
Šilumos mainai degant elektros lankui kanale

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

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

Straipsnyje nagrinėjami konvekciniai ir suminiai šilumos mainai tarp srauto ir dangų sintezei skirto nuolatinės srovės linijinio sekcijinio, fiksuoto lanko ilgio plazmos generatoriaus sienelių, keičiant kaitinamo oro kiekius, įpūtimo vietą bei intensyvumą. Tiriamų plazmotronų galia 30–75 kW, srovės stipris 175–245 A, kaitinamų dujų kiekis $(2,5\text{--}8,5) \cdot 10^{-3}$ kg/s, Reinoldso skaičius 4000–13000. Nustatytas elektros lauko stiprio kitimas kanale bei lanko spinduliavimo šilumos nuostoliai. Darbe, remiantis panašumo teorija, pateikti apibendrinti šilumos nuostoliai plazmotrone bei šilumos mainai anode, katode ir tarpinėse sekcijose. Gautos unikalios kriterijinės priklausomybės plačiai taikomos praktikoje.

Raktažodžiai: žemos temperatūros plazma, šiluminės charakteristikos, plazmotronas, šilumos mainai

1. ĮVADAS

Atmosferos slėgio plazmoje elektros lanko energija perduodama elektronams, kurie susidūrimų metu ją atiduoda sunkiosioms dalelėms. Dujos, išilgai aptekėdamos elektros lanką, įkaista iki aukštų temperatūrų, disocijuoja ir jonizuojasi. Taip gaunamas plazmos srautas, kuris pritaikomas pramonėje (plazmochemijoje, plazminėje metalurgijoje, plazminės medžiagų sintezės procesuose ir pan.) bei mokslinio tyrimo darbuose (modeliuojant kūnų judėjimą viršutiniuose planetų atmosferų sluoksniuose, tiriant atmosferos iškrovų plazmą, aukštatemperatūrius šilumos ir masės mainus ir t. t.).

Įvairių konstrukcijų ir galios plazmos generatorių – plazmotronų – parametrų kitimas darbo metu gali turėti neigiamą įtaką plazminio-technologinio proceso eigai bei gaminamos produkcijos kokybei. Todėl plazmos šaltinio parametrų kaitą būtina stabilizuoti naudojant neutralias sekcijas ir laiptuotą anodą. Projektuojant naujus plazmos generatorius, skirtus į reakcinę zoną patiektoms medžiagoms kaitinti, parenkant jų darbo ir aušinimo režimus, reikia žinoti ne tik vidutinius, bet ir vietinius ekstremaliomis sąlygomis dirbančių jų elementų šilumos nuostolius.

Svarbiausia plazmotrono charakteristika – įtampos perkritis tarp jo elektrodų, tačiau eksploatuojant įrenginį kaip šiluminės energijos šaltinį vien šio dydžio nepakanka. Būtina žinoti ne tik elektrines, bet ir šiluminės plazmos šaltinio charakteristikas, todėl greta elektros lauko stiprio (ELS) pasiskirstymo lanko kanale skaičiuojami ir šilumos mainai.

Šio darbo tikslas – apibendrinti šilumos mainus plazmotrono anode, katode ir tarpinėse sekcijose.

2. ELEKTROS LANKO DEGIMO KANALE YPATUMAI

Lankui sąveikaujant su jį aptekančiomis dujomis ir sienele, keičiasi dujų tekėjimo pobūdis, šilumos atidavimas bei ELS. Lanko elektrinių charakteristikų tyrimai leidžia nustatyti dujų tekėjimo, degant lankui, schemą [1]. Pradinėje kanalo dalyje, kurios ilgį sąlygoja šiluminio ir hidrodinaminio pasienio sluoksnio susijungimo vieta, lankas dega laminariniame sraute, ELS yra pastovus ir oro sraute sudaro $(1,0\text{--}1,5) \cdot 10^3$ V/m. Į reakcinę kamerą įpučiant dujas, srautas turbulizuoja, suardomas pasienio sluoksnis, o ELS, priklausantis nuo reakcinės kameros skersmens, srovės stiprio, dujų kiekio ir tekėjimo pobūdžio, magnetinio lauko poveikio bei papildomų dujų įpūtimo vietos ir intensyvumo, lanke padidėja net iki 10 kartų. Tinkamai paskirstant pagal lanko ilgį į kanalą įpučiamų dujų srautą, didinamas lanko ELS ir mažinami energijos nuostoliai, atsirandantys dėl konvekcinių šilumos mainų [2].

Lanko ilgis priklauso nuo plazmotrono konstrukcijos ir reakcinėje kameroje vykstančių procesų. Didžiausią įtaką jam turi elektros iškrovos reiškinys, vadinamas lanko šuntavimu, kuris gali būti didelės (iškrova vyksta tarp lanko stulpo ir anodo sienelės) ir mažos (iškrova vyksta tarp atskirų lanko dalių) amplitudės [3]. Vykstant didelės amplitudės šuntavimui, kartu kinta lanko ir dujų srauto parametrai, padidėja nestabilumas. Į reakcinę kamerą pateku-

sios dujos apteka lanką, kyla jų temperatūra, dėl to didėja lanko teigiamo stulpo storis dujų tekėjimo kryptimi. Intensyviai aušinant anodą, lankas negali pasiekti jo sienelės, todėl tarp sienelės ir lanko visuomet yra elektrai nelaidžių dujų sluoksnis, kurį suardžius vyksta šuntavimo procesai, sąlygojantys lanko ilgį. Nustatyta, kad srovės tankis lanke yra 10^4 – 10^7 , priekatodinėje lanko dalyje 10^8 – 10^{10} , o anodinėje 10^6 – 10^9 A/m². Atmosferos slėgio plazmos lanko priekatodinės zonos ilgis yra apie 10^{-6} m, t. y. lygus keletui dalelės laisvojo kelio ilgių [4, 5]. Tai rodo, kad galima termoelektroninė elektronų emisija iš katodo.

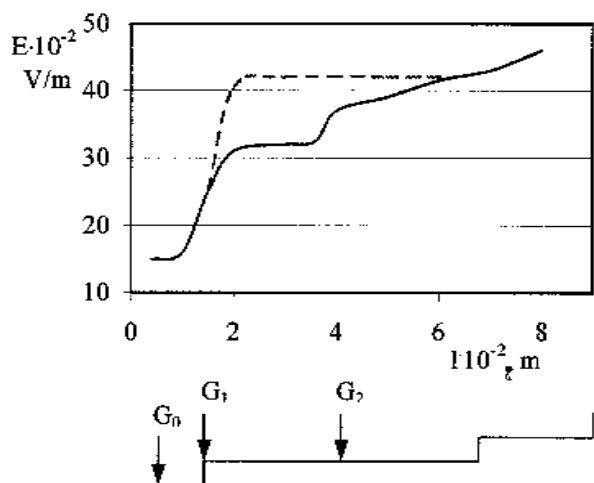
Įtampos kritimas prieekatrodinėje zonoje $U_1 = 10$ – 15 V. Pagal linijinę plazmotrono schemą, kur lankas stabilizuojamas aptekamų dujų (oro) sūkuriumi, ELS, esant laminariniam tekėjimui, sudaro apie 1500 V/m. Pereinamojoje į turbulentinį tekėjimą srityje ELS aprašomas lygtimi [4]

$$E \cdot d = 3,26 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{G}{d}\right)^{0,15} \cdot (pd)^{0,13} \left[355 - 10^{-2} \cdot \left(\frac{I}{d}\right) + 5,13 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{I}{d}\right)^2 \right], \quad (1)$$

o turbulentinėje –

$$E \cdot d = 115 \cdot \left(\frac{I}{d}\right)^{-0,23} \cdot \left(\frac{G}{d}\right)^{0,47} \cdot (pd)^{0,2}. \quad (2)$$

Kai oras į plazmotrono kanalą įpučiamas koncentruotai (punktyrinė linija), ELS yra pastovus, tačiau, esant paskirstytam pagal lanko ilgį įpūtimui (tiesi linija), jis nežymiai didėja (1 pav.). Nagrinėjamiems plazmotronams, kurių lanko parametrai apibendrinti



1 pav. Elektros lanko stiprio pasiskirstymas plazmotrono kanale. G_0 , G_1 , G_2 – kaitinamo oro kiekiai prie katodo, tarpinio žiedo ir anodo kg/s

[6], priklausomai nuo oro įpūtimo vietos ir kiekio, lanko anodinės dėmės padėtis kinta visame anodo už laipto ilgyje. Esant mažiems (2 – $3 \cdot 10^{-3}$ kg/s) oro kiekiams, lankas dega siaurojoje anodo zonoje.

3. LANKO ŠILUMOS ATIDAVIMAS PLAZMOS GENERATORIAUS IR JO ELEMENTŲ SIENELĖMS

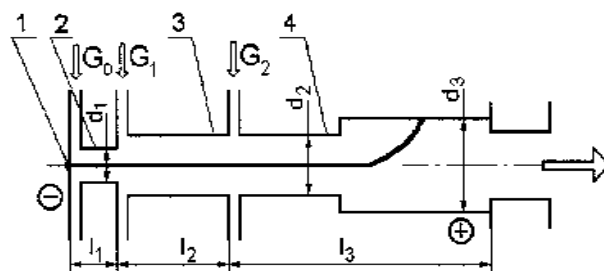
Elektrolankiniame plazmos generatoriuje dėl lanko, dujų ir sienelių sąveikos vyksta sudėtingi šilumos masės mainai. Elektros lanko energija, tekant elektros srovei jonizuotomis dujomis, virsta šiluma, kuri perduodama srautui, kanalo sienelėms ir elektrodams, tačiau naudinga yra tik srautui perduota energija.

Nagrinėjamų plazmotronų, kurių charakteristikos ir geometriniai parametrai aprašyti [6], schemas pateiktos 2 pav. Priklausomai nuo plazmos generatoriaus konstrukcijos, dujų rūšies ir tekėjimo režimo, lanko temperatūra yra $(5$ – $15) \cdot 10^3$ K, Reinoldso skaičius $(1$ – $15) \cdot 10^4$, slėgis 10^5 – 10^7 Pa. Esant tokioms sąlygoms, šilumos mainų mechanizmas plazmos šaltinio kanale labai sudėtingas. Šilumos perdavimas vyksta:

- 1) laidumu, elektrodų aplinkoje radialine lankui kryptimi;
- 2) konvekcija, nuo įkaitusių dujų radialine ir ašine kryptimis;
- 3) spinduliavimu, ypatingai pradiniame išilgai aptekamo lanko ruože;
- 4) difuzija, dėl daugiakomponentės jonizuotų dujų sudėties.

Tekant šimtų ar tūkstančių amperų lanko srovei, sustiprėja savasis magnetinis laukas, kuris gali iškreipti tiesės pavidalo lanką ir taip paveikti šilumos mainus.

Teoriškai aprašant šilumos mainų procesus kanale, priimama, kad lanko plazmoje egzistuoja termodinaminė pusiausvyra, o lankas traktuojamas kaip vieninga visuma. Todėl lygtys, aprašančios lanko dinamiką [7], sujungia termodinamikos, masės tvermės, impulso perdavimo, energijos (įvertinant Lorencio jėgos



2 pav. Sekcinio plazmotrono schema. 1 – katodas; 2 – lanko uždegimo žiedas; 3 – neutrali sekcija (trijų sekcijų plazmotrone); 4 – laiptuotas anodas

darbą), šilumos mainų spinduliavimu ir energijos tiekimo lygtis:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} \vec{V} = 0, \quad (3)$$

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\operatorname{grad} p + \vec{j} \times \vec{B} + \rho \vec{g} + \rho_e \vec{E} + \Psi(\mu), \quad (4)$$

$$\rho \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} |\vec{V}|^2 + h \right) - \frac{dp}{dt} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \Phi + q_r + \vec{j} \vec{E}. \quad (5)$$

Prie šių lygčių būtina prijungti Maksvelo lygtis, nusakančias elektrinių ir magnetinių reiškinių sąryšį, kurių supaprastinta išraiška yra:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{ir} \quad (6)$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_e \vec{j}. \quad (7)$$

Jeigu magnetinė indukcija nestipri, indukuoto elektrinio lauko kanalo viduje galima nepaisyti. Tuomet Omo dėsnį galima užrašyti:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}. \quad (8)$$

Lygčių sistemą užbaigia dujų būklės lygtis

$$p = r R_d T \quad (9)$$

ir pernešimo koeficientų λ , μ , σ , q_r bei termodinaminių dujų savybių c_p , R_d , h priklausomybės nuo temperatūros.

Anksčiau pateiktą sudėtingą lygčių sistemą iš principo galima išspręsti, tačiau tai pareikalautų nepaprastai daug pastangų, sudėtingų programų ir milžiniškų skaičiavimo technikos išteklių. Praktikoje kur kas paprasčiau eiti eksperimentiniu keliu bendrą atvejį pritaikant konkrečioms lanko degimo sąlygoms.

Taigi, elektros lanko, esančio srauto ašyje, tekėjimas kanale dažniausiai aprašomas naudojant pasienio sluoksnio lygtis, tariant, kad kanale esantis lankas netrikdo srauto [8]. Minėta lygčių sistema supaprastėja ir ją lengviau išspręsti, tačiau atsiranda daugybė veiksnių, kuriuos reikia įvertinti remiantis vien empiriniais stebėjimais.

Šiame darbe naudojamų plazmos generatorių su tarpiniu žiedu ir be jo lankas dėl dujų srauto sukimosi yra spiralės formos, todėl aptekamas tiek ašine, tiek radialine kryptimis. Vadinas, jo būdingosios zonos išsidėsčiusios netolygiai ir matmenys nežinomi. Atstumas nuo lanko ašinės linijos iki sienelės kinta, todėl, skaičiuojant vietinius šilumos mainus įvairiuose kanalo skerspjūviuose, būtina žinoti ne tik lanko konfigūraciją laiko atžvilgiu, bet ir jo pasi-

skirstymo, sukimosi dažnio bei skersmens priklausomybę nuo aptekančiųjų dujų dinaminių charakteristikų. Dėl skaičiavimo sudėtingumo atsiranda daugybė prielaidų ir supaprastinimų, dėl kurių nukenčia modelio tikslumas, bei papildomų problemų, kurios sprendžiamos empiriniais metodais, atsižvelgiant į (3)–(9) lygtis. Paaiškėja, kad teoriškai tiriant elektros lanko šiluminius procesus kanaluose, gaunami tik vidutiniai lanko šiluminių charakteristikų dydžių pasiskirstymai. Procesų matematiniams modeliams patikslinti būtini eksperimentiniai tyrimai, kuriems šiame darbe teikiama pirmenybė.

Techniškai skaičiuojant plazmos generatorius, naudojami pakankamai tikslūs eksperimentiniai duomenys, kurie apibendrinti remiantis panašumo teorija [3]. Tam tikrai plazmos generatorių grupei sudaromos empirinės ir pusiau empirinės priklausomybės, kuriomis remiamasi tolimesniuose tyrimuose. Atlikti tyrimai [1, 6, 9] parodė, kad ne tik elektrinės, bet ir šiluminės lanko charakteristikos geometriškai panašiuose generatoriuose, naudojant panašumo teoriją, aprašomos tais pačiais kriterijiniais kompleksais. Tiriant šiluminės lanko charakteristikas papildomai reikia įtraukti bedimensinį parametą l/d_0 , įvertinantį šilumos mainų intensyvumą ištekėjimo kameroje.

Katalizinių ir tribologinių dangų sintezei sukurtame plazmos generatoriuje elektros lauko energija virsta šiluma, kuri laidumu, konvekcija ir spinduliavimu perduodama katodo mazgui, kaitinamųjų dujų srautui, anodui ir neutraliam žiedui:

$$Q_{pl} = Q_k + Q_{p.s} + Q_{t.s} + Q_a. \quad (10)$$

Pagrindinę šiluminės energijos dalį elektrodams perduoda lanko dėmė, kurios perduodamas šilumos srautas apytikriai nustatomas [1]:

$$Q_1 = Q_k + Q_a \gg I(U_1 \pm \phi). \quad (11)$$

Katodui ϕ yra neigiamas, o anodui – teigiamas.

Šilumos srautas lanko katodinėje dėmėje aprašomas lygtimi [5]:

$$Q_k = Q_{ek} + U_0 I, \quad (12)$$

o anodinėje –

$$Q_a = 12I. \quad (13)$$

Hafnio katodui $U_0 = 2,34$, $Q_{ek} = 585$.

Šilumos srautą į kanalo sienes, esant vidiniams energijos šaltiniams, galima nustatyti pagal [6]:

$$St = f \left(\frac{I^2}{Gd \cdot \sigma_e \cdot h}, \operatorname{Re}, Kn, \frac{l}{d} \right), \quad (14)$$

$$\frac{4l}{d} St = \frac{1-\eta}{\eta} = \frac{Q_{pl}}{P}, \quad (15)$$

$$\frac{P}{G} = \frac{Ud}{I} \cdot \frac{I^2}{Gd} \quad \text{ir} \quad \frac{Q_{pl}}{P} = \frac{Q_{pl}}{G} \cdot \left(\frac{P}{G}\right)^{-1}. \quad (16)$$

Iš anksčiau pateiktų išraiškų matyti, kad

$$\frac{Q_{pl}}{G} = f\left(\frac{P}{G}; \frac{G}{d}; \frac{l}{d}\right). \quad (17)$$

Išmatavus plazmotronų galią bei kaitinamų dujų kiekį, nustatomas dujų greitis, temperatūra ir šilumos nuostoliai su jį aušinančiu vandeniu [6].

Spinduliavimu plazmotrono sienelėms perduodamas degančio lanko šilumos srautas nepriklauso nuo kaitinamų dujų kiekio, tačiau jam turi įtakos tekėjimo pobūdis bei elektros srovė. Jis išreiškiamas priklausomybe

$$Q_{sp} = 11 \cdot I^{1,5}, \quad (18)$$

gerai sutampančia su [4] rezultatais.

Projektuojant plazmos generatorius, skaičiuojant jų aušinimo režimą, reikia žinoti šilumos srautų į katodą, anodą, priekatodinę ir tarpinę sekcijas pasiskirstymą, kuris apibendrinamas naudojant kriterijinius kompleksus.

4. GAUTI REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

Šilumos mainai linijiniame plazmos generatoriuje, esant mišriam lanko aptekėjimui, gerokai intensyvesni už šilumos mainus išilgai aptekant lanką, nes:

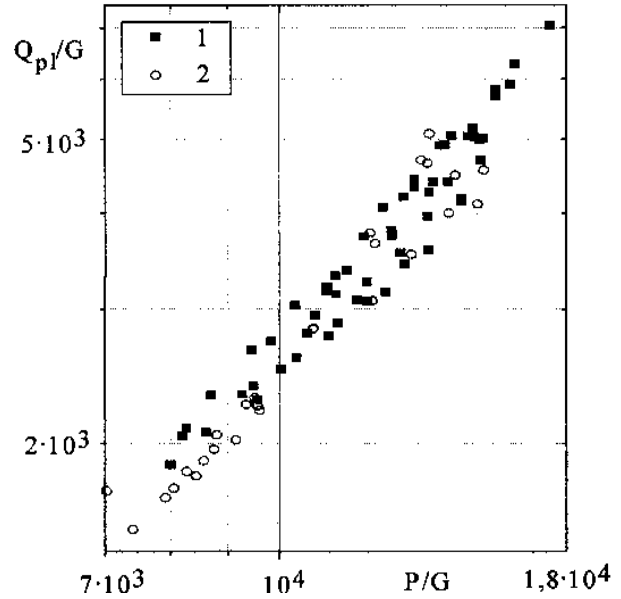
1) tangentiškai įpučiant dujas, lankas „sukasi“ ir įgauna spiralės formą. Dėl to jis pailgėja, o jo išorinio paviršiaus plotas tame pačiame kanalo ilgyje padidėja;

2) dėl iškreiptos lanko formos jau pirmajame pereinamajame ruože vyksta skersinis jo aptekėjimas, kurį sąlyginai galima sulygtinti su cilindro formos strypo aptekėjimu. Šiuo atveju labai padidėja turbulentiškumo laipsnis, suintensyvėja srauto turbulentinis maišymasis ir konveciniai šilumos mainai.

Pagal pateiktus rezultatus (3 pav.), šilumos mainus minėtame plazmotrone galima aprašyti priklausomybe

$$\frac{Q_{pl}}{G} = 4,3 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{P}{G}\right)^{1,6} \cdot \left(\frac{l}{d_0}\right)^{0,4}. \quad (19)$$

Šilumos nuostoliai linijinio plazmotrono su neutralia sekcija ir be jos kanale skiriasi ne daugiau kaip 3%, nors pagal anksčiau išreiktą pirmąjį teiginį, šilumos



3 pav. Apibendrintas šilumos atidavimas linijiniame sekcijiniame plazmos generatoriuje. 1 – su papildoma sekcija, 2 – be papildomos sekcijos

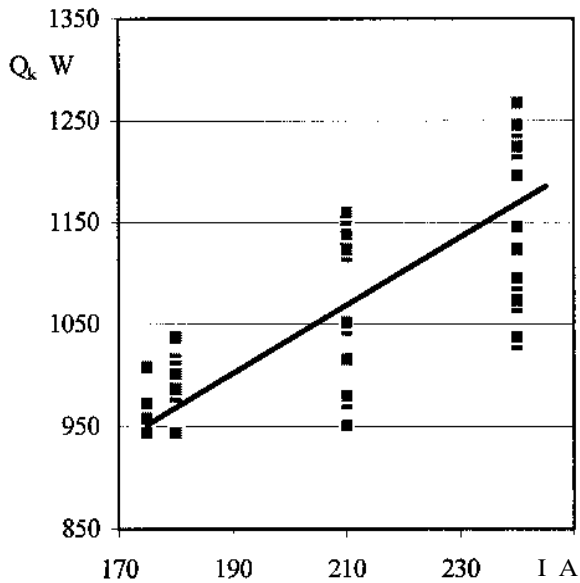
srautas turėtų padidėti. Taip nėra dėl to, kad lanko antrasis pereinamasis ir pagrindinis ruožai daug trumpesni už pradinį ir pirmąjį pereinamąjį, o neutrali sekcija yra pirmųjų dviejų ruožų zonoje. Žinant plazmotrono galią ir kaitinamo oro kiekį, pagal 3 pav. ir (19) lygtį galima apytiksliai nustatyti visus reikalingus darbo parametrus. Kriterijus l/d_0 įvertina geometrinę tarpelektrocinę erdvės formą bei lanke vykstančius procesus. Priklausomai nuo dujų įpūtimo vietos ir intensyvumo keičiasi lanko struktūra, kuri turi įtakos šilumos nuostoliams plazmotrono elementuose.

Nagrinėjant šilumos atidavimą į hafnio katodą, pastebima, kad jame esanti lanko dėmė daug mažesnė nei anodinė ir užima ne visą jo paviršių, todėl nepriklauso nuo elektrodo skersmens. Katodinės dėmės zonoje katodo medžiaga išsilydo, todėl paviršiaus temperatūra lygi hafnio lydymosi temperatūrai. Dalį šiluminės energijos katodo emiteris gauna spinduliavimu bei laidumu iš lanko. Šilumos srautas į hafnio katodą (4 pav.) aprašomas priklausomybe

$$Q_k = 520 + 2,67I. \quad (20)$$

Kadangi šilumos srautas į katodo emiterį labai sutelktas, o aušinantis vanduo liečiasi su labai dideliu katodo mazgo paviršiumi, sunku tiksliai nustatyti jo atiduodamą šilumos kiekį. Dėl šios priežasties 4 pav. pavaizduoti rezultatai „išsibarstę“. Ypač tai akivaizdu tekant stipresnei lanko srovei (>200 A).

Gautus Q_k rezultatus galima aprašyti naudojant energetinį kriterijų:



4 pav. Šilumos srautas į emiterį katodinės dėmės zonoje

$$\frac{Q_k}{P} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{I^2}{Gd_2} \right)^{0,15} \cdot \left(\frac{l}{d_0} \right)^{0,6} \quad (21)$$

Nežymiai padidėjus slėgiui, šilumos srautas ilgesniame plazmotrone taip pat padidėja, nors priekatodinėje lanko dalyje buvo įpučiama $0,54 \cdot 10^{-3}$ kg/s oro.

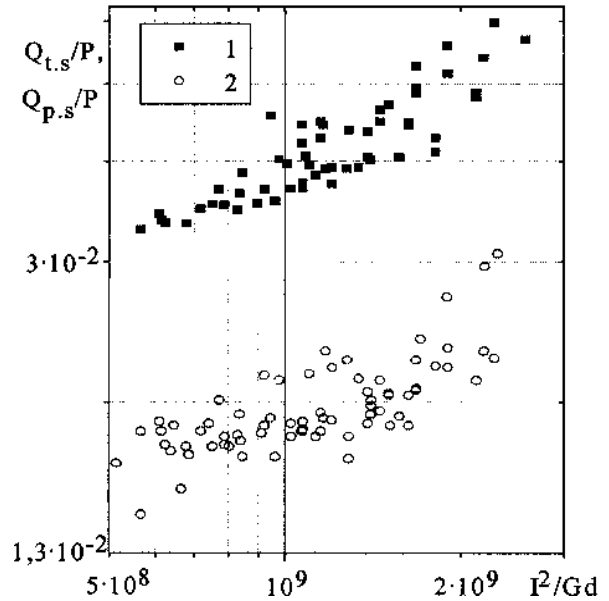
Šilumos srautas į lanko uždegimo ir tarpinę sekcijas susideda iš konvekcinų šilumos mainų ir šilumos nuostolių dėl lanko spinduliavimo. Suminiai šilumos srautai (5 pav.) aprašomi lygtimis:

$$\frac{Q_{p.s}}{P} = 4,81 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{I^2}{Gd_2} \right)^{0,15} \cdot \left(\frac{l}{d_0} \right)^{0,25} \quad \text{ir} \quad (22)$$

$$\frac{Q_{t.s}}{P} = 1,03 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{I^2}{Gd_2} \right)^{0,4} \quad (23)$$

Šilumos srautas į tarpinę sekciją 2,2 karto didesnis, palyginti su srautu į uždegimo sekciją, nors tarpinės sekcijos paviršius didesnis tik 1,9 karto. Šilumos kiekis priekatodinėje sekcijoje mažėja dėl šaltų dujų uždangos, o tarpinėje sekcijoje didėja dėl dujų maišymosi ir greitesnio dujų srauto.

Šilumos atidavimas plazmotrono anode susideda iš nuostolių dėl lanko sąlyčio su sienele (lanko dėmės), konvekcinų šilumos mainų ir lanko spinduliavimo. Nuostoliai lanko dėmėje sudaro 2–3 kW, bet šilumos srautas labai sutelktas (apie 100 kW/cm²), todėl reikia specialių sienelių apsaugos priemonių. Anodo sienelės apsaugomas jas intensyviai aušinant

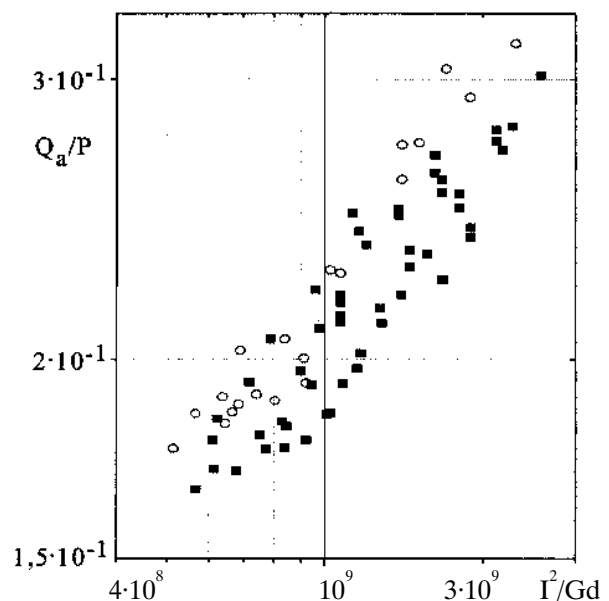


5 pav. Šilumos srautas tarpinėje (1) ir priekatodinėje (2) sekcijose

ir lanką sukant magnetiniu lauku arba dujų srautu. 6 pav. pavaizduoti suminiai šilumos nuostoliai anode aprašomi priklausomybe:

$$\frac{Q_a}{P} = 2,48 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{I^2}{Gd_2} \right)^{0,36} \cdot \left(\frac{l}{d_0} \right)^{0,7} \quad (24)$$

Plazmos generatoriaus su papildoma sekcija rezultatai išsidėsto 5% žemiau rezultatų be papildomos sekcijos, nes, sutrumpėjus kanalui, sienelėms atiduodamas beveik toks pats šilumos kiekis.



6 pav. Suminis šilumos atidavimas plazmotrono anodui. Žymėjimai 3 pav.

Eksperimentinių duomenų analizė rodo, kad šilumos srauto tankis į plazmotrono elementus yra skirtingas ir sudaro $4,8-7 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$ į katodą, $1,8-4 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$ į lanko uždegimo sekciją, $2,5-5 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$ į tarpinę sekciją ir $4-6,5 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$ į anodą.

Atsižvelgiant į anksčiau aprašytus atvejus, suminius šilumos nuostolius plazmotrono sienelėse galima aprašyti priklausomybe [5]:

$$\frac{1-\eta}{\eta} = c \cdot \left(\frac{I^2}{Gd_2} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{G_1}{G} \right)^{0,12} \cdot \left(\frac{G}{d_2} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{d_2}{I} \right) \cdot \left(\frac{l}{d_0} \right)^{0,95}, \quad (25)$$

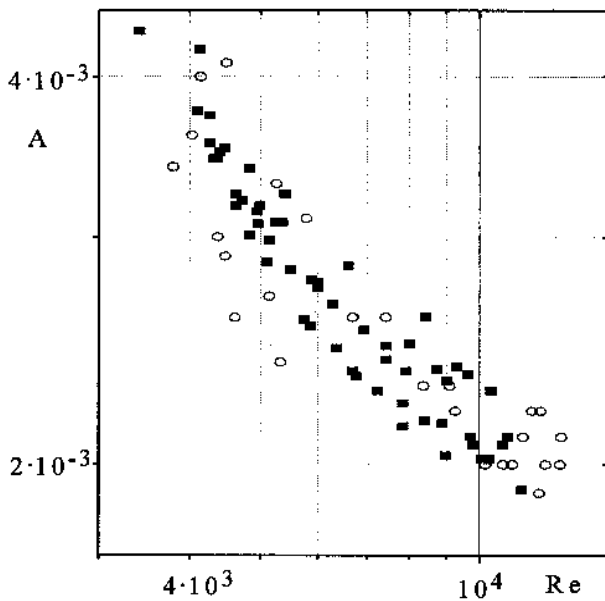
iš kurios gaunama:

$$St = c \cdot \left(\frac{I}{G} \right)^{0,6} \cdot \left(\frac{G_1}{G} \right)^{0,12} \cdot \left(\frac{l}{d_0} \right)^{0,95}. \quad (26)$$

Plazmotronui su tarpine sekcija $c = 0,71 \cdot 10^{-4}$, o be tarpinės sekcijos – $0,68 \cdot 10^{-4}$. Šie rezultatai gerai sutampa su anksčiau gautaisiais [1, 4].

Konvekciniai šilumos mainai tarp dujų srauto ir plazmotrono sienelių apibendrinti, remiantis išraiška

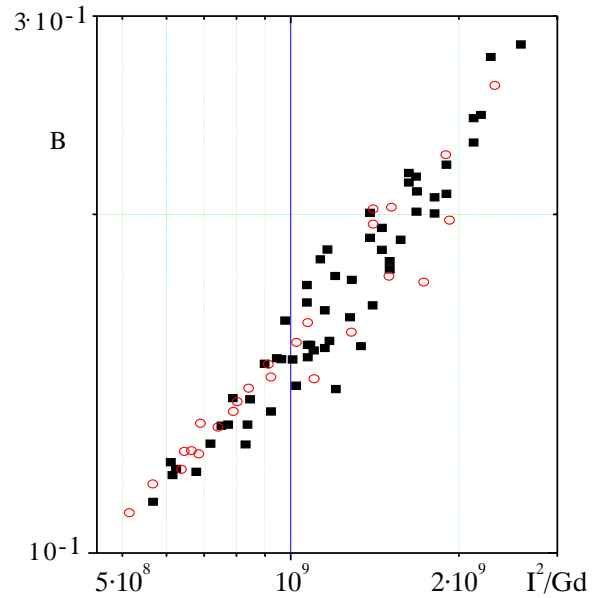
$$St = c \cdot Re^m \cdot \left(\frac{G_1}{G} \right)^{0,12} \cdot \left(\frac{l}{d_0} \right)^{0,25}. \quad (27)$$



7 pav. Apibendrinti konvekciniai šilumos mainai plazmotrone. Žymėjimai 3 pav.

$$A = St \cdot \left(\frac{G_1}{G} \right)^{-0,12} \cdot \left(\frac{l}{d_0} \right)^{-0,25}$$

klampumas, skaičiuojant Re , nustatomas pagal ištekiančių iš reakcinės kameros dujų temperatūrą. Kai $Re = 6000$, pastebimas lūžis (7 pav.), t. y. srautas teka pereinamojoje į turbulentinę srityje. Plazmos generatoriui su tarpine sekcija iki lūžio $c = 6,23$, už jo $c = 0,07$, o be tarpinės sekcijos iki lūžio $c = 2,49$, už jo $c = 0,024$. Laipsnio rodiklis m abiem atvejais iki lūžio lygus $-0,9$, o už lūžio – $-0,36$.



8 pav. Naudojant energetinį kriterijų apibendrinti konvekciniai šilumos mainai tarp dujų srauto ir plazmos generatoriaus sienelių. Žymėjimai 3 pav.

$$B = St \cdot \left(\frac{I}{d_2} \right)^{0,4} \cdot \left(\frac{G_1}{G} \right)^{-0,12} \cdot \left(\frac{l}{d_0} \right)^{-0,25}$$

Skaičiuojant konvekcinius šilumos mainus galima naudoti energetinį kriterijų (8 pav.). Tuomet rezultatai aprašomi:

$$St = 1,76 \cdot 10^{-6} \left(\frac{I^2}{Gd_2} \right)^{0,55} \cdot \left(\frac{I}{d_2} \right)^{-0,4} \cdot \left(\frac{G_1}{G} \right)^{0,12} \cdot \left(\frac{l}{d_0} \right)^{0,25}. \quad (28)$$

Šią ir anksčiau minėtas priklausomybes galima taikyti visiems panašios konstrukcijos plazmos generatoriams. Jos yra universalios tam tikro tipo plazmos šaltiniams ir nusako pastarųjų efektyvumą. Iš lygčių matyti, jog didžiausią įtaką šilumos mainų intensy-

vumui kanale su elektros lanku turi juo tekanti srovė. Vadinasi, plazmos srauto entalpija yra tiesiog proporcinga kanale tekančios srovės stipriui.

5. IŠVADOS

1. Šilumos nuostoliai linijiniame plazmotrone su neutralia sekcija yra tik 3–5% didesni už nuostolius plazmotrone be papildomos sekcijos.

2. Šilumos mainai intensyviausi anode dėl lanko dėmės buvimo ir konvekcijos. Jie aprašomi (24) priklausomybe ir sudaro 75% bendrų šilumos nuostolių.

3. Šilumos srautas į tarpinę sekciją 2,2 karto didesnis, palyginti su uždegimo sekcija. Įpučiant papildomą oro kiekį pradinės lanko degimo zonos srityje, šilumos mainai tarpinėje sekcijoje mažėja.

4. Konvekcinių šilumos mainų intensyvumas plazmos generatoriuje tiesiog proporcingas elektros lauko ir tekančios srovės stipriui bei aprašomas (21) priklausomybe.

5. Norint pagerinti plazmos generatoriaus efektyvumą, būtina mažinti šilumos mainus spinduliavimu tarp elektros lanko ir plazmotrono anodo sienelių.

Tyrimus remia Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas.

Pažymėjimai

B – magnetinė indukcija T; d_0 – ištekėjimo kameros skersmuo m; d_2 – reakcinės kameros skersmuo m; E – elektros lauko stipris V/m; G – bendras kaitinamo oro kiekis kg/s; G_1 – kaitinamo oro kiekis prie tarpinio žiedo (trijų sekcijų plazmotronui) arba prie anodo (dviejų sekcijų plazmotronui) kg/s; h – entalpija J/kg; I – lanko srovės stipris A; j – elektros srovės tankis, A/m²; l – iškrovos kanalo ilgis m; P – plazmotrono galia kW; Pr – Prandtlio kriterijus; p – slėgis Pa; Re – Reinoldso kriterijus; R_d – dujų pastovioji J/kmolK; St – Stantonio kriterijus; t – laikas s; U – lanko įtampa V; U_0 – įtampos kitimo katode koeficientas, priklausantis nuo jo medžiagos; U_1 – potencialų skirtumas prie elektrodų V; \vec{V} – greičio vektorius; Q – šilumos nuostoliai W; Q_{ek} – ekvivalentinis šilumos srautas W; λ – šilumos laidumo koeficientas W/mK; μ – dinaminis klampis Ns/m²; μ_e – magnetinė aplinkos skvarba H/m; σ – specifinė elektrinė varža S/m; σ_e – elektrinis laidumas 1/Ωm; ρ – dujų tankis, kg/m³; ρ_e – elektrinių krūvių tankis C/m³; φ – elektronų emisijos iš elektrodų paviršiaus darbas; Φ – disociacijos funkcija.

Indeksai: a – anodas; k – katodas; pl – plazmotronas; p.s – priekatodinė sekcija; r – spinduliavimas; t. s – tarpinė sekcija.

Gauta
2002 09 16

Literatūra

1. Жуков М. Ф., Коротеев А. С., Урюков Б. А. Прикладная динамика термической плазмы. Новосибирск, 1975. С. 296.
2. 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.
3. Даутов Г. Ю., Дзюба В. Л., Карп И. Н. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами. Киев, 1984. С. 168.
4. Жуков М. Ф., Аньшаков А. С., Засыпкин И. М. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками. Новосибирск, 1981. С. 222.
5. Основы расчета плазмотронов линейной схемы / Под. ред. М. Ф. Жукова. Новосибирск, 1979. С.148.
6. Krušinskaitė V., Valinčius V., Valatkevičius P. Nuolatinės srovės generatoriaus, naudojamo formuojant plazmines dangas, elektrinės ir šiluminės charakteristikos // Energetika. 2002. Nr. 2. P. 36–41.
7. Jones G. R., Fang M. T. C. The Physics of High-Power Arcs // Rep. Prog. Phys. 1980. Vol. 43. P. 1415–1465.
8. Topham D. R. The electric arc in constant pressure axial gas flow // J. Phys. D: Appl. Phys. 1971. Vol. 4. P. 1114–1125.
9. Жидович А. И., Кравченко С. К., Ясько О. И. О механизме теплообмена в сильноточной электрической дуге, стабилизированной газовым вихрем // Явления переноса в низкотемпературной плазме. Минск, 1969. С. 89–95.

Vilma Krušinskaitė, Vitas Valinčius, Pranas Valatkevičius

HEAT TRANSFER IN THE ARC DISCHARGE CHANNEL

S u m m a r y

An experimental approach is presented to the analysis of thermal characteristics of a line-arc plasma source with a hot cathode and step-formed anode. The experiment is performed in air at atmospheric pressure for discharge currents 175–245 A and voltage 200–250 V. The gas injection location, flow distribution and rate dependent plasma source heat transfer characteristics, which include thermal conduction, radiation and convection were generally employed theory of similarity.

Key words: low temperature plasma, thermal characteristics, plasma torch, heat transfer

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

ТЕПЛООБМЕН В КАНАЛЕ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ

Резюме

Представлены результаты конвективного и суммарного теплообмена в стенке линейного секционированного плазмотрона с фиксированной длиной дуги, когда меняются место, расход и интенсивность вдува нагреваемого газа. Мощность плазмотронов 30–75 кВт, сила тока 175–245 А, расход

нагреваемого газа $(2,5–8,5) \cdot 10^{-3}$ кг/с, число Рейнольдса 4000–13000.

Определены изменение напряженности электрического поля дуги в канале, а также тепловые потери из-за излучения дуги. С помощью теории подобия обобщены тепловые потери в катод, в анод и в межэлектродную вставку. Полученные уникальные критериальные зависимости применяются на практике для расчета рабочих режимов при нанесении плазменных покрытий.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, тепловые характеристики, плазмотрон, теплообмен