

## WARUNKI WYTWARZANIA LAMINARNEJ STRUGI PLAZMOWEJ ZA POMOCĄ ŁUKU ŚCIŚNIĘTEGO

### STRESZCZENIE

W artykule podano warunki powstawania i stabilizacji laminarnej strugi plazmowej na wyjściu kanału wyladowczego plazmotronu łukowego. Rozpatrzono przypadki różnego wykonania konstryktora sekcjonowanego i prace plazmotronów z różnymi gazami plazmotwórczymi. Określono racjonalne wartości prądu roboczego i strumienia masy gazu, zapewniające długą żywotność aparatu i stabilność strugi plazmowej. Utworzono model matematyczny łuku ściśniętego i określono rozkład strumieni ciepłych w kanale plazmotronu. Obliczono parametry generatora strugi laminarnej w stanie krytycznym rozpadu strugi.

**Słowa kluczowe:** łuk elektryczny, plazma termiczna, plazmotron laminarny

### GENERATE CONDITIONS FOR LAMINAR PLASMA JET WITH THE USE OF CONSTRICTED ARC

The paper describes conditions for generation and stabilization of laminar plasma jet on the channel discharge outlet in an arc plasmatron. Different cases of making sectioned constrictor and work regimes for plasmatrons with different plasmagenic gases were considered. The rational values of operating current and gas mass flow that assures long life of the apparatus and the stability plasma jet were defined. The model of the constriction arc was built and distribution of heat fluxes in the plasmatron channel was determined. Parameters of the laminar jet generator in the critical state of the break-up jet were calculated.

**Keywords:** electric arc, thermal plasma, laminar plasma torch

### 1. WSTĘP

Laminarna struga plazmowa stanowi nadzwyczaj efektywne narzędzie współczesnej technologii plazmowej. Wysokie wartości temperatury średniomasowej i duża zdolność plazmy do penetrowania otaczającego środowiska gazowego odsłaniają szerokie możliwości wykorzystania jej w różnych dziedzinach technologii (w cięciu, spajaniu, napawaniu, hartowaniu, kształtowaniu itd.) [6, 9]. Wytwarzanie strugi laminarnej za pomocą plazmotronu łukowego strugowego napotyka jednak na pewne trudności fizyczne. Na wyjściu kanału dyszy nie może występować struktura gazodynamiczna w postaci dwóch koncentrycznych strug laminarnych, przysiosowego przepływu plazmy i zewnętrznego przepływu „zimnego” gazu. Jeśli istnieje rozwinięta warstwa przyścienna przepływającego gazu, nawet laminarnego, to powstająca struktura staje się niestabilna. Obecność wysokich gradientów temperatury i intensywne zaburzenia gazodynamiczne na granicy rozdzielenia tych przepływów prowadzą do rozpadu laminarnej strugi plazmowej od razu na wyjściu kanału dyszy plazmotronu. Cały przekrój otworu wyjściowego kanału wyladowczego lub dyszy plazmotronu strugowego powinna więc zapełniać laminarna struga plazmowa, utworzona przez kolumnę łuku elektrycznego. Łuk w przekroju kanału wyjściowego powinien znajdować się w stanie ściśnięcia ściankami.

### 2. WARUNKI POWSTAWANIA I STABILIZACJI LAMINARNEJ STRUGI PLAZMOWEJ NA WYJŚCIU KANAŁU WYLADOWCZEGO

Stopień ściśnięcia łuku w kanale cylindrycznym można określić specjalnym wskaźnikiem

$$\delta_r = \frac{r_a}{r_e} = \frac{r_a}{d_e/2} \quad (1)$$

gdzie:

$r_a$  – promień łuku,  
 $r_e$  – promień kanału wyladowczego.

Osiągana wartość  $\delta_r$  powinna być nie mniejsza od tej, której odpowiada grubość warstwy ściśnięcia  $\Delta_r$  znacznie mniejsza od grubości warstwy przyściennej dynamicznej  $\Delta_m$  przy ściance kanału wyladowczego [1]. W tym przypadku duża lepkość gazu w warstwie ściśnięcia jest spowodowana wartościami temperatury bliskimi izotermie  $T_p$  na powierzchni łuku.

W opisie ustalonych pól temperatury w poruszających się mediach stosuje się liczbę Pecleta. Jeśli jej wartość  $Pe < 250$ , to w warstwie gazu między kolumną łuku i ściankami kanału wyladowczego przeważa proces molekularnej przewodności cieplnej nad konwekcyjnym przenoszeniem ciepła. To umożliwia przyjęcie poniższych zależności do obliczenia temperatury gazu w warstwie:

$$T_r = \Lambda^{-1}(S_r(T)); \quad S_r = \frac{S(T_p) - S(T_w)}{\ln\left(\frac{S(T_p)}{S(T_w)}\right)} \quad (2)$$

gdzie:

$S$  – potencjał strumienia cieplnego,  
 $T_r$  – temperatura gazu na wejściu kanału wyladowczego,  
 $T_w$  – temperatura gazu na wejściu w kanał wyladowczy ( $T_w \approx 700$  K).

\* Politechnika Częstochowska

Grubość warstwy przyściankowej  $\Delta_m$  jest wprost proporcjonalna do pierwiastka z lepkości  $\eta$  gazu w warstwie ściśnięcia

$$\Delta_m \sim \sqrt{\eta(T_r)} \quad (3)$$

W związku z tym stopień ściśnięcia łuku, potrzebny do zamykania przepływu gazu w warstwie przyściennej, będzie określony warunkiem:

$$\delta_r = \frac{2r_a}{d_e} \sim \frac{1}{\Delta_r}; \quad \Delta_r = \frac{d_e}{2} \cdot (1 - \delta_r) < \Delta_m \quad (4)$$

Rozważmy przykład łuku płonącego w argonie, w którym eksperymentalnie ustanowiono wartość stopnia ściśnięcia  $_{Ar}\delta_r$ , uzyskując maksymalną stabilność laminarnej strugi na wyjściu plazmotronu strugowego. Jeśli łuk będzie płonął w innym gazie, a chcemy uzyskać też strugę laminarną, to potrzebny stopień ściśnięcia łuku może być obliczony ze wzoru

$$_{Gaz}\delta_r = 1 - (1 - _{Ar}\delta_r) \cdot \frac{\sqrt{\eta_{Gaz}(T_r)}}{\sqrt{\eta_{Ar}(T_r)}} \quad (5)$$

W pracy [3] pokazano wyniki badań w postaci charakterystyk elektrycznych i cieplnych plazmotronu strugowego, generującego stabilną strugę laminarną o długości ponad 0,5 m. Kanał wyladowy plazmotronu miał średnicę  $d_e = 6$  mm, prąd łuku, z którym osiągnano stabilny stan generowania strugi laminarnej, wynosił  $I = 162$  A. Na podstawie metodyki opisaney w [4, 5], można obliczyć  $_{Ar}\delta_r = 0,963$ , a ze wzoru (5) można obliczyć potrzebny stopień ściśnięcia łuku  $_{Gaz}\delta_r$ , płonącego w gazie o innym składzie chemicznym (tab. 1).

W tabeli 2 zamieszczono wyniki obliczenia maksymalnie dopuszczalnego stopnia ściśnięcia łuku ściankami kanału o średnicy  $d_e = 6$  mm w dwóch stanach obciążenia cieplnego ścian.

Stan „A” odpowiada normalnej konstrukcji konstryktora sekcjonowanego miedzianego, chłodzonego wodą, w którym dopuszczalne obciążenie cieplne ścian wynosi [2, 3]:

- w przypadku argonu –  $q_w = 20$  W/mm<sup>2</sup>;
- w przypadku azotu, ditlenku węgla, powietrza i mieszaniny 90% Ar + 10% H<sub>2</sub> –  $q_w = 30$  W/mm<sup>2</sup>;
- w przypadku helu i wodoru –  $q_w = 50$  W/mm<sup>2</sup>.

Stan „B” odpowiada specjalnej konstrukcji kanału wyladowego konstryktora sekcjonowanego miedzianego [7] ze zintensyfikowanym chłodzeniem wodnym:

- w przypadku argonu –  $q_w = 25$  W/mm<sup>2</sup>;
- w przypadku azotu, ditlenku węgla, powietrza i mieszaniny 90% Ar + 10% H<sub>2</sub> –  $q_w = 50$  W/mm<sup>2</sup>;
- w przypadku helu i wodoru –  $q_w = 120$  W/mm<sup>2</sup>.

Z porównania danych (tab. 1 i 2) wynika, że za pomocą łuku ściśniętego ściankami kanału wyladowego o średnicy  $d_e = 6$  mm można wytworzyć laminarną strugę plazmy w stanie normalnej konstrukcji plazmotronu strugowego, ale tylko podczas pracy z argonem. W przypadku specjalnej konstrukcji kanału wyladowego konstryktora sekcjonowanego [7] można wytworzyć stabilną laminarną strugę podczas pracy plazmotronu z argonem, mieszaniną 90% Ar + 10% H<sub>2</sub> albo powietrzem. Zmniejszenie  $d_e$  prowadzi do zmniejszenia średnicy laminarnej strugi plazmowej wypływającej z dyszy i do zmniejszenia dopuszczalnej wartości  $\delta_r$ . Jeśli zachować dopuszczalne obciążenie cieplne ścian, to zmniejszenie średnicy kanału prowadzi do pogorszenia stabilności strugi laminarnej. W tabeli 3 zamieszczono dopuszczalne wartości  $\delta_r$  w dwóch stanach pracy kanału wyladowego.

**Tabela 1.** Stopień ściśnięcia łuku ściankami, potrzebny dla utworzenia stabilnej strugi laminarnej

Gaz Parametry	Gaz						
	Ar	90% Ar + 10% H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Powietrze	He	H <sub>2</sub>
$T_r, K$	2514	2862	2578	4140	2817	3709	3103
$\eta(T_r), 10^{-4} Pa \cdot s$	1,055	1,1473	0,8255	1,186	0,9436	1,359	0,4848
$S_r, kW/m$	0,1152	0,416	0,46	0,535	0,32	2,13	4,473
$\delta_r$	0,963	0,962	0,982	0,961	0,965	0,958	0,975

**Tabela 2.** Maksymalnie dopuszczalny stopień ściśnięcia łuku ściankami kanału wyladowego konstryktora sekcjonowanego miedzianego chłodzonego wodą ( $d_e = 6$  mm)

Stan	Gaz Parametry	Gaz						
		Ar	90% Ar + 10% H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Powietrze	He	H <sub>2</sub>
A	$I, A$	290	296	262,5	279	280	384	142
	$\delta_r$	0,984	0,925	0,963	0,845	0,956	0,878	0,469
B	$I, A$	340,5	481	392,5	449	430,4	844	355
	$\delta_r$	0,987	0,967	0,977	0,907	0,974	0,949	0,665

**Tabela 3.** Maksymalny stopień ściśnięcia łuku ściankami kanału wyladowczego o różnej średnicy

Stan	Gaz	$d_e = 6$ mm	$d_e = 5$ mm	$d_e = 4$ mm	$d_e = 3$ mm	$d_e = 2$ mm
		$I/\delta_r$				
A	Ar	290A/0,984	215A/0,982	150A/0,98	93A/0,975	48A/0,967
B	Ar	340A/0,987	256A/0,986	175A/0,984	108A/0,98	58A/0,975
	Powietrze	430A/0,974	315A/0,972	207A/0,968	123A/0,963	57A/0,951
	90% Ar + 10% H <sub>2</sub>	481A/0,967	359A/0,967	254A/0,963	158A/0,956	80A/0,942

**Tabela 4.** Stany wytwarzania laminarnej strugi plazmowej łukiem w helu i ditlenku węgla, ściśniętego ściankami kanału wyladowczego o specjalnej konstrukcji

Parametry	Gaz			
	Hel ( $\delta_r = 0,958$ )		Ditlenek węgla ( $\delta_r = 0,982$ )	
$d_e$ , mm	10	8	10	8
$I_N$ , A	1779	1360,5	874,5	651,5
$q_w$ , W/mm <sup>2</sup>	102,1	117,7	46,9	51,6
$q_{\lambda w}$ , W/mm <sup>2</sup>	86,6	105,5	34,7	42,0
$q_{\epsilon w}$ , W/mm <sup>2</sup>	15,5	12,3	12,2	9,6
$T_a$ , 10 <sup>3</sup> K	24,1	23,9	13,4	13,3
$E$ , V/m	1802,8	2175,5	1686,3	1988,6

Jak wynika z tabeli 3, w przypadku pracy z argonem stabilna struga laminarna plazmy może być wytworzona przez łuk ściśnięty ściankami kanału wyladowczego w dowolnym wariancie konstrukcji i średnicy kanału konstruktora. W plazmotronie pracującym z powietrzem laminarna struga plazmy może być otrzymana tylko z podwyższonymi obciążeniami cieplnymi ścian kanału wyladowczego (stan „B”) i tylko ze średnicami kanału ponad 3 mm. Wytwarzanie laminarnej strugi plazmowej z mieszaniny 90% Ar + 10% H<sub>2</sub> jest możliwe tylko w stanie „B” i ze średnicami kanału około 4 mm i więcej.

Z danych zamieszczonych w tabelach 1–2, wynika, że wytwarzanie strugi laminarnej za pomocą plazmotronu strugowego, pracującego z azotem i wodorem, w zasadzie nie jest możliwe, ponieważ nie jest możliwe otrzymanie niezbędnego stopnia ściśnięcia łuku ściankami w tych gazach z dopuszczalnymi obciążeniami cieplnymi kanału wyladowczego.

W tabeli 4 zamieszczono wartości prądu łuku  $I_N$ , z którymi osiąga się potrzebny stopień ściśnięcia kolumny  $\delta_r$  (tab. 1). Tam także wyszczególniono obliczone wartości gęstości strumieni cieplnych na powierzchni ścian kanału wyladowczego: sumaryczną gęstość  $q_w$ , wywołaną przewodnością cieplną gazu w warstwie ściśnięcia  $q_{\lambda w}$  i promieniowaniem łuku  $q_{\epsilon w}$ . Oprócz tego podano wartości średniej temperatury kolumny plazmy  $T_a$  w stanie ściśnięcia łuku ściankami. Ta temperatura jest prawie równa średniomassowej temperaturze laminarnej strugi plazmy  $T_{st}$  na wyjściu z kanału dyszy plazmotronu.

W tabelach 5–7 zamieszczono wyniki obliczenia parametrów łuku, ściśniętego ściankami kanału wyladowczego. Wytwarzanie laminarnej strugi argonowej nie wymaga opracowania specjalnej konstrukcji kanału wyladowczego, ponieważ obciążenia cieplne ścian kanału nie przewyższają wartości  $q_w = 20$  W/mm<sup>2</sup> (tab. 5).

**Tabela 5.** Stany wytwarzania laminarnej strugi plazmowej przez łuk w argonie ściśnięty ściankami kanału konstruktora sekcjonowanego miedzianego o zwykłej konstrukcji

Parametry	Średnica kanału $d_e$ mm						
	10	8	6	5	4	3	2
$I_N$ , A	346	246	164,5	128,5	97,5	69,5	44,0
$q_w$ , W/mm <sup>2</sup>	8,825	8,78	9,39	10,02	11,34	13,8	18,96
$q_{\lambda w}$ , W/mm <sup>2</sup>	4,2	5,15	7,72	7,85	9,64	12,56	18,16
$q_{\epsilon w}$ , W/mm <sup>2</sup>	4,63	3,63	2,67	2,17	1,70	1,24	0,8
$T_a$ , 10 <sup>3</sup> K	12,8	12,76	12,7	12,64	12,6	12,54	12,46
$E$ , V/m	801,3	897,3	1076,2	1224,4	1461,2	1871,3	2707,4

**Tabela 6.** Stany wytwarzania laminarnej strugi plazmowej przez łuk w mieszaninie argonu z wodorem ściśnięty ściankami kanału konstryktora sekcjonowanego miedzianego o specjalnej konstrukcji

Parametry	Średnica kanału $d_e$ , mm				
	10	8	6	5	4
$I_N$ , A	969,5	671,5	433,0	334,5	249,0
$q_w$ , W/mm <sup>2</sup>	47,78	44,82	44,25	45,7	49,53
$q_{\lambda w}$ , W/mm <sup>2</sup>	14,81	18,44	24,46	29,21	36,33
$q_{ew}$ , W/mm <sup>2</sup>	32,97	26,38	19,79	16,49	13,2
$T_w$ , 10 <sup>3</sup> K	15,9	15,89	15,87	15,85	15,84
$E$ , V/m	1548,3	1677,6	1926,2	2146,1	2499,8

**Tabela 7.** Stany wytwarzania laminarnej strugi plazmowej przez łuk w powietrzu ściśnięty ściankami kanału konstryktora sekcjonowanego miedzianego o specjalnej konstrukcji

Parametry	Średnica kanału $d_e$ , mm					
	10	8	6	5	4	3,5
$I_N$ , A	752,5	527,0	339,5	259,5	190,5	158,5
$q_w$ , W/mm <sup>2</sup>	33,88	34,91	37,8	40,5	45,38	48,7
$q_{\lambda w}$ , W/mm <sup>2</sup>	27,56	30,62	35,26	38,67	44,1	47,68
$q_{ew}$ , W/mm <sup>2</sup>	6,32	4,29	2,54	1,825	1,275	1,026
$T_w$ , 10 <sup>3</sup> K	14,41	13,86	13,22	12,87	12,53	12,34
$E$ , V/m	1414,4	1665,1	2098,7	2451,3	2993,5	3378,7

Obciążenia cieplne ścian kanału konstryktora plazmotronu, pracującego z mieszaniną argonu i wodoru (90% Ar + 10% H<sub>2</sub>) (tab. 6) i z powietrzem (tab. 7), wymagają zastosowania takiej konstrukcji kanału konstryktora sekcjonowanego [7], która wytrzymuje stany pracy z długotrwałym obciążeniem cieplnym ścian do  $q_w = 50$  W/mm<sup>2</sup>.

Na podstawie analizy warunków wytwarzania strugi laminarnej i danych, zamieszczonych w tabelach 5–7, można obliczyć prąd roboczy plazmotronu w zależności od średnicy kanału wyladowczego:

- w przypadku laminarnej strugi plazmy argonowej

$$I_N = -148,6 + \frac{3092,9}{1 + \exp\left(-\frac{d_e - 22,61}{7,6}\right)}, \text{ A} \quad (6)$$

- w przypadku laminarnej strugi plazmy utworzonej z mieszaniny gazów (90% Ar + 10% H<sub>2</sub>)

$$I_N = 6949,9 - \frac{7243,9}{1 + \exp\left(\frac{d_e - 19,73}{6,26}\right)}, \text{ A} \quad (7)$$

- w przypadku laminarnej strugi plazmy powietrznej w kanale wyladowczym o średnicy  $d_e \geq 3,5$  mm

$$I_N = -307,6 + \frac{5092,9}{1 + \exp\left(-\frac{d_e - 19,04}{6,765}\right)}, \text{ A} \quad (8)$$

gdzie  $d_e$  w mm.

Zapewnienie stabilności hydrodynamicznej gazu na wejściu w kanał wyladowczy determinuje strumień masy

$$\dot{m}_{\max} \approx 935,4 \cdot d_e \cdot \eta(T_w), \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (9)$$

Następnym ważnym warunkiem jest osiągnięcie wymaganej efektywności nagrzewania. Na końcu kanału wyladowczego średniomasaowa temperatura gazu powinna przyjmować wartości bliskie średniej temperaturze w przekroju kolumny łuku. Jeśli oznaczyć wartość współrzędnej osiowej kanału przez  $z = l_h$ , to ten warunek można zapisać w postaci

$$l_h < l_e \quad (10)$$

gdzie  $l_e$  – długość kanału wyladowczego.

Analiza wyników badań eksperymentalnych [3] wskazuje na konieczność wytworzenia wystarczająco długiej ( $l_h < z < l_e$ ) strefy ściśnięcia łuku ściankami na końcu kanału wyladowczego. Wtedy uzyskuje się stabilizację strugi plazmowej na wyjściu dyszy plazmotronu.

### 3. MODEL PLAZMOTRONU WYTWARZAJĄCEGO LAMINARNĄ STRUGĘ PLAZMOWĄ

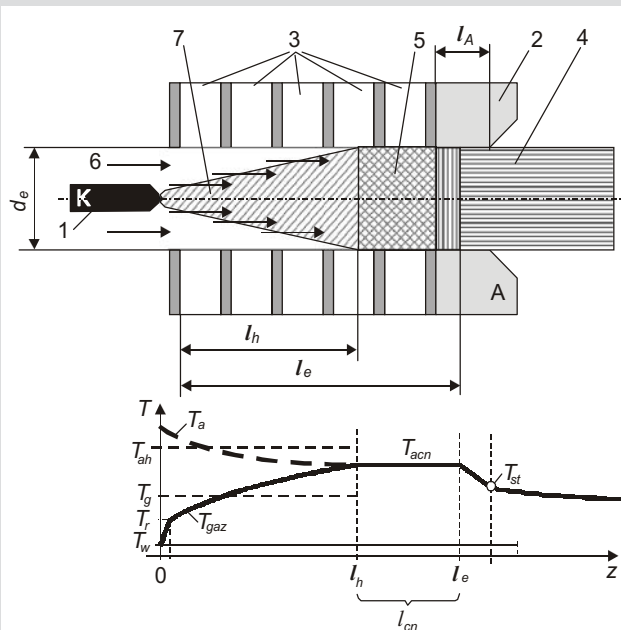
Analiza warunków wytwarzania laminarnej strugi plazmowej za pomocą łuku ściśniętego ściankami kanału wyładowczego umożliwi rozbić kanał na dwa kawałki (rys. 1) odcinek nagrzewania gazu łukiem 7 o długości  $l_h$  i odcinek ściśnięcia łuku ściankami 5 o długości  $(l_e - l_h)$ . Należy zaznaczyć, że silne ściśnięcie łuku ściankami kanału anody-dyszy umożliwi przyjęcie założenia dyfuzyjnego charakteru rozptywania prądu w plazmie w strefie zaczepienia łuku do ścianek kanału. Jeżeli przyjąć, że spadek napięcia na tym kawałku kolumny jest bliski zeru, to spadek napięcia na łuku można opisać wzorem

$$U_a = U_{AK} + U_{kon} + E_h \cdot l_h + E_{cn} \cdot (l_e - l_h) \quad (11)$$

gdzie:

- $E_h, E_{cn}$  – wartości średnie natężenia pola elektrycznego łuku odpowiednio na odcinku nagrzewania gazu i odcinku ściśnięcia ściankami kanału,
- $U_{AK}$  – suma spadków napięcia w warstwach anodowej i katodowej łuku,
- $U_{kon}$  – ekwiwalent napięciowy kowekcyjnego odprowadzania ciepła w części stożkowej łuku.

Jeśli założyć, że rozptyw prądu w obszarze kolumny plazmowej w kanale cylindrycznym obejmuje całą długość kanału  $l_n$ , to w całkowity strumień ciepła  $P_{wn}$  na ścianki kanału anody – dyszy należy włączyć także strumień energii wywołany spadkiem napięcia w warstwie anodowej łuku.



Rys. 1. Struktura przepływów gazu i rozkład średniej temperatury w kanale konstryktora (1 – anoda, 2 – katoda, 3 – sekcje konstryktora, 4 – struga laminarna plazmy, 5 – przepływ laminarny plazmy, 6 – przepływ gazu, 7 – obszar plazmy turbulენტnej)

W tym przypadku, równanie bilansu energii laminarnej strugi plazmy  $P_{st}$  na wyjściu z dyszy można zapisać w postaci

$$P_{st} = h(T_{acn}) \cdot \dot{m} - P_{wn} + I \cdot U_A = h(T_{acn}) \cdot \dot{m} - q_{wn} \cdot \pi \cdot d_n \cdot l_n \quad (12)$$

gdzie:

- $q_{wn}$  – średnia gęstość powierzchniowa strumienia ciepłego na ścianki kanału dyszy-anody,
- $l_n$  – długość kanału cylindrycznego anody-dyszy (rys. 1),
- $d_n$  – średnica kanału anody-dyszy,
- $T_{acn}$  – średnia temperatura kolumny łuku w strefie ściśnięcia ściankami kanału dyszy,
- $h$  – entalpia właściwa gazu.

Wprowadza się ogólnie przyjęte pojęcie sprawności cieplnej plazmotronu strugowego

$$\eta_t = \frac{P_{st}}{I \cdot U_a} \quad (13)$$

Udział mocy, idącej na nagrzewanie strumienia gazu w strefie części stożkowej kolumny łuku, stanowi nieznaczną (poniżej 5%) część całkowitej mocy strugi na wyjściu plazmotronu. W pierwszym przybliżeniu można przyjąć, że energia tego nagrzewania idzie na podwyższenie temperatury od początkowej bliskiej temperaturze gazu  $T_w$  w pobliżu powierzchnia zimnych ścian, do temperatury ustalonej  $T_r$  na odcinku wejściowym kanału wyładowczego

$$U_{kon} = \frac{\dot{m} \cdot [h(T_r) - h(T_w)]}{I} \quad (14)$$

Moc strat ciepła, unoszonego wodą z kanału wyładowczego konstryktora sekcjonowanego można obliczyć, jeśli są znane napięcie  $U_a$  i sprawność cieplna  $\eta_t$  plazmotronu. Służy do tego wzór

$$P_{wh} = I \cdot U_a \cdot (1 - \eta_t) - q_{wh} \cdot \pi \cdot d_n \cdot l_n - I \cdot U_{AK} \quad (15)$$

Z uwzględnieniem wzorów (10) i (11) równanie (15) można zapisać w innej postaci

$$P_{wh} = I \cdot U_a - (P_{st} + q_{wh} \cdot \pi \cdot d_n \cdot l_n) - I \cdot U_{AK} \quad (16)$$

lub

$$P_{wh} = I \cdot U_a - P_{ge} - I \cdot U_{AK} \quad (17)$$

gdzie  $P_{ge}$  – moc cieplna plazmy w przekroju wyjściowym ( $z = l_e$ ) kanału wyładowczego

$$P_{ge} = \dot{m} \cdot h(T_{acn}) \quad (18)$$



Jednocześnie, zgodnie ze strukturą łuku w kanale (rys. 1) moc strat ciepła  $P_w$ , unoszonego wodą można opisać wzorem

$$P_w = \pi \cdot d_e \cdot [q_{wh} \cdot l_h + q_{wcn} \cdot (l_e - l_h)] \quad (19)$$

gdzie  $q_{wh}$  – wartość średnia gęstości powierzchniowej strumienia ciepłego na ściance kanału wyladowczego w strefie nagrzewania gazu łukiem.

Do opisanego procesu przekazywania ciepła od przepływającego gazu do ścianek kanału wyladowczego można wykorzystać znaną zależność na liczbę kryterialną [1]

$$St = C_1 \cdot Re^{-0,5} \cdot Pr^{-0,67} \quad (20)$$

gdzie  $St$  – liczba Stanton

$$St = \frac{Nu}{Pe} = \frac{\alpha_w}{c_p(T_g) \cdot \rho(T_g) \cdot v} \quad (21)$$

gdzie:

$Nu$  – liczba Nusselta,

$\alpha_w$  – współczynnik przekazywania ciepła od gazu do ścianki kanału wyladowczego w strefie nagrzewania łukiem  $0 < z < l_h$ ,

$c_p$  – ciepło właściwe,

$\rho$  – gęstość,

$v$  – średnia prędkość przepływu gazu, odniesiona do całego przekroju kanału

$$v = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot d_e^2 \cdot \rho(T_g)} \quad (22)$$

Wskazana we wzorach wielkość  $T_g$  jest średniomasową temperaturą gazu w strefie nagrzewania  $0 < z < l_h$ . Określa się ją jako wartość średnią logarymiczną między wartością temperatury plazmy  $T_{acn}$  w strefie ściśnięcia łuku ( $l_e - l_h$ ) i średnią temperaturą gazu  $T_r$  (2) na początkowym odcinku nagrzewania w pobliżu wejścia gazu w kanał wyladowczy plazmotronu

$$T_g = \frac{T_{acn} - T_r}{\ln\left(\frac{T_{acn}}{T_r}\right)} \quad (23)$$

Wartość średnia gęstości powierzchniowej strumienia ciepłego na ścianki kanału wyladowczego w strefie nagrzewania gazu łukiem jest określona procesami przewodności cieplnej i konwekcji

$$(q_{\lambda w})_h = \alpha_w \cdot (T_g - T_w) \quad (24)$$

oraz promieniowania

$$(q_{\epsilon w})_h = \frac{(p_{\epsilon})_h}{\pi \cdot d_e} = \frac{(r_a^2 \cdot \tilde{p}_{\epsilon}(P_{\lambda}))_h}{\pi \cdot d_e} \quad (25)$$

gdzie  $\alpha$  – współczynnik przejmowania ciepła. Z kolei, wartość strumienia ciepłego  $q_{\epsilon w}$  w strefie ściśnięcia łuku ( $l_e - l_h$ ) można obliczyć ze wzoru

$$(q_{\epsilon w}(z))_h = (q_{\epsilon w})_{cn} = \frac{(p_{\epsilon})_{cn}}{\pi \cdot d_e} = \frac{(r_a^2 \cdot \tilde{p}_{\epsilon}(P_{\lambda}))_{cn}}{\pi \cdot d_e} \quad (26)$$

Sumaryczna średnia wartość gęstości powierzchniowej strumienia ciepłego na ściankach komory wyladowczej w strefie nagrzewania  $0 < z < l_h$  może być obliczona z równania

$$\begin{aligned} q_{wh} &= (q_{\epsilon w})_h + (q_{\lambda w})_h = \\ &= \frac{(r_a^2 \cdot \tilde{p}_{\epsilon}(P_{\lambda}))_{cn} + (p_{\lambda})_h - \frac{(h(T_{acn}) - h(T_r)) \cdot \dot{m}}{l_h}}{\pi \cdot d_e} \end{aligned} \quad (27)$$

Z kolei sumaryczna wartość gęstości powierzchniowej strumienia ciepłego na ścianki kanału wyladowczego w strefie ściśnięcia łuku ( $l_e - l_h$ ) może być obliczona ze wzoru

$$\begin{aligned} q_{wcn} &= (q_{\epsilon w})_{cn} + (q_{\lambda w})_{cn} = \\ &= \frac{(r_a^2 \cdot \tilde{p}_{\epsilon}(P_{\lambda}))_{cn} + (p_{\lambda})_{cn}}{\pi \cdot d_e} \end{aligned} \quad (28)$$

Określmy średnią względem całej długości plazmotronu strugowego sumaryczną gęstość powierzchniową strumienia ciepłego na ścianki kanału wyladowczego. Można ją wyrazić wzorem

$$\bar{q}_w = q_{wh} \cdot \frac{l_h}{l_e} + q_{wcn} \cdot \left(1 - \frac{l_h}{l_e}\right) \quad (29)$$

Stosunek średniej temperatury gazu  $T_g$  w strefie nagrzewania do temperatury ścianki  $T_w$  nie przewyższa wartości 10. Zgodnie z eksperymentami [8] współczynnik  $C_1$  we wzorze (20) zmienia się w szerokim zakresie od 0,6 do 2,0. W obliczeniach będziemy w pierwszym przybliżeniu zakładać  $C_1 = 1$ . W takim przypadku wzór na liczbę Stanton przyjmuje postać

$$St(T_g) = \frac{\pi \cdot d_e^2 \cdot \alpha_w}{4 \cdot c_p(T_g) \cdot \dot{m}} = Re(T_g)^{-0,5} \cdot Pr(T_g)^{-0,67} \quad (30)$$

gdzie:

- $c_p$  – ciepło właściwe,
- $\alpha_w$  – współczynnik przejmowania ciepła do ścianki,
- $Re$  – liczba Reynoldsa,
- $Pr$  – liczba Prandla.

Gęstość powierzchniową strumienia ciepłego na powierzchni kolumny wywołanego przewodnością cieplną plazmy w strefie ściśnięcia łuku ( $l_e - l_h$ ) można obliczyć ze wzoru

$$q_{acn} = \frac{(p_{\lambda})_{cn}}{2\pi \cdot (r_a)_{cn}} = \frac{S(T_p) \cdot K_s(T_p - T_g)}{r_{acn} \cdot [\ln(0,5d_e) - \ln(r_{acn})]} \quad (31)$$

gdzie  $K_s$  – współczynnik korekcji rozwiązania równania przewodności cieplnej.

Wartość średnia tego parametru łuku w strefie nagrzewania  $0 < z < l_h$  może być obliczona ze wzoru

$$q_{ah} = \frac{(p_{\lambda})_h}{2\pi \cdot (r_a)_h} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{I^2}{r_{ah}^3 \cdot \tilde{g}(p_{\lambda})} - r_{ah} \cdot \tilde{p}_{\epsilon}(p_{\lambda}) \right) \quad (32)$$

gdzie:

- $\tilde{g}$  – funkcja uniwersalna konduktancji łuku;
- $\tilde{p}_{\epsilon}$  – funkcja uniwersalna mocy promieniowania łuku [4, 5].

Niech będzie zadana odpowiednia wartość gęstości mocy  $p_{\lambda h}$ , rozpraszanej w wyniku przewodności cieplnej plazmy łuku. Średnią wartość promienia kolumny  $r_{ah}$  w strefie nagrzewania gazu można obliczyć ze wzoru

$$r_{ah} = \sqrt{0,25 \cdot \left[ \frac{p_{\lambda h}}{\tilde{p}_{\epsilon}(p_{\lambda h})} \right]^2 + \frac{I^2}{\tilde{p}_{\epsilon}(p_{\lambda h}) \cdot \tilde{g}(p_{\lambda h})}} - 0,5 \cdot \frac{p_{\lambda h}}{\tilde{p}_{\epsilon}(p_{\lambda h})} \quad (33)$$

Ponadto można obliczyć średnią wartość natężenia pola elektrycznego  $E_h$  w strefie nagrzewania gazu

$$E_h = \frac{0,5 p_{\lambda h}}{I} + \left\{ \left( \frac{0,5 \cdot p_{\lambda h}}{I} \right)^2 + \frac{\tilde{p}_{\epsilon}(p_{\lambda h})}{\tilde{g}(p_{\lambda h})} \right\}^{0,5} \quad (34)$$

#### 4. OBLICZANIE PARAMETRÓW GENERATORA LAMINARNEJ STRUGI PLAZMY ARGONOWEJ

Najbardziej interesujący jest stan graniczny rozpadu laminarnej strugi na wyjściu kanału dyszy, kiedy długość strefy

nagrzewania  $l_h$  zbliża się do całkowitej długości  $l_e$  kanału wyładowczego

$$l_h = l_e \quad (35)$$

Obliczono parametry kolumny w stanie ściśnięcia łuku ściankami ( $I = 162$  A,  $d_e = 6$  mm, gaz – argon):

$$\delta_r = 0,963; \quad T_{pcn} = 6094,1 \text{ K}; \quad q_{acn} = 6,48 \frac{\text{W}}{\text{mm}^2};$$

$$T_{acn} = 12655,6 \text{ K};$$

$$(q_{\lambda w})_{cn} = 6,58 \frac{\text{W}}{\text{mm}^2}; \quad (q_{\epsilon w})_{cn} = 2,61 \frac{\text{W}}{\text{mm}^2};$$

$$P_{\epsilon cn} = 49,24 \frac{\text{kW}}{\text{m}}; \quad P_{\lambda cn} = 124,13 \frac{\text{kW}}{\text{m}};$$

$$E_{cn} = 1070,2 \frac{\text{V}}{\text{m}}.$$

W stanie krytycznym rozpadu strugi napięcie łuku wynosi  $U_a = 45,0$  V, sprawność cieplna  $\eta_l = 36,2\%$ , a moc strumienia plazmy  $P_{st} = 2,64$  kW.

W plazmotronie [3] (rys. 1) kanał anody-dyszy ma złożony kształt geometryczny. Na odcinku wejściowym stanowi go cylinder o średnicy takiej jak kanału wyładowczego  $d_{nc} = 6$  mm i długości  $l_{nc} = 5$  mm, a w części wyjściowej – stożek rozszerzający się pod kątem 45 stopni na długości  $l_{nk} = 5$  mm. Średnia wartość średnicy kanału w części rozszerzającej się ma wartość  $d_{nk} = 11$  mm. Całkowita długość kanału dyszy w plazmotronie wynosi  $l_n = 10$  mm. Na tej podstawie można obliczyć całkowity strumień ciepły  $P_{wn}$  w ścianki kanału anody-dyszy a następnie gęstość strumienia ciepłego na powierzchni ścian kanału, wywołanego promieniowaniem i przewodnością cieplną plazmy

$$q_{wn} = \frac{P_{wn} - I \cdot U_A}{\pi \cdot (d_{nc} \cdot l_{nc} + d_{nk} \cdot l_{nk})} \quad (36)$$

a ponadto obciążenie cieplne ścian kanału i dyszy będzie mieć zwiększone wartości

$$q_{wcn} = \frac{P_{wn} - I \cdot U_A}{\pi \cdot d_e \cdot l_n} \quad (37)$$

Wyjście strefy zaczeplenia linii prądu łuku z obszaru części cylindrycznej kanału dyszy do jego części stożkowej może doprowadzić do intensywnych zaburzeń w plazmie, która do tej pory na wyjściu dyszy była wytwarzana jako struga laminarna. Ten dodatkowy warunek można przedstawić w postaci

$$l_A < l_{nc} \quad (38)$$

Przewodność cieplna gazu i promieniowanie plazmy powodują silne obciążenie cieplne ścian na całej długości strefy zaczepienia linii prądu do ścianek części cylindrycznej kanału anody-dyszy. Założymy, że to obciążenie jest równe gęstości powierzchniowej strumienia cieplnego  $q_{wcn}$  na ścianie kanału wyładowczego w strefie ściśnięcia łuku. Ponadto przyjmujemy założenie upraszczające, że strumienie cieplne powstające na skutek przewodności cieplnej i promieniowania plazmy w ścianki części stożkowej na wyjściu kanału dyszy są pomijalnie małe w porównaniu z obciążeniem cieplnym ścian części cylindrycznej kanału w plazmotronie zbadanym w [3]. Wtedy można określić część wypadkowego strumienia cieplnego powodującego spadek napięcia w warstwie anodowej łuku

$$P_A = I \cdot U_A = P_{wn} - \pi \cdot d_e \cdot q_{wcn} \cdot l_A \quad (39)$$

W tabeli 8 zamieszczono wartości parametrów zewnętrznych elektrycznych i cieplnych w postaci napięcia łuku i sprawności cieplnej. W tym przypadku obliczona wartość  $U_A = 3,74$  V jest rzeczywistym spadkiem napięcia w warstwie anodowej łuku argonowego. Za pomocą wzoru (39) można obliczyć długość  $l_A$  strefy zaczepienia linii prądu do kanału o kształcie cylindrycznym (37)

$$l_A = \frac{P_{wn} - I \cdot U_A}{\pi \cdot d_e \cdot q_{wcn}} \quad (40)$$

W każdym ze stanów pracy generatora (tab. 8) to zaczepienie ma miejsce na całej długości dyszy.

Z uwzględnieniem zależności (15), (17) i (18) można zapisać równanie strumienia energii, zużywanego łukiem na nagrzewanie strumienia gazu, omywającego kolumnę łuku w kanale wyładowczym, w strefie nagrzewania do temperatury  $T_{acn}$

$$P_{gh} = \dot{m} \cdot [h(T_{acn}) - h(T_r)] \quad (41)$$

Za pomocą wzorów (24) i (41) można obliczyć wartość średnią gęstości liniowej strumienia energii pola elektrycznego rozpraszanej w kolumnie na skutek przewodności cieplnej plazmy w strefie nagrzewania  $0 < z < l_h$

$$(p_\lambda)_h = \pi \cdot d_e \cdot (\lambda q_w)_h + \frac{(P_g)_h}{l_h} \quad (42)$$

Niech będzie spełniony warunek stanu krytycznego ( $l_h = l_e$ ). Obecność „zimnego” strumienia gazu w warstwie między kolumną łuku a ściankami kanału w strefie nagrzewania łukiem prowadzi do znacznego (ponad dwukrotnie) zmniejszenia obciążenia cieplnego na ścianki kanału wyładowczego. Wartości średnie gęstości liniowej strumienia cieplnego na powierzchni kolumny w strefie nagrzewania znacznie przewyższają gęstości liniowe strumienia cieplnego na ściankach komory wyładowczej:

$$(p_\lambda + p_\epsilon)_h = 256,9 \frac{\text{kW}}{\text{m}};$$

$$(p_w)_h = \pi \cdot d_e \cdot (q_w)_h = 83,5 \frac{\text{kW}}{\text{m}}.$$

W związku z tym i z uwzględnieniem małych wartości liczby Pecleta  $P_e < 250$ , można wnioskować, że warunki termodynamiczne na powierzchni łuku, a w szczególności gęstość powierzchniowa strumienia cieplnego  $q_{ah}$ , słabo zależą od warunków przekazywania ciepła od gazu do ścianek kanału, i tym samym od wartości strumienia masy gazu plazmotwórczego w strefie jego nagrzewania łukiem. Ten najważniejszy parametr łuku elektrycznego w kanale wyładowczym zależy tylko od parametrów kolumny w strefie ściśnięcia łuku ściankami. Stąd można wnioskować, że gęstość powierzchniowa strumienia cieplnego  $q_{ah}$  łuku w wybranym rodzaju gazu, określona jest procesem przewodności cieplnej plazmy kolumny, a więc będzie zależeć tylko od prądu łuku i średnicy kanału wyładowczego. Jednocześnie, w modelowaniu charakterystyk cieplnych i elektrycznych łuku w plazmotronach, pracujących z gazem o innym składzie chemicznym, można przyjąć warunek stałości stosunku strumieni cieplnych  $q_a$  na powierzchni kolumny łuku w strefie nagrzewania gazu i w strefie ściśnięcia ściankami łuku

$$A_h = \left( \frac{(q_a)_h}{(q_a)_{cn}} \right)_{\text{Gaz}} = \left( \frac{(q_a)_h}{(q_a)_{cn}} \right)_{\text{Ar}} \approx 1,9 \dots 2,4 \quad (43)$$

**Tabela 8.** Moc strumieni ciepła w badanych stanach [3] pracy generatora laminarnej strugi plazmowej argonu ( $d_e = 6$  mm,  $I = 162$  A)

Parametry	Strumień objętości argonu $\dot{v}$ , l/min			
	9,6	8,4	7,2	6,0
$\dot{m}$ , g/s	0,2854	0,2497	0,214	0,1784
$U_a$ , V	45,0	44,2	43,4	42,3
$\eta_r$ , %	36,3	32,2	28,4	22,6
$P_{wn}$ , kW	1,67	1,472	1,24	1,15
$P_A$ , kW	0,804	0,605	0,374	0,283
$U_A$ , V	5,0	3,74	2,31	1,74
$l_A$ , mm	6,15	5,0	3,67	3,14



Na tej podstawie można zapisać warunek uniwersalny służący do określenia gęstości powierzchniowej strumienia ciepłego  $q_{ah}$  na powierzchni kolumny łuku w strefie nagrzewania gazu

$$(q_a)_h = A_h \cdot (q_a)_{cn} = f(I, d_e, \text{Gaz}) \quad (44)$$

Zaproponowany model matematyczny i wykonane obliczenia umożliwiają przyjęcie zakresu wartości

$$\text{opt} l_{cn} = (0,5 \div 1,0) d_e \quad (45)$$

jako optymalnej długości strefy ściśnięcia łuku na wyjściu kanału wyladowczego.

## 5. UWAGI KOŃCOWE

Teoria łuku dwuwarstwego [4, 5] i na jej podstawie opracowane metody modelowania matematycznego łuku w kanale wyladowczym umożliwiają szczegółową analizę generatorów laminarnej strugi plazmowej. Możliwe się stało obliczenie parametrów plazmy i parametrów procesu przekazywania ciepła w obszarach łuku i w całym plazmotronie w szerokim zakresie wartości strumienia masy gazu, dopuszczalnego z punktu widzenia stabilności i efektywności energetycznej laminarnej strugi plazmowej. To odsłania możliwości obliczenia parametrów nowo projektowanych plazmotronów strugowych i spektrometrycznych z małym przepływem gazu w całym obszarze kanału wyladowczego sekcjonowanego i kanale anody-dyszy. W opisany sposób możliwe jest projektowanie plazmotronów strugowych laminarnych pracujących z gazami o dowolnym składzie chemicznym. Znajomość określić w postaci granicznych obciążeń cieplnych na ścianki kanału konstruktora i anody-dyszy w konstrukcji plazmotronu oraz wypisane warunki tworzenia stabilnej strugi umożliwiają wybranie prądu roboczego łuku i obliczenie zarówno parametrów samego łuku, jak i charakterystyk cieplnych oraz elektrycznych całego plazmotronu.

## Literatura

- [1] Boulos M.I., Fauchais P., Pfender E.: *Thermal Plasmas. Fundamentals and Applications. Vol.1.* New York and London, Plenum Press 1994
- [2] Brugeat S., Coitout H., Parizet M. J.: *Description and optimization of a wall-stabilized arc chamber.* Review of Scientific Instruments, vol. 71, October (10), 2000, 3702–3705
- [3] Katashi Osaki, Osamu Fukumasa, Akira Kobayashi: *High thermal efficiency-type laminar plasma jet generator for plasma processing.* Pergamon, Vacuum 59, 2000, 47–54
- [4] Kruzhinin A.M., Sawicki A.: *A theory of electrical arc heating.* Częstochowa, The Publishing Office of Technical University of Częstochowa, 2003
- [5] Kruczinin A.M., Sawicki A.: *Piece i urządzenia plazmowe: Cz.1. Piece i urządzenia plazmowe ciśnienia atmosferycznego.* Częstochowa, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej 2001
- [6] Rutscher A., Deutsch H.: *Wissensspeicher Plasmatechnik.* Leipzig, VEB Fachbuchverlag 1983

- [7] Асиновский Э.И., Кириллин А.В., Низовский В.Л.: *Стабилизированные электрические дуги и их применение в теплофизическом эксперименте.* Москва, Наука 1992
- [8] Ивлиутин А.И., Курочкин Ю.В., Молодых Э.И., Пустогогаров А.В., Супруненко М.Н.: *Исследование теплообмена при взаимодействии электрической дуги с продольным потоком газа.* Инженерно-физический журнал, 1975, т. XXVIII, № 3, с. 477–481
- [9] *Микроплазменная сварка.* Под ред. Б.Е. Патона. Киев, Наукова думка 1979

Wpłynęło: 7.11.2002

Anatolij M. KRUCZININ



Prof. dr hab. inż. Anatolij Michajłowicz Kruczinin jest absolwentem Moskiewskiego Instytutu Energetycznego (MIE), który ukończył w 1961 roku. W 1967 roku obronił pracę doktorską, w 1982 roku pracę habilitacyjną, a w 1984 roku nadano mu tytuł profesora. Od 1993 roku jest członkiem-korespondentem Rosyjskiej Akademii Nauk Elektrotechnicznych. Jest autorem i współautorem ponad 50 uzyskanych patentów na wynalazki, około 100 publikacji, 17 monografii i podręczników w języku rosyjskim. Od 1994 roku pracuje na stanowisku profesora w Politechnice Częstochowskiej. Owocem aktywnej działalności w Polsce jest autorstwo i współautorstwo ponad 70 publikacji naukowych w czasopismach polskich, amerykańskich, rosyjskich i niemieckich, 1 skryptu i 5 monografii. Jest członkiem wielu Rad Naukowych, Towarzystw Naukowo-Technicznych.

Antoni SAWICKI



Dr hab. inż. Antoni Sawicki, prof. Politechniki Częstochowskiej jest absolwentem Politechniki Częstochowskiej. Pracuje na tej Uczelni od 1977 roku. W 1988 roku obronił pracę doktorską, a w 2000 roku pracę habilitacyjną w Moskiewskim Instytucie Energetycznym. W 2001 roku został mianowany na stanowisko profesora nadzwyczajnego Politechniki Częstochowskiej. Obecnie pełni funkcję kierownika Zakładu Elektrotechnologii i Inteligentnych Budynków w Instytucie Elektroenergetyki. Jest autorem i współautorem ponad 160 publikacji naukowych w czasopismach polskich, amerykańskich, rosyjskich i niemieckich, 2 skryptów, 5 monografii i 16 projektów wynalazczych. Jego dorobek obejmuje prace głównie z zakresu teorii i praktyki nagrzewania łukiem elektrycznym. Jest członkiem SEP, od 1997 roku członkiem Zarządu Oddziału Katowickiego Polskiego Komitetu Elektrotermii, a od 1998 roku członkiem Prezydium Polskiego Komitetu Elektrotermii.

e-mail: sawickia@d.pcz.czyst.pl