglies darinių dangas į plazmotrono lanko zoną kartu su vienatomiu argonu įpučiamas dviatomis vandenilis. Šių dujų savybės labai skiriasi, kartu itin skiriasi ir lanko charakteristikos. Eksperimentų metu į argoną buvo maišoma iki 50% vandenilio. Dėl to įtampos kritimas lanke gerokai padidėja. Apibendrinant rezultatus pastebėta, kad naudotų dujų (Ar-H_2) mišinio elektros laidumas ir entalpija proporcingi jų kiekiui. Api-



4 pav. Apibendrintos plazmotrono VACH kaitinant orą, vandenilį, azotą ir argoną. $B = \frac{\text{Re}^{0,25} \cdot n^{0,4} \left(\frac{I}{G}\right)^m}{E}$



5 pav. Vandenilio, įmaišyto į argono plazmą, įtaka VACH,

$$F = \text{Re}^{0,25} \cdot n^{0,4} \cdot \left(\frac{I^2}{Gdh_0\sigma_0}\right)^{0,66}$$

bendrinant VACH (5 pav.) vandenilio dujų įtaką siūlo-

me įvertinti kompleksu $\left(\frac{G_{H_2}}{G_{Ar}}\right)^{-0,28}$, kuriame G_{Ar} ir

G_{H_2} – kaitinamų argono ir vandenilio dujų srautai. Rezultatus galima aprašyti lygtimi

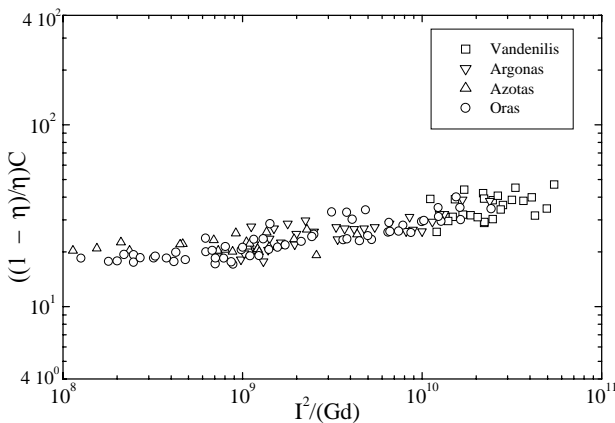
$$\frac{Ud\sigma_0}{I} = 6,8 \left(\frac{I^2}{Gd\sigma_0 h_0}\right)^{-0,66} \cdot \text{Re}^{-0,25} \cdot n^{-0,4} \left(\frac{G_{H_2}}{G_{Ar}}\right)^{-0,28}. \quad (9)$$

Be elektrinių lanko charakteristikų, buvo matuojami šilumos nuostoliai plazmotrone, nustatomas naudingumo koeficientas. Šilumos mainų į plazmotrono sienes, tekant oro, azoto, argono ir vandenilio dujų plazmai, rezultatai pateikti 6 pav. Apytikriai jie gali būti aprašyti priklausomybe:

$$\frac{1-\eta}{\eta} = 1,2 \left(\frac{I^2}{Gd}\right)^{0,14} \cdot \text{Re}^{-0,5} \cdot \text{Pr}^{-0,67}. \quad (10)$$

2 lentelė. Plazmotrono kaitinamų dujų plazmos parametrai

Parametras	Dujų rūšis			
	oras	azotas	argonas	vandenilis
Plazmotrono galia (kW)	1,6–7,7	1,2–4,7	0,35–2,4	2–3,2
Srovės stipris (A)	8,5–82	7–75	12–80	18–26
Įtampos kritimas (V)	75–177	65–170	25–35	90–140
Naudingumo koeficientas (η)	0,25–0,67	0,3–0,59	0,24–0,5	0,045–0,13
Kaitinamų dujų (G_d) srautas, 10^{-3} kg/s	0,07–0,4	0,1–0,4	0,12–0,45	0,0046–0,0157
Aušinančio vandens (G_v) kiekis, 10^{-3} kg/s	34,5	25–35	34,5	35
Plazmos vidutinė temperatūra (K)	2800–5600	3500–6200	2100–7200	1600–1870
Vidutinis srauto greitis w (m/s)	140–260	150–440	140–310	24–80
Reinoldso kriterijus, Re	270–1600	300–1400	180–1500	50–310

6 pav. Apibendrinti šilumos atidavimo plazmotrone rezultatai, $C = Re^{0,5} Pr^{0,67}$

Norint nustatyti šilumos mainų priklausomybes reikia įvertinti Reinoldso ir Prandtlio kriterijus. Šiuose kriterijuose klampio koeficientas imamas esant plazmos srauto temperatūrai 3000 K. Apskaičiuotos Reinoldso reikšmės (žr. 2 lentelę) rodo, kad dujų tekėjimas plazmotrono kanale yra laminarinis, nes $Re < Re_{kr} < 2300$, todėl apibendrinimui naudojamas $Re^{0,5} \cdot Pr^{0,67}$ [10].

Žinant plazmotrono η ir kaitinamų dujų kiekį, nesunku apskaičiuoti medžiagų paviršių modifikavimui naudojamos plazmos srauto vidutinius greičius ir temperatūras.

Gauti rezultatai rodo, kad PG voltamperinėms ir šiluminėms charakteristikoms didelę įtaką turi plazmą formuojančių dujų srautai ir jų fizinės savybės. Šios charakteristikos lemia iš PG ištekiančios aukštos temperatūros dujų srovės greičių ir temperatūrų pasiskirstymą. Vadinasi, keičiant plazmotrono galią bei charakteristikų pobūdį, galima reguliuoti dujų parametrus, reikalingus dangų paviršiams modifikuoti ar dangoms formuoti naudojant įvairias dispersines daleles ir angliavandenilines dujas. Tai labai svarbu praktiškai taikant įvairias plazmines technologijas.

5. IŠVADOS

1. Apibendrintos elektros lanko, degančio vienkameriniame linijiniame plazmotrone ir kaitinančio ora, azotą, vandenilį ir argoną, charakteristikos naudojant energetinį, Reinoldso kriterijų parodė, kad atskiroms dujoms

laipsnio rodiklis m ir koeficientas E skiriasi. Tai paaiškinama skirtingomis dujų fizinėmis savybėmis ir nevienoda plazmos temperatūra lanko zonoje.

2. Plazmotrono šiluminės charakteristikos apibendrinamos (10) priklausomybe. Skirtingų kaitinamų dujų savybės įvertinamos Prandtlio kriterijumi ir dujų klampio koeficientu μ , esant fiksuotai (3000 K) temperatūrai. Rezultatų apibendrinti pagal iš plazmotrono ištekėjusių dujų vidutinę temperatūrą negalima, nes ji neįvertina plazmotrone vykstančių procesų, kurie priklauso nuo srovės stiprio (I) ir dujų srauto (G_d).

3. Ar ir H_2 mišinio lanko VACH apibendrinimui reikia naudoti atitinkamai mišinio σ_0 ir h_0 reikšmes,

o vandenilio kiekį įvertinti daugikliu $\left(\frac{G_{H_2}}{G_{Ar}}\right)^{-0,28}$.

4. Apibendrintos oro, N_2 , Ar ir H_2 vandenilio dujų lanko elektrinės ir šiluminės charakteristikos padeda parinkti plazminėms technologijoms reikalingus srauto parametrus.

Pažymėjimai

H – dujų entalpija kJ/kg;

ρ – dujų tankis kg/m³;

p_0 – dujų slėgis Pa;

v – kinetinis klampis m²/s;

μ – dinaminis klampis N · s/m²;

$Re = \frac{wd}{v}$ – Reinoldso kriterijus;

$St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr}$ – Stantonio kriterijus.

Tyrimus dalinai remia Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas.

Gauta 2006 01 16

Literatūra

1. Fauchais P., Vardelle A., Denoirjean A. Reactive thermal plasmas: ultrafine particle synthesis and coating deposition // Surface and Coatings Technology. 1997. Vol. 97. P. 66–78.

2. Жуков М. Ф., Засыпкин И. М., Тимошевский А. Н., Михайлов Б. Г., Десятков Г. А. Электродуговые генераторы термической плазмы // Новосибирск: Наука. Сиб. Предпр. РАН. 1999. С. 712.
3. Krušinskaitė V., Valinčius V., Valatkevičius P. Nuolatinės srovės generatoriaus, naudojamo formuojant plazmines dangas, elektrinės ir šiluminės charakteristikos // Energetika. 2002. Nr. 2. P. 36–41.
4. Жуков М. Ф., Смоляков В. Я., Урюков Б. А. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны). Изд-во „Наука“, 1973. С. 232.
5. Valinčius V., Krušinskaitė V., Valatkevičius P., Valinčiūtė V., Marcinauskas L. Electric and thermal characteristics of the linear, sectional dc plasma generator // Plasma sources science and technology. 2004. Vol. 13. P. 199–206.
6. Жидович А. И., Кравченко С. К., Ясько О. И. Обобщение вольтамперных характеристик электрической дуги, обдуваемой различными газами // Генераторы низкотемпературной плазмы. Москва: Энергия, 1969. С. 218–232.
7. Brilliac J.-F., Pateiron B., Fauchais P. et al. Study of the Dynamic and Static Behavior of dc Vortex Plasma Torches: PFI: Button Type Cathode // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 1995. Vol. 15. P. 231–255.
8. Амбразявичюс А. Теплообмен при закалке газов. Вильнюс, 1983. С. 192.
9. Амбразявичюс А., Юшкявичюс Р., Эва В., Вилейшис А. Явления при продольном обдувании электрической дуги в канале // International Symposium on Switching Arc Phenomena. Lodz–Poland, 1970.
10. Петухов Б. С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубе. Москва: Энергия, 1969. С. 411.

**Liutauras Marcinauskas, Vitas Valinčius,
Pranas Valatkevičius, Alfonsas Grigonis**

INVESTIGATION OF SINGLE-CHAMBER LINEAR PLASMA TORCH CHARACTERISTICS WHILE HEATING MONATOMIC AND DIATOMIC GASES

Summary

A new linear DC 0.4–7.7 kW plasma torch has been designed and manufactured for the formation of carbon coatings and modification of steel surfaces in atmospheric or reduced pressure conditions. The main operational parameters of the plasma generator have been investigated for heating monatomic (argon) and diatomic (air, nitrogen and hydrogen) gases or their mixture (argon–hydrogen). The generalized electrical and thermal characteristics of the plasma torch were determined using theory of similarity.

Key words: plasma torch, electric arc, current-voltage characteristics, thermal characteristics

**Лютаурас Марцинаускас, Витас Валинčius,
Пранас Валаткявичюс, Альфонсас Григонис**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ОДНОКАМЕРНОГО ЛИНЕЙНОГО
ПЛАЗМОТРОНА ПРИ НАГРЕВЕ
ОДНОАТОМНЫХ И ДВУХАТОМНЫХ ГАЗОВ**

Резюме

Представлены экспериментальные результаты исследования электрических и тепловых характеристик постоянного тока линейного, однокамерного, с горячим катодом плазменного генератора, при нагреве воздуха, азота, аргона, водорода и смеси аргона с водородом с учетом атмосферного давления, применяемого для плазменных технологий (нанесение покрытий, модификации поверхностей нержавеющей стали, образования углесодержащих пленок). Результаты обобщены с помощью теории подобия. Предложены зависимости, обобщающие вольтамперные и тепловые характеристики, дуги нагреваемых одноатомных и двухатомных газов.

Ключевые слова: электрическая дуга, плазмотрон, вольтамперные и тепловые характеристики