

Grzegorz RANISZEWSKI  
Zbigniew KOŁACIŃSKI

## SKŁAD PLAZMY METALICZNEJ ŁUKU ELEKTRYCZNEGO PRĄDU STAŁEGO\*)

**STRESZCZENIE** *Zastosowania plazmy łuku elektrycznego można podzielić na: zastosowania w elektrotechnice oraz zastosowania w procesach termicznych (lub termochemicznych). W większości przypadków w skład plazmy - poza gazem, w którym pali się łuk występuje metal wprowadzony celowo lub występujący jako składnik niepożądany. Celem niniejszej pracy jest określenie wpływu wybranych metali na skład plazmy.*

*W pierwszej części krótko scharakteryzowano plazmę metaliczną. Następnie zaprezentowano metodykę obliczania składu plazmy. Na koniec przedstawiono zastosowany układ badawczy oraz przykładowe wyniki obliczeń.*

**Słowa kluczowe:** *skład plazmy, plazma metaliczna, diagnostyka plazmy*

---

\*) Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2009 jako projekt badawczy N510 1754 33 „Wpływ gazowych składników mineralnych na właściwości wyładowania łukowego prądu stałego”.

---

**mgr inż. Grzegorz RANISZEWSKI**  
e-mail: larryl@o2.pl

**prof. Zbigniew KOŁACIŃSKI**  
e-mail: zbigniew@p.lodz.pl

Katedra Aparatów Elektrycznych  
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki  
Politechnika Łódzka

## 1. WSTĘP

---

Plazma łuku elektrycznego w technice występuje głównie w elektrotechnice (w wyłącznikach, lampach łukowych i niektórych aplikacjach, w których występują wyładowania) i procesach termicznych, elektrochemicznych (metalurgii do cięcia, spawania, w piecach łukowych, przy nanoszeniu warstw, przy syntezie fulerenów i nanorurek, w utylizacji odpadów).

Dodatkowy element wprowadzony do plazmy wpływa na jej parametry równowagowe i termochemiczne mając istotny wpływ na właściwości plazmy i prowadzony proces.

Łuk elektryczny palący się pomiędzy dwiema elektrodami, które ulegają erozji występuje w wielu różnorodnych aplikacjach technologicznych. W literaturze można spotkać opracowania dotyczące rozkładu ciśnień cząstkowych i stężeń metalu w okolicach elektrod [1][2][4][15].

Cechą charakterystyczną wyładowań łukowych spotykanych w technice jest istotny wpływ oparów pochodzących z elektrod na właściwości tej plazmy. Jest to spowodowane niskim potencjałem jonizacji metali, które są stosowane w urządzeniach elektrotechnicznych. Dla przykładu wartość potencjału jonizacji dla żelaza wynosi 7,9 eV, miedzi, 7,73 eV, srebra – 7,58 eV, azotu – 14,53 eV, tlenu – 13,62 eV. Nawet niewielkie zanieczyszczenie materiałem elektrody (około 1%) istotnie zmienia wartość gęstości elektronów w wyładowaniu w szerokim zakresie temperatur. W wyniku tego ulega zmianie przewodność elektryczna, przewodność cieplna, temperatura, parametry równowagowe i termodynamiczne plazmy.

Urządzenia wysokiego napięcia są typowym przykładem występowania tego rodzaju wyładowania. Innym przykładem może być zastosowanie plazmy łuku elektrycznego do utylizacji odpadów. Łuk elektryczny zaczyna palić się wtedy w gazie neutralnym (np. argonie) a następnie topiąc związki mineralne w odpadach (w znaczącej większości  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  itp.) prowadzi do ich gazyfikacji, rozkładu termicznego, jonizacji i formowania plazmy łuku elektrycznego. Celem niniejszego opracowania jest określenie wpływu tych związków mineralnych na skład plazmy łuku elektrycznego.

## 2. SKŁAD PLAZMY

---

Plazma jest mieszaniną jonów, elektronów, cząstek obojętnych. W przypadku całkowicie zjonizowanego gazu plazmę tworzą jedynie elektrony i jony. Jednak nawet w przypadku jonizacji prostego gazu plazma może mieć bardziej złożony skład. Pojawiają się w niej jony z wieloma ładunkami elementarnymi.

W przypadku obecności metalu – atomy metalu mogą tworzyć z atomami gazu wiele kombinacji związków. Ze względu na rozpatrywany niski zakres temperatur (do 10000 K) i ciśnienie atmosferyczne procesu można założyć, że plazma jest plazmą w skład której wchodzi jedynie obojętne cząsteczki gazu roboczego (argonu), jednokrotnie zjonizowany argon, obojętne cząsteczki metalu, jednokrotnie zjonizowany metal i elektrony.

Metal w plazmie pojawia się na skutek działań niezamierzonych. Może też być celowo wprowadzany do plazmy. Pierwszy przypadek jest obecny np. na skutek erozji elektrod lub styków. Opary metalu pojawiają się w plazmie także podczas cięcia i spawania. W wielu aplikacjach technologicznych jego obecność jest jednak nieprzypadkowa, a nawet celowa i jego ilość jest kontrolowana, co ma wpływ na jakość wyładowania łukowego.

Dzięki popularności zastosowania miedzi na materiały stykowe powstało wiele opracowań na temat składu i właściwości zawierającej miedź plazmy łuku elektrycznego palącego się w atmosferze azotowej, argonowej i w powietrzu [8][9][18]. W niniejszym opracowaniu zajmiemy się składem plazmy argonowej z metalami występującymi najczęściej w skład popiołów z odpadów przemysłowych, medycznych i komunalnych. W skład popiołów lotnych wchodzi głównie związki zawierające Si, Ca, Al, Fe, Mg, K. Chociaż większość popiołów można ponownie użyć, szczególnie w przemyśle budowlanym np. przy produkcji wyrobów betonowych, wypełnień strukturalnych, nasypów, warstw nośnych i filtracyjnych dla dróg, w przemyśle ceramicznym, jako składnik nawozów w rolnictwie, jako sorbent przy utylizacji odpadów [6]. 75% popiołów lotnych wciąż jest deponowane na wysypiskach lub składowiskach [5].

Składowany popiół może zawierać metale zaliczane do niebezpiecznych i szkodliwych dla zdrowia jak nikiel, wanad, arsen, beryl, kadm, bar, chrom, miedź, molibden, cynk, ołów, selen, uran, tor, rad.

Do efektywnego rozkładu związków potrzebna jest wysoka temperatura. Dzięki plazmie łuku elektrycznego uzyskujemy temperaturę umożliwiającą neutralizację tych związków przez wityfikację.

W tabeli 1 przedstawiono średnie wartości związków w popiołach z elektrowni węglowych na świecie [16]. Tabela 2 przedstawia skład chemiczny osadów, odpadów medycznych i przemysłowych w Polsce [17].

**TABELA 1**

Skład popiołów z elektrowni węglowych na świecie [16]

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
Jugosławia	52,6	26,3	6,8	6,0	2,2	0,2	1,1	1,0
Wielka Brytania	50,1	28,1	11,7	1,6	1,5	0,3	0,6	-
USA	52,2	19,0	15,7	4,5	0,9	0,8	2,0	1,3
Holandia	50,5	25,7	6,5	4,3	2,2	2,0	4,4	-
Japonia	57,5	26,1	4,0	5,1	1,3	1,5	1,4	0,4
Tajwan	48,8	23,2	4,2	3,9	1,0	0,2	1,1	-
Polska	50,8	23,9	8,6	3,6	2,8	0,8	2,9	0,8
Arabia Saudyjska	52,3	25,2	4,6	10,0	2,2	-	-	0,8
Chiny (Wuhan)	47,6	23,4	14,6	1,2	0,7	1,1	-	0,9
Hong Kong	50,0	37,1	3,1	3,40	0,5	0,6	-	0,7

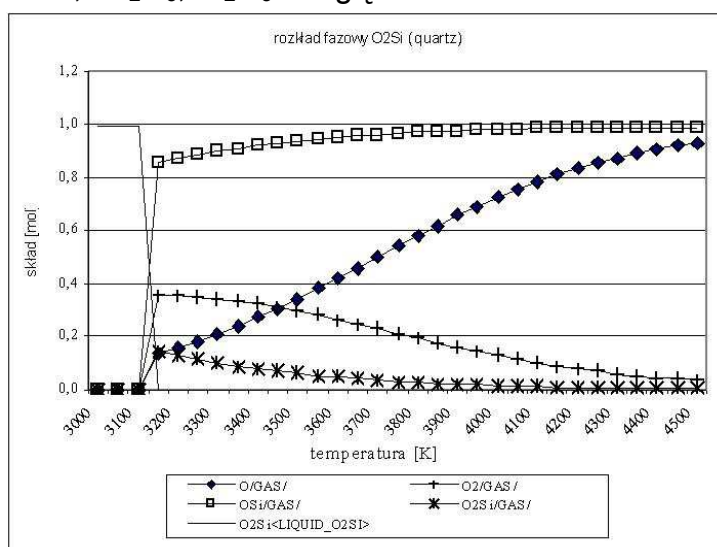
**TABELA 2**

Skład chemiczny odpadów w Polsce [17]

związek		osady	odpady medyczne	odpady przemysłowe
SiO <sub>2</sub>	%	23.27	15.9	45.80
CaO	%	8.36	12.24	11.87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	1.96	4.69	6.40
MgO	%	1.82	2.24	2.76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	5.57	6.25	12.60
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0.59	1.19	0.29
TiO <sub>2</sub>	%	0.2	0.9	1.69
CoO	%	<0.015	0.02	0.02
CuO	%	0.062	0.09	0.31
NiO	%	<0.015	0.23	0.05
ZnO	%	0.60	0.39	4.62
CdO	%	<0.015	<0.01	<0.01
Sog	%	1.89	1.37	1.38
PbO	%	-	-	-
Na <sub>2</sub> O	%	2.0	-	-
K <sub>2</sub> O	%	0	-	-
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.043	-	-

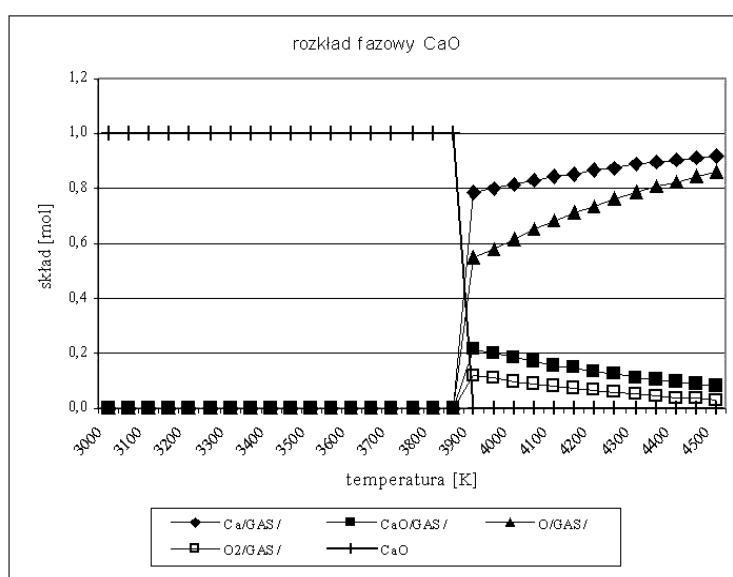
Aby przewidzieć jakie będą produkty rozkładu poszczególnych składników odpadów pod wpływem działania temperatury łuku elektrycznego przeprowadzono symulacje wykorzystując program CHEMSAGE.

Rysunki 1-4 pokazują rozkład fazowy dla najczęściej występujących związków –  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Mogą one stanowić nawet 95% odpadów.



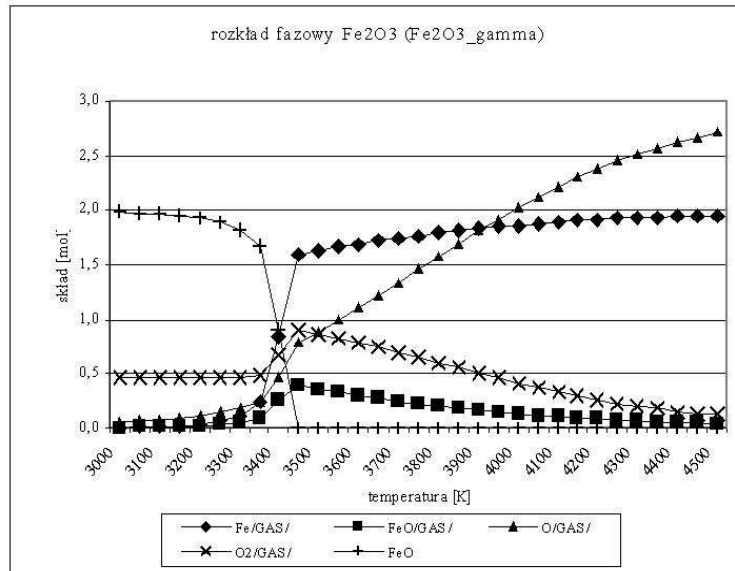
Rys. 1. Rozkład fazowy  $\text{SiO}_2$  w przedziale temperatur 3000-4500 K

W temperaturze 3100K płynny  $\text{SiO}_2$  przechodzi do fazy gazowej tworząc tlenki – głównie  $\text{SiO}_2$ . Wraz ze wzrostem temperatury poszczególne produkty rozkładu ulegają dalszemu rozbiciu uwalniając tlen  $\text{O}_2$ .



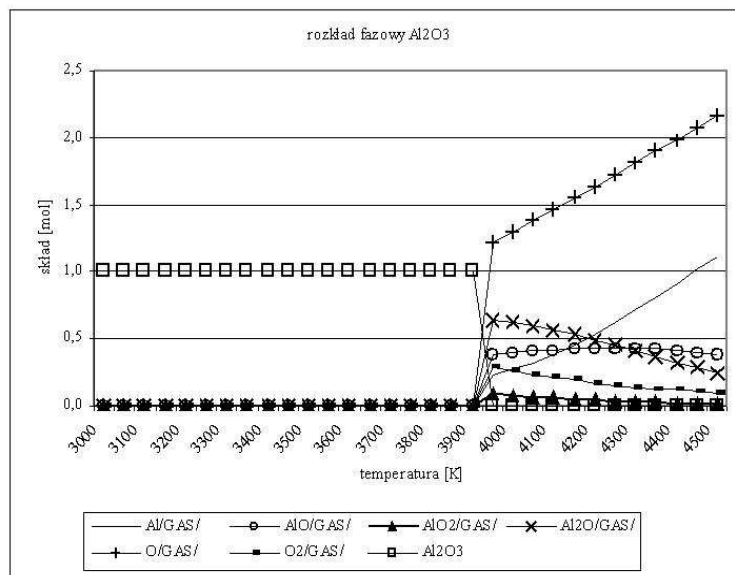
Rys. 2. Rozkład fazowy  $\text{CaO}$  w przedziale temperatur 3000-4500 K

CaO przechodzi w stan gazowy dopiero powyżej 3900 K. Głównymi produktami rozpadu są formy gazowe Ca oraz O<sub>2</sub>.



Rys. 3. Rozkład fazowy Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> w przedziale temperatur 3000-4500 K

W temperaturze 3000 K Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> jest już rozbite na śladowe ilości tlenków, tlen cząsteczkowy i tlenek żelaza FeO, który przechodzi do fazy gazowej dopiero w temperaturze powyżej 3500 K.



Rys. 4. Rozkład fazowy Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> w przedziale temperatur 3000-4500 K

Z rozpatrywanych związków  $\text{Al}_2\text{O}_3$  wymaga najwyższej temperatury do przejścia w stan gazowy.

Analogiczną symulację rozkładu przeprowadzono dla związków uważanych za niebezpieczne, a także dla odpadu będącego mieszaniną tych związków.

Dzięki przeprowadzonym symulacjom ustalono, że w temperaturze powyżej 3000 K podczas rozkładu popiołów powstają gazy zawierające następujące związki w fazie gazowej:

- Al, AlO, AlO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>,
- Ca, CaO, Ca<sub>2</sub>,
- Cr, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>, CrO, CrO<sub>2</sub>, CrO<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O, Cr<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,
- Fe, FeO, FeO<sub>2</sub>,
- Mg, MgO, Mg<sub>2</sub>,
- Na, Na<sub>2</sub>, NaO, Na<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,
- O, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>,
- SiO, SiO<sub>2</sub>, Si, Si<sub>3</sub>, Si<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [13].

Większość odpadów ulega zgazowaniu, a następnie rozpadowi w temperaturach powyżej 3500 K. Temperatura taka możliwa jest do uzyskania jedynie za pomocą plazmy. Co więcej – dzięki wysokiej temperaturze, a także możliwości prowadzenia procesu w warunkach beztlennych zostaje wyeliminowana możliwość powstawania innych niebezpiecznych związków, jak dioksyn, furanów, PCB itp. Czyli, że dostarczając energii w postaci plazmy łuku elektrycznego osiągamy temperatury pozwalające przekształcić niebezpieczny lub szkodliwy materiał w związki, które po wityfikacji mogą zostać ponownie wykorzystane jako materiał przyjazny dla środowiska.

---

### 3. SPALANIE BEZODPADOWE

---

Spalanie niektórych odpadów powoduje tworzenie się stosunkowo wysokotoksycznych pozostałości. Toksyczne popioły, osady ściekowe, osady pofiltracyjne, pozostałości sedymentacyjne mogą być deponowane na składowiskach odpadów pod warunkiem, że zostały wcześniej unieszkodliwione i przekształcone w odpady niewypłukiwalne. Kiedy odpady zostają podgrzane do odpowiedniej temperatury, pierwiastki w nich zawarte, takie jak związki mineralne i wysokotoksyczne metale topnieją i następuje ich zeszklenie. Nawet częściowe zestalenie się (wityfikacja) tych pozostałości wymaga temperatury przekraczającej 1700K, która nie jest osiągalna w większości spalarni, a którą łatwo można uzyskać w reaktorach plazmowych. Temperatury rzędu nawet 10000 K są typowe dla pieców plazmowych, a w tej temperaturze wszystkie związki nieorga-





waniu intensywności dwóch linii spektralnych związanych z dwoma różnymi stanami wzbudzenia atomu. Oznaczając dwie linie spektralne indeksami 1 i 2 stosunek natężeń  $I_1/I_2$  obu linii można wyrazić następująco:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 \cdot g_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot z_1 \cdot N_1}{A_2 \cdot g_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot z_2 \cdot N_2} \cdot \exp\left(\frac{E_1 - E_2}{k \cdot T}\right) \quad (1)$$

- $A_1, A_2$  – prawdopodobieństwo przejścia spontanicznego  
 $g_1, g_2, z_1, z_2$  – wagi statystyczne i funkcje podziału  
 $\varepsilon$  – częstotliwości linii spektralnych  
 $N_1, N_2$  – koncentracje pierwiastków  
 $E_1, E_2$  – energia wzbudzenia  
 $k$  – stała Boltzmana  
 $T$  – temperatura

W badaniach wykorzystano linie należące do tego samego pierwiastka o tym samym stopniu jonizacji. Dzięki temu funkcje  $z_1$  i  $z_2$  oraz koncentracje pierwiastka  $N_1$  i  $N_2$  są sobie równe.

Temperaturę plazmy obliczyć wtedy można ze wzoru:

$$T = \frac{E_1 - E_2}{\ln\left(\frac{A_1 \cdot g_1}{A_2 \cdot g_2}\right) - \ln\left(\frac{\nu_2}{\nu_1}\right) - \ln\left(\frac{I_{\nu_1}}{I_{\nu_2}}\right)} \quad (2)$$

gdzie:

- $\nu$  – częstotliwość linii;  
 $\varepsilon$  – intensywności linii widmowych przeliczone za pomocą przekształcenia Abela;

Dużą zaletą tej metody jest to, że obliczenia temperatury praktycznie nie zależą od koncentracji badanego pierwiastka. Dlatego w diagnostyce plazmy można wprowadzić pierwiastek, który pełniłby rolę „termometru”, w przypadku kiedy energie wzbudzenia, prawdopodobieństwa przejścia spontanicznego, wagi statystyczne pozostałych składników plazmy nie są znane. Pierwiastek-termometr wprowadzany do plazmy powinien nie zmieniać temperatury (oziębienia) plazmy ani nie zmienić znacząco pozostałych parametrów plazmy. Linie spektralne wprowadzanego pierwiastka powinny być wyraźne. Spełnienie tego warunku wymaga, aby ten pierwiastek miał zbliżony potencjał jonizacji do pozostałych składników w plazmie. W przeciwnym wypadku należy stosować minimalne ilości tego pierwiastka [10]. Wygodnie jest operować materiałem, z któ-

rego wykonane są styki. Stosując materiał elektrod uzyskujemy naturalny pierwiastek – termometr, którego koncentracja w łuku jest dostatecznie duża aby wykonać pomiary. W przeciwnym wypadku pierwiastek –detektor należy wprowadzić do łuku. Dla każdego niemal ze stosowanych materiałów może być mierzona temperatura łuku pod warunkiem, że materiałem będzie pierwiastek o dużej czystości – najlepiej spektralnie czysty.

Linie pierwiastka – termometru powinny spełniać następujące wymagania:

- musi być znana energia wzbudzenia  $E$ , prawdopodobieństwo przejścia  $A$ , i waga statystyczna  $g$ . Stanowi to największy problem gdyż dokładne dane te nie są dostępne dla wszystkich linii;
- linie użyte do pomiaru powinny mieć możliwie zbliżone długości fal. Zależnie od zastosowanego urządzenia spektroskopowego linie muszą mieścić się w zakresie największej rozdzielczości i dokładności przyrządu;
- linie powinny mieć możliwie dużą intensywność, aby mogły być rejestrowane przez fotonowielacz;
- zagęszczenie linii w rejonie badanych linii spektralnych powinno być małe. Spełnienie tego warunku umożliwia oddzielenie tych linii od pozostałego widma;
- długości fal muszą się mieścić w zakresie czułości przyrządu.

Analizy przydatności metody dwu linii spektralnych przeprowadził Kranz [11,12]. Korzystając z wyliczonych przez niego danych można ograniczyć liczbę błędów w pomiarach do błędu urządzenia detekcyjnego (fotonowielacz), i pomiarowego (oscylloskop). Całkowity błąd pomiaru można szacować na około 10%. Wg Kranza najbardziej korzystne warunki pomiaru są wówczas, kiedy w odpowiednim zakresie temperatur dane atomowe wybranych linii są przybliżone do podanych w tabeli 3 [10]:

**TABELA 3**

Energie wzbudzenia i dane atomowe linii spektralnych w danych zakresach temperatur

T	$E_2 - E_1$	$A_1g_1/A_2g_2$
k	eV	-
1000-3000	0,179	0,3882
2000-4000	0,476	0,1262
3000-5000	0,895	0,0625
4000-6000	1,433	0,0320
5000-7000	2,088	0,0157

W zakresie światła widzialnego wyodrębniono następujące linie spełniające powyższe wymagania [7]:

- dla Cu:

387,31 nm ; 389,41 nm; 510,55 nm; 515,32 nm; 521,82 nm;

- dla Fe:

445,91 nm; 446,17 nm

- dla Mo:

536,06 nm; 557,045 nm

- dla Ta:

535,47 nm; 540,25 nm

- dla Mn:

551,68 nm; 601,35 nm

- dla W:

440,83 nm; 441,22 nm; 465,77 nm; 465,99 nm; 522,47 nm; 551,47 nm

## 5. OBLICZENIA

---

Stabilność wyładowania łukowego zależy od dwóch czynników: od parametrów jakościowych źródła zasilania oraz od zmian rezystancji łuku. Tlenki pochodzące ze wsadu pieca zmieniają efektywny potencjał jonizacji i zmieniają konduktancję łuku.

W prowadzonych badaniach [14] związki zawierające metal dostarczano w kontrolowany sposób poprzez jedną z elektrod. Łuk palił się w atmosferze argonowej. Założono, że tylko cząsteczki metalu pojawiają się w atmosferze argonu. Założono również, że plazma znajduje się w stanie lokalnej równowagi termodynamicznej.

Ponieważ założono, że poniżej 10000 K wpływ drugiego i kolejnych stopni jonizacji może zostać pominięty w dalszych obliczeniach rozważono plazmę pięcioskładnikową składającą się z:

- elektronów  $N_e$ ,
- niezjonizowanych cząsteczek gazu neutralnego  $N_{Ar}$ ,
- niezjonizowanych cząsteczek metalu  $N_{Me}$ ,
- jednokrotnie zjonizowanego argonu  $N_{Ar^+}$ ,
- jednokrotnie zjonizowanego metalu  $N_{Me^+}$ .

Otrzymano pięć niewiadomych. Aby je obliczyć ułożono układ pięciu równań nieliniowych:

Równania Saha dla każdego pierwiastka wchodzącego w skład plazmy:

$$\frac{N_e \cdot N_{Ar^+}}{N_{Ar}} = 2 \cdot \frac{u_{Ar^+}(T)}{u_{Ar}(T)} \cdot \frac{(2 \cdot \pi \cdot m \cdot k \cdot T)^{3/2}}{h^3} \cdot \exp\left(-\frac{E_{Ar} - \Delta E_{Ar}}{kT}\right)$$

$$\frac{N_e \cdot N_{Me^+}}{N_{Me}} = 2 \cdot \frac{u_{Me^+}(T)}{u_{Me}(T)} \cdot \frac{(2 \cdot \pi \cdot m \cdot k \cdot T)^{3/2}}{h^3} \cdot \exp\left(-\frac{E_{Me} - \Delta E_{Me}}{kT}\right)$$

prawo Daltona:

$$p = (N_{Ar} + N_{Ar^+} + N_{Me} + N_{Me^+} + N_e) \cdot k \cdot T$$

równanie ładunku:

$$N_e = N_{Ar^+} + N_{Me^+} + N_e$$

Zawartość procentowa metalu w gazie:

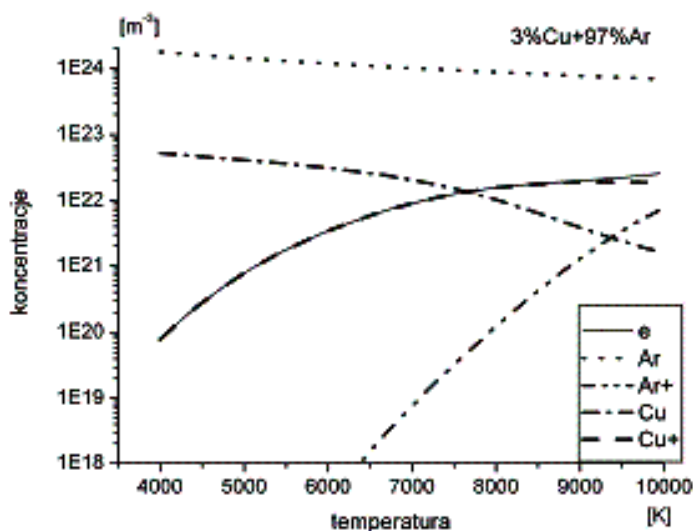
$$x = \frac{N_{Me} + N_{Me^+}}{N_{Me} + N_{Me^+} + N_{Ar} + N_{Ar^+}}$$

gdzie:

- $u_{Ar}(T)$  – funkcja podziału dla argonu;
- $u_{Ar^+}(T)$  – funkcja podziału dla jednokrotnie zjonizowanego argonu;
- $u_{Me}(T)$  – funkcja podziału dla metalu;
- $u_{Me^+}(T)$  – funkcja podziału dla jednokrotnie zjonizowanego metalu;
- $m$  – masa elektronu;
- $h$  – stała Plancka;
- $k$  – stała Boltzmana;
- $E_{Ar}$  – energia jonizacji dla argonu;
- $E_{Me}$  – energia jonizacji dla metalu;
- $\Delta E_{Ar}$  – obniżenie energii jonizacji dla argonu;
- $\Delta E_{Me}$  – obniżenie energii jonizacji dla metalu;
- $T$  – temperatura [K].

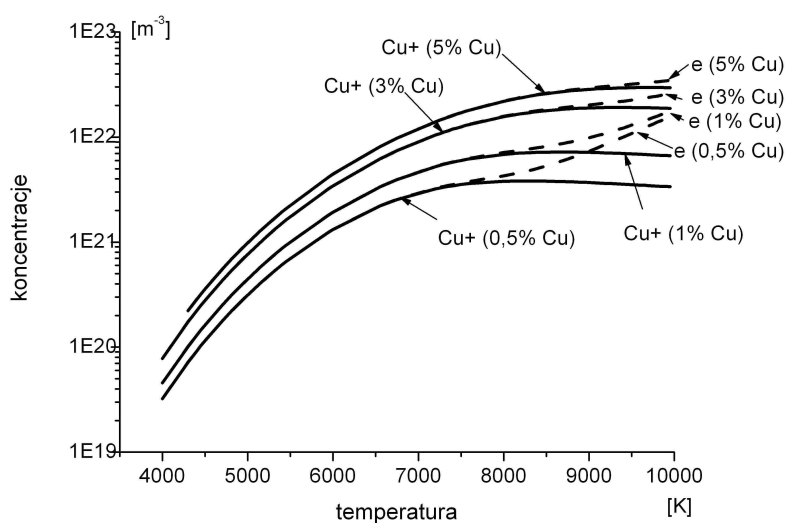
Ponieważ do pomiaru temperatury wybrano miedź wyliczono jego wpływ na gęstość elektronów.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki obliczeń składu plazmy argonowej z 3% domieszką miedzi, gdzie  $N_e$  – gęstość elektronów,  $Ar$  – gęstość niezjonizowanego argonu,  $Ar^+$  – gęstość jednokrotnie zjonizowanego argonu,  $Cu$  – gęstość niezjonizowanej miedzi,  $Cu^+$  – gęstość jednokrotnie zjonizowanej miedzi.



Rys. 6. Skład plazmy argonowej z 3% zawartością miedzi

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że gęstość elektronów praktycznie pokrywa się z gęstością miedzi. Oznacza to, że nawet niewielka ilość miedzi w plazmie ma duży wpływ na jej parametry. Nawet w przypadku zastosowania 0,5% miedzi (pochodzącej głównie z erozji styków). Dopiero w temperaturze powyżej 9000 K należy uwzględnić obecność metalu. Analogiczne obliczenia przeprowadzono dla innych składników odpadów (rys. 7 – 9)

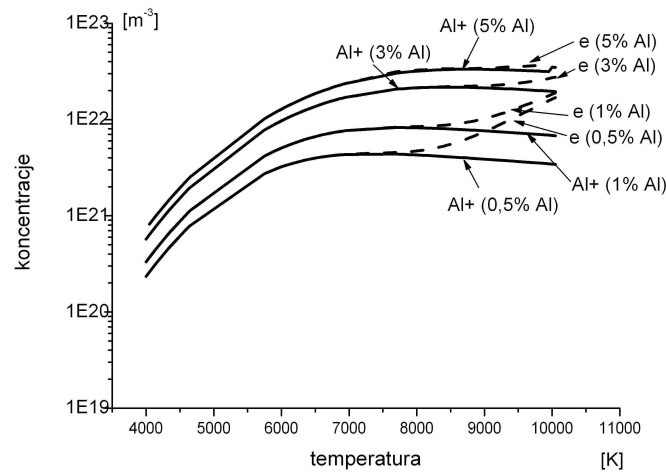


Rys. 7. Gęstość elektronów i jonów miedzi dla różnej zawartości miedzi w plazmie

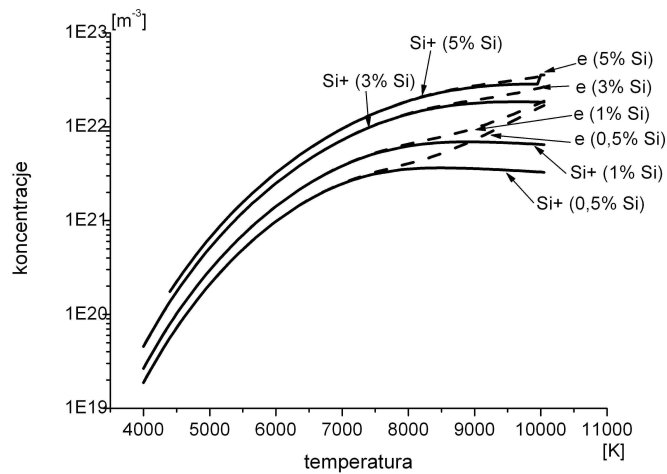
Obliczono wpływ miedzi na parametry plazmy dla różnej zawartości metalu w plazmie. Analogiczne obliczenia przeprowadzono dla plazmy argonowej z metalami będącymi głównym składnikiem odpadów.

Na rysunkach 7-15 zastosowano następujące oznaczenia:

- $e$  – koncentracja elektronów;
- $Ar$  – koncentracja atomów argonu,
- $Ar^+$  – koncentracja jonów argonu;
- $Cu, Al, Si, Fe$  – koncentracja atomów domieszki – odpowiednio miedzi, glinu, krzemu, żelaza;
- $Cu^+, Al^+, Si^+, Fe^+$  – koncentracja jonów domieszki – odpowiednio miedzi, glinu, krzemu, żelaza.

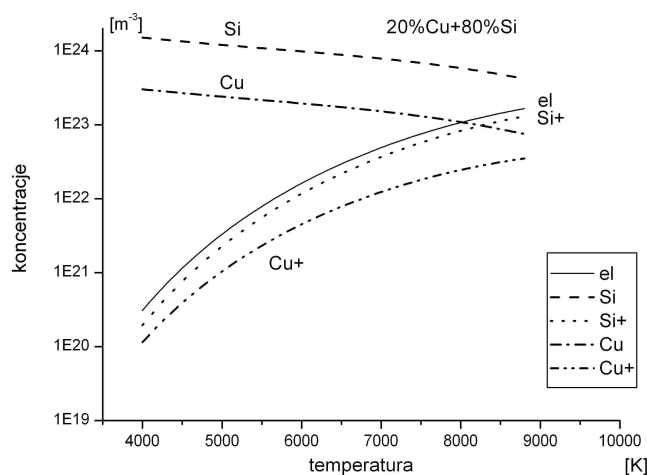


Rys. 8. Gęstość elektronów i jonów glinu dla różnej zawartości glinu w plazmie

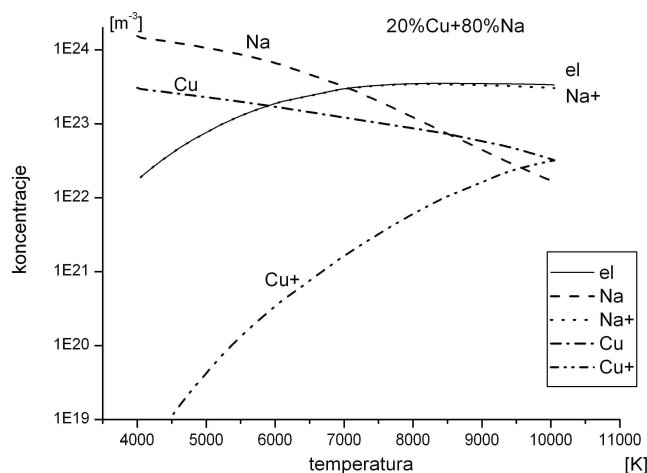


Rys. 9. Gęstość elektronów i jonów krzemu dla różnej zawartości krzemu w plazmie

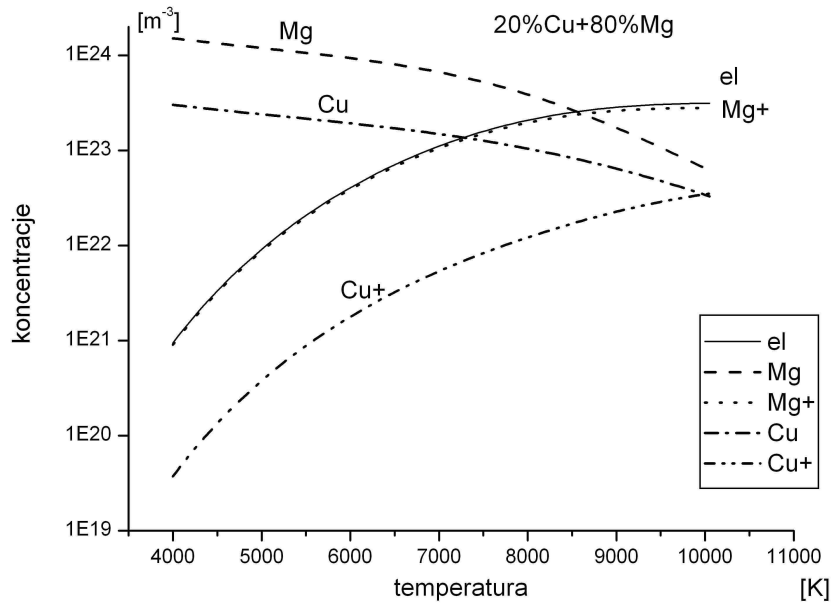
Z przeprowadzonych wyliczeń wynika, że wprowadzenie nawet niewielkiej – 0,5% ilości - któregośkolwiek z rozpatrywanych metali na tyle silnie wpływa na skład plazmy, że do dalszych obliczeń można pominąć obecność argonu z uwagi na jego słaby wpływ na gęstość elektronów. Dla wszystkich przypadków stwierdzono silną zależność gęstości elektronów od wprowadzonego metalu. Zarówno dla badanych pierwiastków jak i dla miedzi, którego wpływ na skład plazmy podczas pomiarów jest niepożądany. Ponieważ obecność gazu inertnego nie ma większego wpływu na skład plazmy poniżej 10000K, obliczono skład plazmy metalicznej składającej się tylko z metali – badanego i miedzi jako detektora. Na rysunkach 10-15 przedstawiono obliczenia plazmy metalicznej z 20% zawartością miedzi dla mieszanin Si-Cu, Na-Cu, Mg-Cu, Al-Cu, Ca-Cu, Fe-Cu.



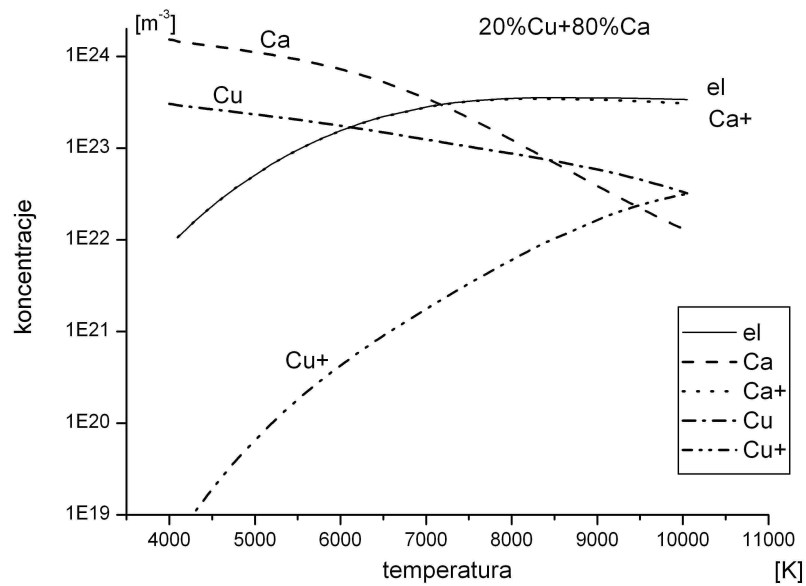
Rys. 10. Skład plazmy metalicznej z 20% zawartością miedzi i 80% Si



Rys. 11. Skład plazmy metalicznej z 20% zawartością miedzi i 80% Na

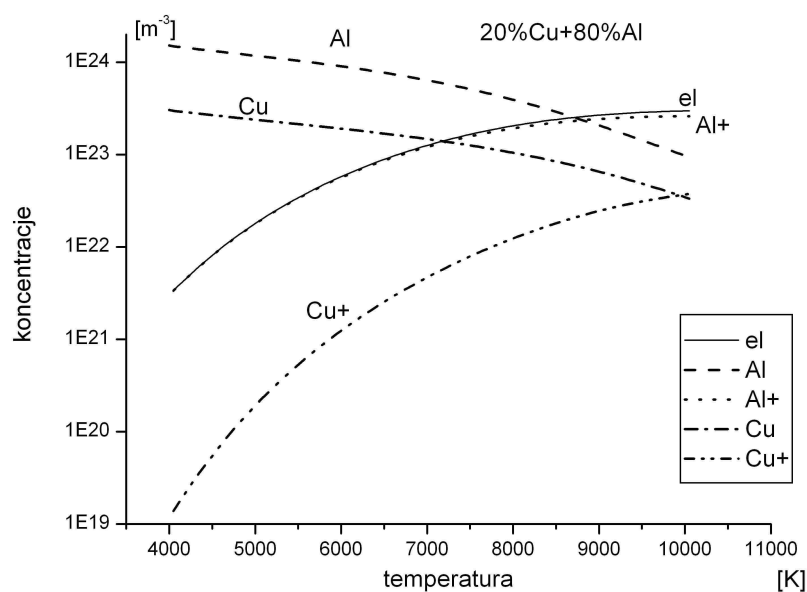


Rys. 12. Skład plazmy metalicznej z 20% zawartością miedzi i 80% Mg

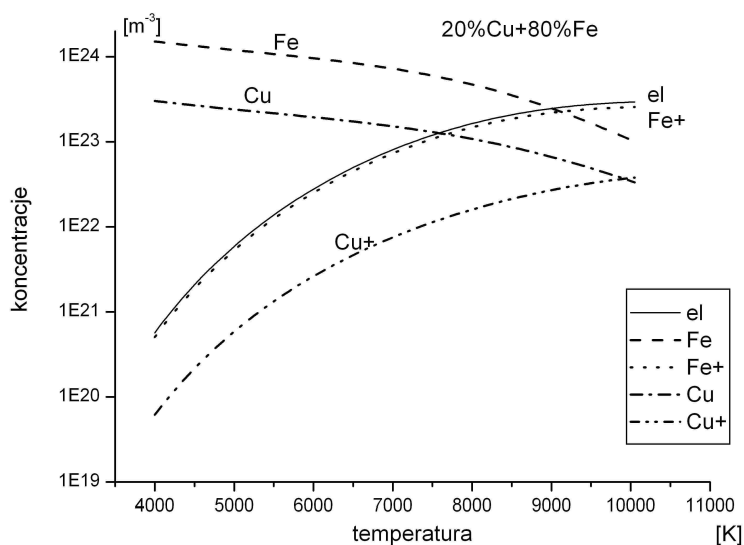


Rys. 13. Skład plazmy metalicznej z 20% zawartością miedzi i 80% Ca





Rys. 14. Skład plazmy metalicznej z 20% zawartością miedzi i 80% Al



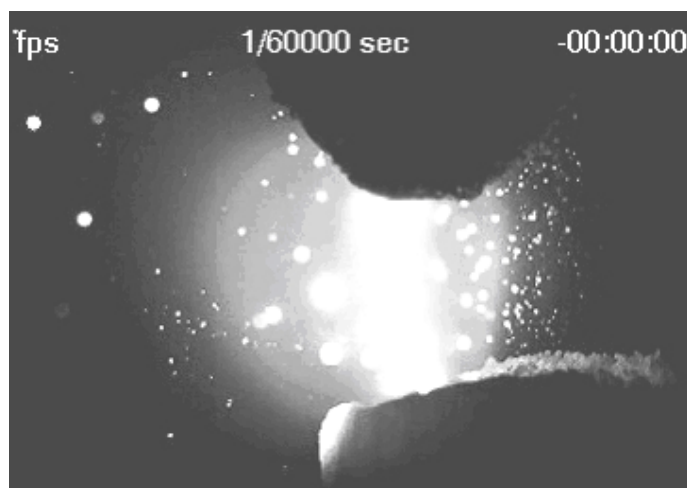
Rys. 15. Skład plazmy metalicznej z 20% zawartością miedzi i 80% Fe

Przyjęto, że pierwiastkiem detekcyjnym jest miedź w ilości 20% masowych dodawana do badanej próbki. W rzeczywistości wartość stężenia miedzi nie przekracza 3%. Z wyliczeń wynika, że zastosowanie nawet 20% masowych miedzi nie wpływa znacząco na gęstość elektronów. Przy plazmie metalicznej gęstość elektronów, a więc i główne parametry plazmy zależą w zdecydowa-

nym stopniu od obecności badanego metalu. Świadczy o tym krzywa gęstości elektronów pokrywająca się praktycznie z krzywą jonów metalu.

## 6. UKŁAD BADAWCZY

Łuk elektryczny pali się pomiędzy dwiema elektrodami o przekroju kołowym o średnicy 6 mm. Odległość pomiędzy elektrodami wynosi 3 mm. Jedna z elektrod jest wydrążona. W wydrążeniu umieszczona jest badana próbka w postaci proszku – mieszaniny badanego metalu wraz z metalem będącym swego rodzaju „termometrem”. W rozpatrywanym przypadku był on wprowadzany w postaci proszku w mieszaninie wraz z badaną próbką. Ważnym jest, aby wprowadzenie tego pierwiastka nie wpłynęło znacząco na skład plazmy. Komora badawcza wyposażona jest w okienka umożliwiające pomiary pirometryczne, spektroskopowe, a także wizualną obserwację procesu. W fazie początkowej eksperymentu łuk elektryczny inicjowany jest za pomocą drucika miedzianego, który łączy katodę i anodę. Pod wpływem prądu elektrycznego drucik przepala się i odpada od elektrod. Łuk elektryczny palący się pomiędzy dwiema elektrodami rozgrzewa materiał badany, który doprowadzony do temperatury wrzenia wnika w kanał łukowy. Rysunek 16 przedstawia kadr z filmu wykonany kamerą szybką przy szybkości nagrywania 12000 klatek na sekundę.



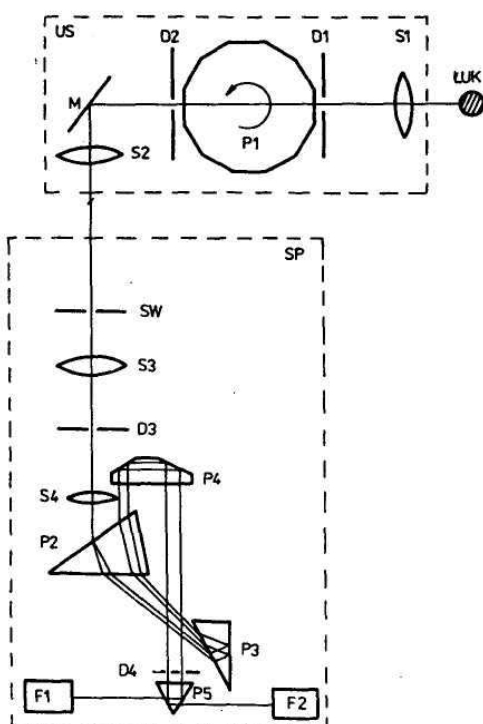
Rys. 16. Opary metalu wnikaące w kanał łuku elektrycznego. Kadr z filmu nakręconego kamerą szybką. Odległość między elektrodami – 3mm

Obraz łuku elektrycznego trafia do układu optycznego. Jednym z elementów układu optycznego jest pryzmat dwunastokątny napędzany turbiną po-

wietrzną. Obraca się on z prędkością dochodzącą do 1000 obrotów na sekundę, dzięki czemu możliwa jest rejestracja 12000 profili łuku w ciągu sekundy.

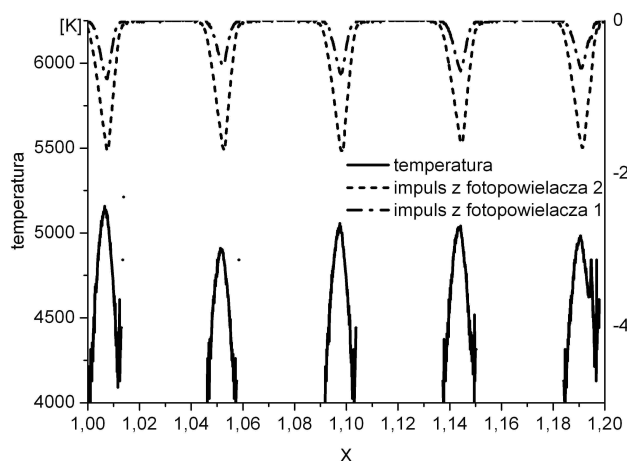
Zakładając, że dla każdego profilu potrzebujemy uzyskać co najmniej 20 punktów pomiarowych oraz że wystarczające jest wykorzystanie tylko 10% możliwości turbiny powietrznej (100 obr./s = 1200 profili/s) urządzenie rejestrujące powinno mieć możliwość rejestracji  $1200 \cdot 20 = 24000$  punktów na sekundę. Przy pomiarze trwającym 30 s potrzebujemy zarejestrować 720000 intensywności linii widmowej dla pierwszej długości fali, tyleż samo dla drugiej długości fali, prądu i napięcia. Zastosowane rozwiązania w obecnie produkowanych urządzeniach ze względów technicznych i ekonomicznych nie pozwalają na użycie spektroskopów opartych na matrycach światłoczułych.

W prowadzonych badaniach przyjęto inne rozwiązanie (rys. 17). Promień światła trafia do przyrządu spektralnego SP. Tutaj przechodzi przez zestaw pryzmatów (P2, P3, P4, P5), szczelin (D1, D2, D3, D4) i soczewek (S1, S2, S3, S4) ulegając rozszczepieniu. Dzięki temu obserwować można całe widmo widzialne. Końcowy pryzmat P5 rozdziela promień na dwa fotopowielacze F1 i F2. Przed pryzmatem P5 są dwie szczeliny, które zaprojektowane zostały aby przepuszczać tylko dwa interesujące pasma – w tym przypadku linie charakterystyczne dla miedzi – 510,55 nm i 521,82 nm. Światło tych dwóch linii jest wzmacniane i w postaci impulsu napięciowego trafia do oscyloskopu.



**Rys. 17. Schemat układu pomiarowego.** US – urządzenie skaningowe, SP – urządzenie spektroskopowe, P1 – pryzmat dwunastokątny

Korzystając z metody dwóch linii spektralnych – Ornsteina – jest możliwe wyliczenie temperatury (rys. 18). Ponieważ łuk można potraktować jako obiekt cylindryczny, aby uzyskać bardziej precyzyjne wyniki należy dokonać odpowiednich przekształceń (przekształcenie Abela).



Rys. 18. Intensywność linii widmowych i temperatury dla łuku C-Cu

W celu wyznaczenia temperatury dowolnego elementu plazmy należy dokonać szeregu pomiarów w różnych miejscach przekroju plazmy i znaleźć intensywności  $I_1$  i  $I_2$  dla tego samego elementu łuku. W przypadku kanału łukowego o przekroju kołowym należy w tym celu zastosować przekształcenie odwrotne Abela.

## 7. WNIOSKI

Zaprezentowano wpływ obecności metalu na łuk elektryczny palący się w argonie oraz udowodniono użyteczność zastosowania miedzi jako pierwiastka – termometru – w spektralnej analizie temperatury łuku, korzystając z metody dwóch linii spektralnych.

Metale tworzące  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  itp. stanowią nawet 90% składu popiołów lotnych. Dlatego też obliczenia przeprowadzono dla tychże metali. Z powodu znaczenia obecności metali w plazmie argonowej, założono, że plazma składa się tylko z elementów pochodzących z metali. Dla każdego z rozpatrywanych pierwiastków uzyskano takie same zależności. Na koncentrację elektronów w temperaturach do 7000K dominujący wpływ ma obecność domieszki metali. Zastosowanie nawet minimalnej ilości metalu (poniżej 1%)

wpływa znacząco na parametry plazmy. Świadczy o tym krzywa koncentracji elektronów, która praktycznie pokrywa się z krzywą jonów obecnego metalu.

Przy pomiarach temperatury zawartość nawet kilkudziesięciu procent miedzi w plazmie metalicznej złożonej z atomów i jonów miedzi, atomów i jonów rozpatrywanego metalu oraz elektronów ilość elektronów jest zdominowana przez ilość jonów badanego metalu dla temperatur poniżej 7000 K. Jednocześnie nawet minimalna zawartość metalu w plazmie argonowej decyduje o właściwościach tej plazmy. Oznacza to, że dodatek miedzi do próbki zawierającej Si, Al, Fe, Ca, Na, Mg lub K nie zmienia przewodności elektrycznej i może być użyty w badaniach jako pierwiastek detekcyjny dla metod spektroskopowych.

## LITERATURA

1. Andanson P., Cheminat B.: *Rev.Phys.Appl.* 14 (1979) 775.
2. Babich I.L., Veklich A.N., Zhovtyansky V.A., Cheredarchuk A.I.: *J.Eng.Phys. Thermophys.* 71 (1998) 127.
3. Cedzyska K., Kolacinski Z., Izydorczyk M., Sroczyński W.: *Plasma Vitrification of Waste Incinerator Ashes. Proc. „Ash Utilization Symposium”* Lexington, Kentucky, (1999) Compact Disc Edition.
4. Cheminat B., Gadaud K., Andanson P.: *J. Phys. D: Appl. Phys.* 20 (1987) 444.
5. DiGioia, Anthony M., Nuzzo Jr. and William L.: *Fly ash as structural fill. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Power Division, New York, NY, June 1972.*
6. Ferreira C., Ribeiro A., Ottosen L.: *Possible applications for municipal solid waste fly ash. Journal of Hazardous Materials, B96 (2003) 201-216.*
7. Gałązka J.: *Atlas do analizy spektroskopowej.* Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 1966r.
8. Gleizes A., Bouazuz M., Gonzalez J.J., Razafinimanana M.: *Influence of the Anode Material on an Argon Arc. IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.25, No.5, Oct.1997, 891-896.*
9. Kołaciński Z.: *Zjawiska cieplne determinujące ponowny zapłon łuku krótkiego w łącznikach niskiego napięcia. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Rozprawy Naukowe, Łódź, 1983.*
10. Kołaciński Z.: *Elektrooptyczne urządzenie spektralne do pomiaru temperatury łuku. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Elektryka, str. 77-88, 1978.*
11. Kranz E.: *Die Anwendung eines Plasmastrahls für spektroskopische Temperaturbestimmungen und zur Analyse von Lösungen und Pulvern. Proc. XIV Collog. Spectrosc. Internat. Debrecen, 1967 str. 697, Hungary.*
12. Kranz E.: *Temperaturbestimmung an Lichtbogenplasmen. XIII Intern Wiss. Kollog. T.H.Ilmensu, 1968, str. 61.*
13. Raniszewski G., Kołaciński Z., Szymański Ł.: *Zastosowanie miedzi jako pierwiastka charakterystycznego przy pomiarach temperatury metodą Ornsteina. ELMECO-6, IEEE Lublin, 2008.*

14. Raniszewski G., Kołaciński Z., Szymański Ł.: Influence of mineral compounds of ashes on electric arc plasma composition. Symposium on plasma physics and technology, Institute of Physics Academy of Sciences of the Czech Republic, Praha, 2008.
15. Rahal A.M., Rahhaoui B., Vacque S.: J. Phys. D: Appl. Phys. 17 (1984) 1807.
16. Sollars C., Ilic M., Cheesman C., Knight J.: Mineralogy and microstructure of sintered lignite coal fly ash. Fuel, Vol. 82, 2005, 331-336.
17. Szymański Ł.: Termiczny rozkład i utylizacja materiałów łukiem elektrycznym. Rozprawa doktorska, Instytut Aparatów Elektrycznych, Politechnika Łódzka, Łódź 2004.
18. Veklich A.N., Babich I.L., Cheredarchuk A.I.: Multicomponent thermal plasma of arc discharges. Czechoslovak Journal of Physics, Vol.51, 27-34, 2001.

*Rękopis dostarczono dnia 3.10.2008 r.*

**Opiniował: prof. dr hab. inż. Antoni CIEŚLA**

## DC ELECTRIC ARC METAL PLASMA COMPOSITION

Grzegorz RANISZEWSKI, Zbigniew KOŁACIŃSKI

**ABSTRACT** *The applications of electric arc plasma can be classified in two categories: electrical and thermal (chemical). In most cases plasma consists not only of inert gas but also inserted on purpose or in undesirable way metal. Additional element in electric arc plasma influences on its equilibrium and thermochemical parameters having in consequence effect to analysed process.*

*The purpose of this work is to show influence of some selected metals on plasma composition. The way of calculating to estimate of plasma properties without resorting of very complex models have been developed and some results for electric arc metal plasma are presented.*