
Nuolatinės srovės generatoriaus, naudojamo formuojant plazmines dangas, elektrinės ir šiluminės charakteristikos

**Vilma Krušinskaitė,
Vitas Valinčius,
Pranas Valatkevičius**

*Lietuvos energetikos institutas,
Plazminių technologijų laboratorija,
Breslaujos g. 3,
LT-3035 Kaunas*

Išmatuotos ir apibendrintos aukštos įtampos (200–320 V) bei mažo srovės stiprio (120–280 A) linijinio dviejų ir trijų sekcijų plazmos generatoriaus, naudojamo medžiagų paviršių inžinerijoje, elektrinės ir šiluminės charakteristikos. Rezultatai apibendrinti naudojant panašumo teoriją ir palyginti su kitų autorių bei mūsų ankstesnių darbų rezultatais. Nustatyta plazmos srautą formuojančių dujų įpūtimo vietos ir kiekio įtaka voltamperinių ir šiluminių charakteristikų pasiskirstymui. Reguluojant dujų srautus bei tinkamai parenkant į reakcinę kamerą įpučiamų dispersinių dalelių parametrus, užtikrinamas įrengimo darbo stabilumas ir valdomos gaminamų dangų charakteristikos.

Raktažodžiai: žemos temperatūros plazma, plazmotronas, voltamperinės charakteristikos

1. ĮVADAS

Tiriamiesiems ir pramoniniams tikslams vis dažniau naudojama žemos temperatūros plazma. Plazmochemija, metalurgija, medžiagų paviršių inžinerija, lazerinė ir kosminė technika, šilumos mainai – tai plazmos srautų panaudojimo sritys.

Plazminiai technologiniai procesai vyksta esant aukštomis dujų srauto temperatūroms ir dideliems greičiams specialiuose įrengimuose – plazmotronuose. Paprastai dujos yra dielektrikai, tačiau, jas jonizavus aukštos įtampos iškrova, pradeda tekėti elektros srovė, užsidega lankas. Priklausomai nuo slėgio, dujų rūšies, srovės stiprio ir kitų parametrų temperatūra lanke gali keistis nuo 5000 iki 30000 K, todėl čia vyksta sudėtingi elektriniai, cheminiai ir šiluminiai procesai.

Priklausomai nuo lanko aptekėjimo dujomis pobūdžio, naudojami nuolatinės srovės generatoriai su skersiniu [1, 2] ir išilginiu [3, 4] aptekėjimu. Pirmojo tipo generatoriuose dujų kiekiai maži, žema įtampa, bet didelė srovė, todėl reikia tiekti inertines dujas, kad neeroduotų elektrodai. Kai kaitinami didesni reaktyvių dujų kiekiai, naudojami linijiniai sekcijiniai kaitintuvai su išilginiu lanko aptekėjimu.

Lietuvos energetikos instituto Plazminių technologijų laboratorijoje daug metų, bendradarbiaujant su Rusijos [1, 4] bei Baltarusijos [2, 3] mokslininkais, buvo kuriami plazmos generatoriai, skirti šilu-

mos mainams ir dujų dinamikai aukštos temperatūros srautuose tirti [5]. Pastaruoju metu laboratorijoje sprendžiami taikomojo pobūdžio klausimai.

Formuojant įvairias dangas, modifikuojant paviršius, gaminant aukštos temperatūros pluoštą, reikalingi stabilūs aukštos temperatūros reaguojančių ir nereaguojančių dujų srautai. Jie gaunami naujai sukurtais specialiais plazmotronais, todėl būtina iširti ir apibendrinti šių plazminių įrenginių lanke vykstančius šilumos mainų procesus.

2. LANKE VYKSTANČIŲ PROCESŲ APIBENDRINIMO METODIKA

Elektrofizinius procesus analitiškai galima aprašyti tik esant griežtai apibrėžtoms sąlygoms. Degant lankui vyksta cheminės reakcijos, disociacijos ir jonizacijos procesai, energijos mainai tarp įkrautų dalelių, kurios sudaro sudėtingą molekulių, atomų, jonų ir elektronų visumą. Dažniausiai dujos plazmotrone teka turbulentiškai, kanalo geometrija yra sudėtinga, o kaitinamos dujos į reakcinę kamerą tiekiamos įvairiausiais būdais. Dėl šių procesų sudėtingumo, apibendrinant tyrimų rezultatus, būtų netikslinga naudoti supaprastintais skaičiavimo metodais, todėl šiuo atveju didelę reikšmę turi panašumo teorijos pritaikymas. Fizikinius reiškinius aprašantys panašumo kriterijai nustatomi remiantis π teorema arba analizuojant procesą apibūdinančias lygtis. Pritaikius pa-

našumo sąlygas, atitinkančias fundamentines proceso lygtis, net be galutinio sprendimo, gaunama daug informacijos apie lanko parametrus, tačiau, sudarant kriterijines lygtis, remiamasi abiem minėtais metodais [1–3].

Lanke vykstančius reiškinius aprašančios nepertraukiamumo, tvermės, impulso, energijos, Maksvelo bei Omo dėsnio lygtys šiame darbe yra nedimensinės, o visi kintamieji turi būdingas reikšmes [6]. Analizuojant lygtis, greta klasikinėje dujų dinamikoje vartojamų panašumo kriterijų – Macho ($M = v/a$),

Reinoldso $\left(Re = \frac{vd\rho}{\mu} \right)$, Prandtlio $\left(Pr = \frac{v}{a'} \right)$ atsiran-

da nauji – elektros lauko stiprio $\left(N_u = \frac{\sigma Ed^2}{I} \right)$,

energetinis $\left(N_i = \frac{I^2}{\sigma\rho v H_0 d^3} \right)$, magnetinis Reinoldso

$\left(Re_m = \frac{IB}{\rho v^2 d} \right)$ ir Knudseno ($Kn = \lambda_e / d$).

Žinant daugiau dydžių, įtraukiami papildomi parametrai: l/d , G_1/G ir pan.

Plazmos generatoriaus ir maitinimo šaltinio darbą sąlygoja suminės voltamperinės charakteristikos (VACH), t. y. įtampos priklausomybė nuo srovės stiprio, esant skirtingiems dujų kiekiams, slėgiui ir t. t. Plazmotrone, kuriame lankas stabilizuojamas tangentiškai įpučiamomis į reakcinę kamerą dujomis ir išlaikomas temperatūrinis, geometrinis ir dinaminis panašumas bei vienoda dujų cheminė sudėtis, svarbūs yra elektros lauko stiprio ir energetinis kriterijai. Jei savaime fiksuojamą lanko ilgį sąlygoja šuntavimas, siūloma vartoti energetinį, Reinoldso ir Knudseno kriterijus [1, 3]:

$$N_u = f(N_i, Re, Kn). \quad (1)$$

Nustačius, kad $Kn^{-1} \approx pd$, plazmotronų elektrines charakteristikas siūloma aprašyti lygtimi [7]

$$\frac{Ud}{I} = c \left(\frac{I^2}{Gd} \right)^m \cdot \left(\frac{G}{d} \right)^n \cdot (pd)^k \cdot (l/d)^r. \quad (2)$$

Plazmos generatoriaus efektyvumą nusako šiluminis naudingumo koeficientas (η), kuris parodo, kiek lanke išsiskiriančios energijos perduodama dujoms:

$$\eta = \frac{G \cdot \Delta H}{U \cdot I}. \quad (3)$$

Kaip ir voltamperinės charakteristikos, plazmotrono η apibendrinamas priklausomybe:

$$\frac{1-\eta}{\eta} = c \left(\frac{I^2}{Gd} \right)^m \cdot \left(\frac{G}{d} \right)^n \cdot (pd)^k \cdot (l/d)^r. \quad (4)$$

Šis dydis gali būti išreikštas ir per Stantonio kriterijų

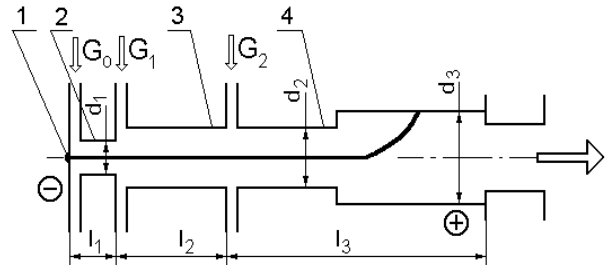
$$\frac{1-\eta}{\eta} = \left(\frac{4l}{d} \right) St, \quad (5)$$

kuris yra šilumos atidavimo intensyvumo ir bendro srauto šilumos našumo santykio matas [5].

3. EKSPERIMENTINIS ĮRENGINYS

Plazminėms dangoms formuoti reikalingas aukštos temperatūros oro srautas gaunamas naudojant dujų dinaminį stendą su nuolatinės srovės linijiniu plazmotronu [7]. Kad plazminis įrenginys sėkmingai dirbtų, įrengtos pagalbinės elektros, dujų, vandens tiekimo, reguliavimo ir matavimo sistemos.

Dviejų ar trijų sekcijų plazmotronas (1 pav.) susideda iš karšto hafnio katodo (1), lanko uždegimo žiedo (2), neutralios sekcijos (trijų sekcijų plazmotrone) (3) ir laiptuoto anodo (4).



1 pav. Sekcijinio plazmotrono principinė schema. (Paaiškinimas tekste)

Termoemisinis hafnio katodas, kurį rekomenduojama naudoti esant srovės stipriui ne didesiam kaip 250 A, leidžia į plazmotroną tiekti deguonies turinčias dujas. Lankas plazmotrone stabilizuojamas tangentiškai į reakcinę kamerą įpučiamu oro srautu. Norint sumažinti šilumos nuostolius į reakcinės kameros sienes, geriau reguliuoti įtampos kritimą lanke ir į lanko degimo zoną tiekti dispersines medžiagas, naudojamas paskirstytas oro įpūtimas.

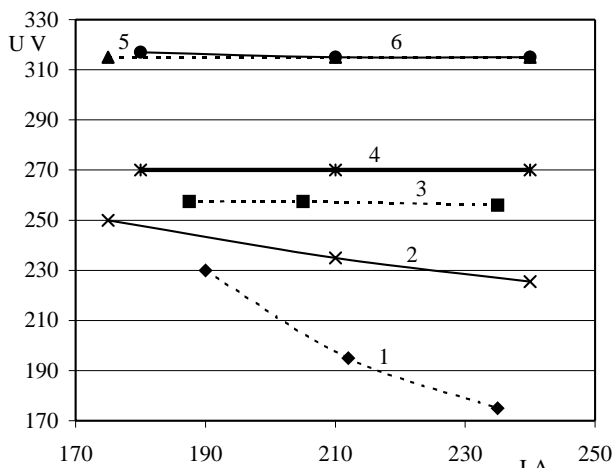
Lentelėje pateiktiems plazmos srauto parametrams ir plazmotrono charakteristikoms nustatyti buvo sudarytas šilumos balansas ir išmatuotas srovės stipris grandinėje, įtampos kritimas lanke, pratekėjusių per plazmotroną dujų kiekiai, aušinančio vandens kiekiai ir jo pašilimas, šilumos nuostoliai plaz-

Lentelė. Plazmotrono ir plazmos srauto parametrai		
Parametras	Plazmotronas	
	dvi sekcijos	trys sekcijos
Plazmotrono galia (kW)	33–78	40–94
Vandens kiekis (kg/s)	0,16–0,18	0,16–0,18
Vandens pašilimas:		
plazmotrone	15–23	18–38
katode	1,1–1,53	1,04–1,75
lanko uždegimo žiede	1,08–2,16	1,15–3
tarpinėje sekcijoje	–	2,2–6
anode	13–19,3	13,7–27,3
Kaitinamo oro kiekis (10^{-3} kg/s):		
prie katodo G_0	0,54–1	0,54–1,2
prie tarpinio žiedo G_1	–	1,2–3,6
prie anodo G_2	1,85–7,6	1–3
Lanko srovės stipris I (A)	175–245	175–285
Lanko įtampa U (V)	160–335	200–360
Vidutinė plazmos srauto temperatūra (K)	3460–5200	3480–5170
Vidutinis plazmos srauto greitis v (m/s)	350–1000	500–1000
Naudingumo koeficientas η	0,58–0,78	0,6–0,77
Reakcinės kameros skersmuo (10^{-3} m):		
d_1	4	4
d_2	8	8
d_3	12	12
Sekcijos ilgis (10^{-3} m):		
l_1	13	13
l_2	–	26
l_3	64	56

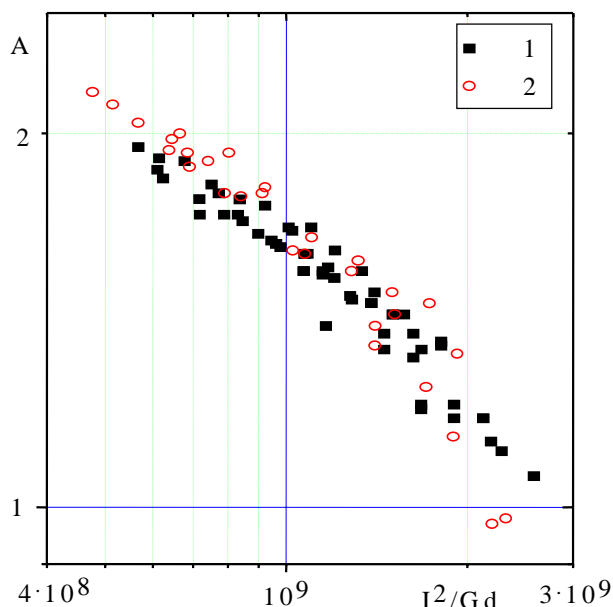
motrone ir reaktoriuje. Vandens kiekis nustatytas tūrinio metodu, pašilimas – diferencialinėmis vario-konstantano termoporomis, oro kiekis – kritinėmis tūtomis.

4. REZULTATAI IR JŲ APIBENDRINIMAS

Keičiant lanko srovės stiprį bei įpučiamo oro kiekius G_1 ir G_2 , buvo atlikta daugiau kaip 100 eksperimentų. Plazmotrono statinė charakteristika yra šiek tiek krintanti arba stabili, t. y. didėjant srovės stipriui, įtampos perkritis išlieka pastovus (2 pav.). Kaitinant mažesnius oro kiekius, didesnę įtaką turi G_1 ir lankas, kurio stabilumą užtikrina šuntavimas, dega siaurojoje anodo dalyje (d_2). Padidinus dujų kiekius, lankas pailgėja, pradeda veikti dirbtinė kliūtis – lankas ir charakteristika stabilizuojasi. Lanko anodinė dėmė fiksuojama d_3 zonoje. Šiuo atveju įtampos kritimą labiau veikia oro kiekio G_2 kitimas. Išsamiau dujų įpūtimo intensyvumo, vietos ir pobū-



2 pav. Voltamperinės plazmotrono charakteristikos, esant skirtingiems kaitinamo oro kiekiams. Ištinė linija – su papildoma sekcija, punktyrinė – be papildomos sekcijos. 1 – 3,0; 2 – 3,4; 3 – 4,0; 4 – 5,15; 5 – 7,5; 6 – 7,15; (10^{-3} kg/s)



3 pav. Apibendrintos plazmotrono voltamperinės charakteristikos. 1 – su papildoma sekcija, 2 – be papildomos sekcijos. $A = (Ud_2/I) \cdot (G_1/G)^{0,12} \cdot (d_2/I)^{0,5}$

džio įtaka plazminio įrenginio charakteristikoms aprašyta mūsų darbe [8].

Gautos plazmotrono voltamperinės charakteristikos apibendrintos naudojantis (2) kriterijine priklausomybe (3 pav.). Kadangi slėgis reakcinėje kameroje artimas atmosferos slėgiui, sandaugą pd , įvertinančią lanko pramušimo į sienelės sąlygas, galima atmesti. Tuomet plazmotrono charakteristikos aprašomos lygtimi

$$\frac{Ud_2}{I} = c \left(\frac{I^2}{Gd_2} \right)^m \cdot \left(\frac{d_2}{I} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{G_1}{G} \right)^{-0,12} \quad (6)$$

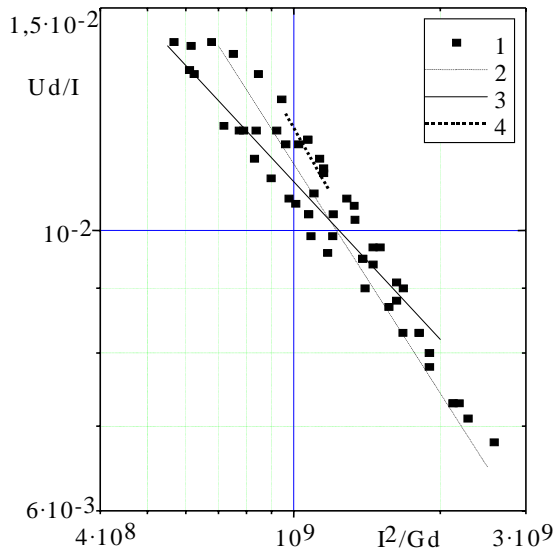
Dydis G_1/G įvertina dujų įpūtimo vietos ir kiekio efektą.

Kai, esant dideliame srovės stipriui, kaitinami maži kiekiai dujų, t. y. $(I^2/Gd_2) > 1,4 \cdot 10^9$, plazmotronui su papildoma neutralia sekcija $c_1 = 1,03 \cdot 10^5$, $m_1 = -0,53$, o be papildomos sekcijos $c_2 = 1,92 \cdot 10^6$, $m_2 = -0,67$. Kaitinant didelius kiekius oro, $c_1 = 1230$, $m_1 = -0,32$ ir $c_2 = 1960$, $m_2 = -0,34$.

Iš (6) lygties gaunama:

$$U = c \left(\frac{I^2}{Gd_2} \right)^m \cdot \left(\frac{I}{d_2} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{G_1}{G} \right)^{-0,12} \quad (7)$$

4 paveiksle matyti, kad mūsų gautos plazmotrono charakteristikos pakankamai gerai koreliuojasi su prof. M. Žukovo [4] ir O. Jasko [2] apskaičiuotomis tiek esant fiksuotam lanko ilgiui, tiek jam susiformuojant savaime.



4 pav. Eksperimentinių rezultatų palyginimas. 1 – mūsų gauti rezultatai, 2 – [2], 3 – [4], 4 – [7]

Iš plazmotrone nustatytų šilumos nuostolių (η) matyti, kad didėjant srovės stipriui, η mažėja (5 pav.). Kaitintuve be tarpinės sekcijos vyksta intensyvesnis procesas: didėjant kaitinamo oro kiekiui, nuostoliai į plazmotrono sienelės mažėja.

Apibendrintas plazmotrono ir reaktoriaus naudingumo koeficientas pavaizduotas 6 pav. Rezultatai aprašomi priklausomybe:

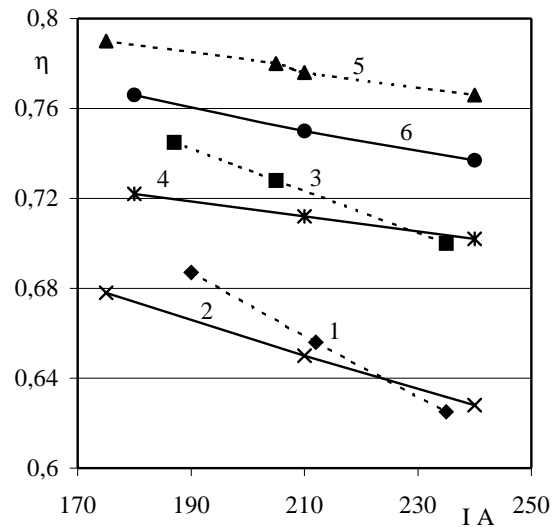
$$\frac{1-\eta}{\eta} = c \left(\frac{I^2}{Gd_2} \right)^m \cdot \left(\frac{G_1}{G} \right)^{0,12} \cdot \left(\frac{G}{d_2} \right)^{0,2} \cdot \frac{d_2}{I} \cdot \left(\frac{l}{d_0} \right)^{0,95} \quad (8)$$

čia plazmotronui su tarpine sekcija $c_1 = 0,71 \cdot 10^{-4}$, be jos – $c_2 = 0,68 \cdot 10^{-4}$, o m abiem atvejais lygus 0,8.

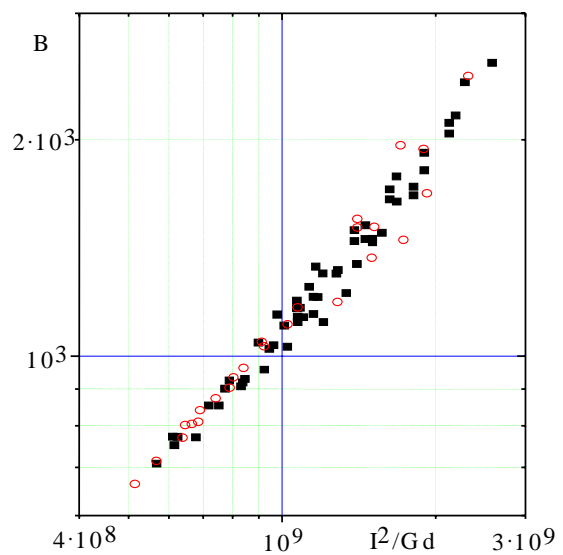
Dydis $\frac{1-\eta}{\eta}$ proporcingas Stantonio kriterijui ir nusako šilumos nuostolių į sienelės santykį su plazmos srauto galia.

Žinant plazmotrono geometriją, lanko srovės stiprį ir kaitinamo oro kiekį, išstokančių iš anodo dujų vidutinę temperatūrą (7 pav.) apytikriai galima nustatyti pagal lygtį:

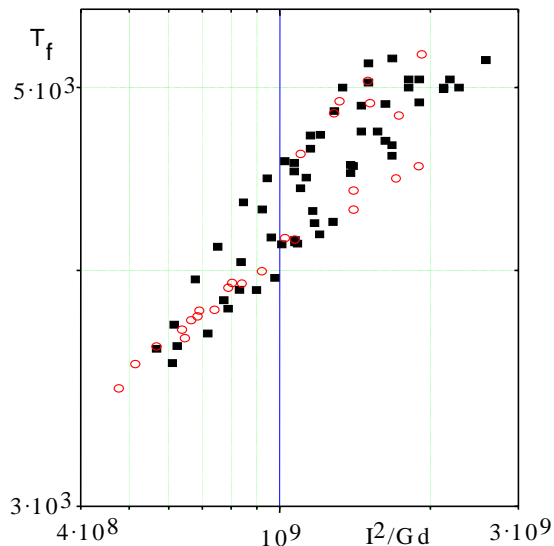
$$T_f = 29 \left(\frac{I^2}{Gd_2} \right)^{0,24} \quad (9)$$



5 pav. Plazmotrono naudingumo koeficientas. (Žymėjimai 2 pav.)



6 pav. Apibendrintas plazmotrono naudingumo koeficientas. (Žymėjimai 3 pav. $B = ((1-\eta)/\eta) \cdot (G_1/G)^{-0,12} \cdot (G/d_2)^{-0,2} \cdot (I/d_2) \cdot (l/d_0)^{-0,95}$)



7 pav. Iš plazmotrono ištekantių dujų srauto temperatūra. (Žymėjimai 3 pav.)

Gauti rezultatai rodo, kad plazmos generatoriaus voltamperinėms ir šiluminėms charakteristikoms didelę įtaką turi plazmą formuojančių dujų įpūtimo vieta ir jų srautai. Šios charakteristikos lemia iš plazmos generatoriaus ištekantių aukštos temperatūros srovės parametrų lygį ir pasiskirstymą. Vadinasi, keičiant charakteristikų pobūdį bei reikšmes, galima reguliuoti ir ištekantių srovės parametrus, kurie tiesiogiai veikia plazminėmis technologijomis formuojamų dangų savybes.

5. IŠVADOS

1. Apibendrintos plazmos generatoriaus elektrinės ir šiluminės charakteristikos padeda nustatyti reikalingus plazmos srauto parametrus ir pasirinkti optimalų darbo režimą.

2. Paviršiams modifikuoti ir dangoms formuoti skirtu plazmotrono voltamperinės ir šiluminės charakteristikos yra mažėjančios ir aprašomos (7) bei (8) lygtimis.

3. Dujų įpūtimo į reakcinę kamerą intensyvumas įvertinamas daugikliu $(G_1/G)^{0,12}$.

4. Plazmotrone su papildoma sekcija, esant pastoviam bendram oro srautui G , kai $G_2 > G_1$, įtampa ir plazmotrono galia padidėja 10–15%.

5. Plazmotrono VACH priklauso nuo dujų įpūtimo vietos ir intensyvumo. Jos tiesiogiai veikia formuojamų dangų savybes ir kokybę.

Tyrimus remia Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas.

Pažymėjimai

a – garso greitis m/s; a' – temperatūrinis laidumo koeficientas m^2/s ; B – magnetinė indukcija T; d_0 –

ištekėjimo kameros skersmuo m; E – elektrinio lauko stipris eV; G – bendras kaitinamo oro kiekis kg/s; H – entalpija kJ/kg; λ_e – laisvasis elektronų kelias m; μ – dinaminis klampis Ns/m²; ν – kinematinis klampis m²/s; p – slėgis Pa; ρ – dujų tankis kg/m³; σ – elektros laidumas 1/Ωm; v – dujų srauto greitis m/s;

Gauta
2002 05 09

Literatūra

1. Жуков М. Ф., Смоляков В. Я., Урюков Б. А. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны). Москва, 1973. С. 232.
2. Ясько О. И. Электрическая дуга в плазмотроне. Минск, 1977. С. 156.
3. Жидович А. И., Кравченко С. К., Ясько О. И. Обобщение вольтамперных характеристик электрической дуги, обдуваемой разными газами // Генераторы низкотемпературной плазмы. Москва, 1969. С. 218–232.
4. Жуков М. Ф., Аньшаков А. С. и др. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками. Новосибирск, 1981. С. 224.
5. Амбразевичюс А. Теплообмен при закалке газов. Вильнюс, 1983. С. 192.
6. Paingankar A. M., Das A. K., Shirodkar S. V., Sreekumar K. P. and Venkatramani N. Prediction of electrical characteristics of a non-transfer arc-plasma torch using principles of dynamic similarity // Plasma sources Sci. Techn. 1999. Vol. 8. P. 100–109.
7. Valinčius V., Valatkevičius P., Pranevičius L.L. Elektros lanko panaudojimas dangoms formuoti // Elektronika ir elektrotechnika. 1999. Nr. 1(19). P. 26–29.
8. Valatkevičius P., Valinčius V., Kėželis R. The effect of gas inlet location and intensity on plasma torch characteristics // Mat. of 15 international symposium on plasma chemistry, Orlean. 2001. Vol. 4. P. 1585–1590.

Vilma Krušinskaitė, Vitas Valinčius, Pranas Valatkevičius

ELECTRIC AND THERMAL CHARACTERISTICS OF THE PLASMA TORCH EMPLOYED FOR PLASMA COATINGS DEPOSITION

S u m m a r y

Results of an experimental research of electric and thermal characteristics in dc linear plasma generator for the synthesis of plasma coatings are presented. The research was carried out employing a high-voltage (200–300 V) and low-current (120–280 A) two- and three-sectioned plasma torch. It has been found that location and flow rate distribution of plasma-forming gas has a significant influence on the plasma torch power, working stability, jet characteristics and efficiency.

The studies allow to design plasma generators of increasing quality of deposited plasma coatings.

The results are generalized employing similarity theory.

Key words: low temperature plasma, plasma torch, voltage-current characteristics

**Вильма Крушинскайте, Витас Валинчюс,
Пранас Валаткявичюс**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННОГО
ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА,
ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ СИНТЕЗА
ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ**

Резюме

Представлены экспериментальные результаты электрических и тепловых характеристик линейного секционированного плазменного генератора постоянного тока атмосферного давления, применяемого для

синтеза плазменных покрытий и модификации поверхностей конструкционных материалов. Результаты обобщены с помощью теории подобия и сопоставлены с результатами других авторов и с раньше опубликованными нашими данными. Определено влияние места вдува и расхода газа на характеристики подогревателя и струи. Установлено, что регулируя распределение и расход газа можно увеличить стабильность работы плазменного генератора, а также повлиять на качество и свойства нанесенных покрытий.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, плазмотрон, вольтамперные характеристики