

BADANIA SEM POWIERZCHNI STYKÓW Z KOMPOZYTU WC-Ag PO PRACY W ŁUKU ELEKTRYCZNYM

Kazimierz Kaliszuk¹, Krystyna Frydman¹, Danuta Wójcik-Grzybek¹,
Witold Bucholc¹, Eugeniusz Walczuk², Piotr Borkowski², Dariusz Zasada³

Przedstawiono wyniki badań powierzchni styków z materiałów kompozytowych węgiel wolframu - srebro: WC-Ag30 i WC-Ag40, po pracy łukowej przy wyłączeniu prądów 6 kA i 10 kA. Styki zostały wykonane metodą nasycania ciekłym srebrem spieczonego uprzednio szkieletu z węgliku wolframu. Opracowanie zawiera dyskusję obserwacji i interpretację zjawisk zachodzących pod działaniem łuku elektrycznego.

1. WSTĘP

Styki z materiałów kompozytowych węgiel wolframu - srebro znajdują coraz szersze zastosowanie w różnego rodzaju łącznikach elektrycznych od małych do dużych mocy. Szczególne zainteresowanie skierowane jest na styki WC-Ag pracujące w warunkach łuku elektrycznego. Konieczne jest zatem poznanie reakcji materiałów WC-Ag na działanie łuku, aby móc je wykorzystywać w pracach nad zwiększaniem trwałości łączeniowej aparatów elektrycznych.

Badania zjawisk zachodzących w łuku elektrycznym są podstawą rozwoju technologii materiałów stykowych [1-8]. Zjawiska degradacji i erozji materiału stykowego pod działaniem łuku elektrycznego zachodzą w bardzo krótkim czasie, w bardzo wysokiej temperaturze (temperatura łuku elektrycznego przekracza 10000 K) i mają charakter nierównowagowy [6]. Analiza ich przebiegu

¹ Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, 01-919 Warszawa, ul. Wólczyńska 133, e-mail: frydma_k@itme.edu.pl

² Instytut Aparatów Elektrycznych, Politechnika Łódzka, 90-924 Łódź, ul. B. Stefanowskiego 18/22, e-mail: ewalczuk@ck-sg.p.lodz.pl

³ Wojskowa Akademia Techniczna, 00-908 Warszawa, ul. Kaliskiego 2, e-mail: zasada@wme.wat.waw.pl

i mechanizmów opiera się na badaniach zmian powierzchni i mikrostruktury styków po pracy łukowej.

Badania erozji łukowej materiałów W-Ag wykazały, że podczas palenia się łuku elektrycznego następuje przenoszenie materiału z powierzchni jednego styku na drugi, najprawdopodobniej w plazmowej wiązce łuku [6, 9].

Badania przedstawione w niniejszym opracowaniu koncentrowały się na obserwacji mikroskopowej form powstałych na powierzchni styków WC-Ag podczas pracy łukowej, określeniu ich składu chemicznego i prób wyjaśnienia ich genezy. Temperatury zmian stanu skupienia pięciu faz (węgla, wolframu, węgla wolframu, niklu i srebra), których obecności można się spodziewać na powierzchni styku po pracy łukowej podano w Tab.1.

Tabela 1. Temperatury zmian stanu skupienia [10-11].

Table 1. Temperatures of changes of state of aggregation [10-11].

Faza	Temperatura topnienia [K]	Temperatura wrzenia [K]
Węgiel	3925	4473
Wolfram	3668	6173
Węgiel wolframu WC	3073-3143	-
Nikiel	1726	3003
Srebro	1233,8	2486

2. PRZYGOTOWANIE STYKÓW DO PRÓB

Przygotowanie styków do badań elektrycznych przebiegało jak niżej:

- wykonanie szkieletów z węgla wolframu o zadanej porowatości przez spiekanie aktywowane dodatkiem 0,5% wag. niklu,
- nasycanie szkieletów z węgla wolframu ciekłym srebrem,
- obróbka mechaniczna styków na zadane wymiary:
 - Φ 10 mm, wysokość 3 mm,
 - Φ 15 mm, wysokość 2 mm,
- nakładanie na powierzchnię montażową warstewki spoiwa AgCu28P1 o grubości 0,2 mm.

Przygotowano dwie partie styków o zawartości srebra 30% i 40% wag.

3. BADANIA ELEKTRYCZNE

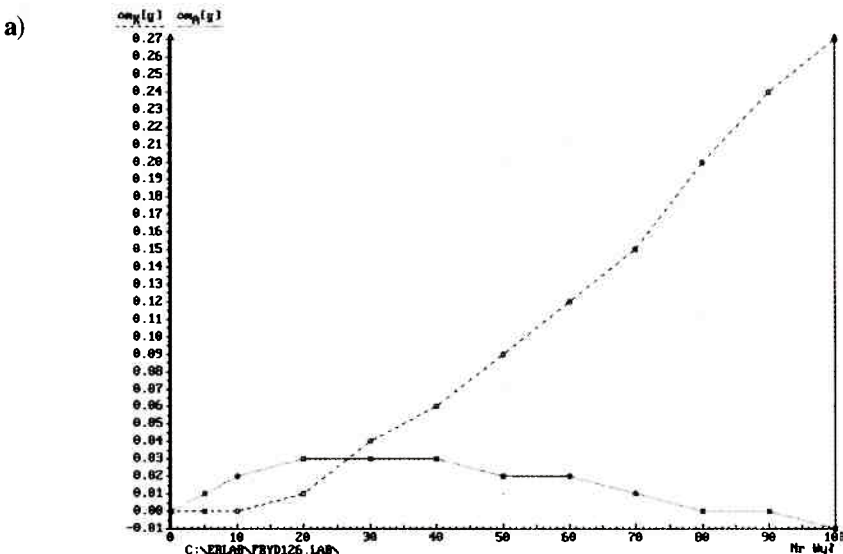
Badania elektryczne styków obejmowały testowanie erozji łukowej w warunkach modelowych, przy obciążaniu jedną sinusoidalną półfalą prądu o amplitudzie 6 i 10 kA i częstotliwości 50 Hz. Badania wykonane zostały w sterowanym komputerem stanowisku probierczym stosowanym do badania erozji łukowej [5].

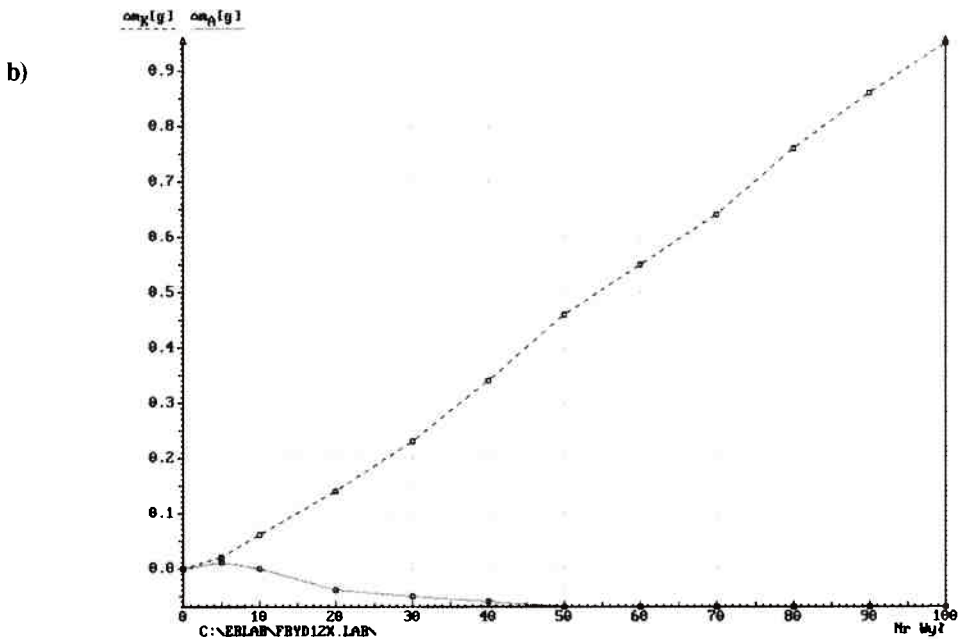
Pomierzone parametry testów:

	Test Nr 1	Test Nr 2
Amplituda prądu	6 kA	10 kA
Ładunek $\int i dt$	33 As	58 As
Energia łuku	520 Ws	990 Ws
Czas łukowy	7,8 ms	8,6 ms

Styki były spolaryzowane: styk górny – anoda (+), styk dolny – katoda (-). Ilość operacji łączeniowych wynosiła 100.

Na Rys.1. zamieszczono charakterystyki pomierzonego ubytku masy styków w funkcji ilości łączy, oddzielnie dla anody i katody oraz łącznego, dla styków z kompozytu WC-Ag40. Charakterystyki te jakościowo różnią się znacznie od charakterystyk uzyskanych dla kompozytów W-Ag [5]. Za wyjątkiem początkowego okresu (Test Nr 1 – prąd 6 kA) szybciej zużywała się katoda. Na anodzie ubytki masy stale zmniejszały się wraz ze wzrostem ilości łączy. W przypadku dużego prądu (Test Nr 2) już od początku testu rejestrowano przyrost masy anody ponad masę początkową styków.

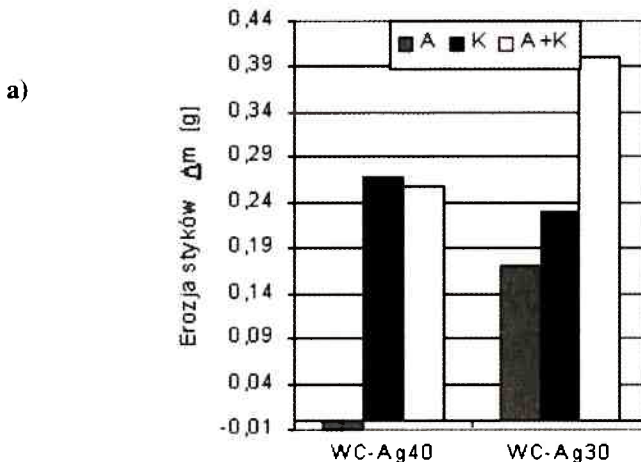


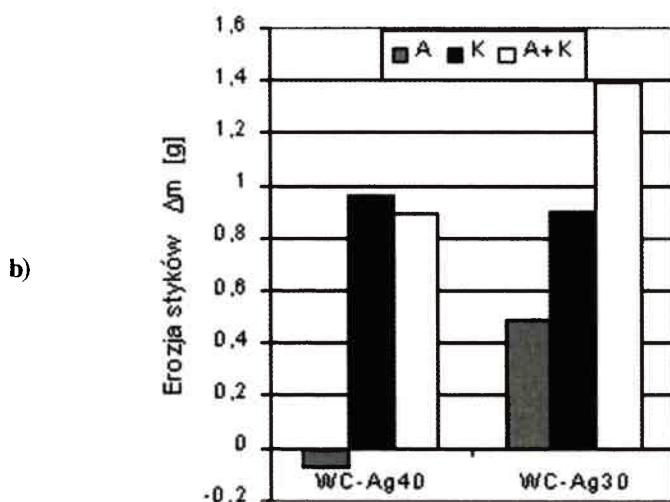


Rys.1. Ubytek masy styków jako funkcja liczby łączy dla styków WC-Ag40: a) Test Nr 1 – prąd 6 kA; b) Test Nr 2 – prąd 10 kA.

Fig.1. Contact mass loss versus number of switching operation for WC-Ag40 contacts: a) Test No. 1 – 6 kA current; b) Test No. 2 – 10 kA current.

Rys.2. przedstawia w postaci diagramu erozję styków wyrażoną ubytkiem masy styków, oddzielnie dla anody i katody oraz łączny ubytek masy anody i katody dla obu testowanych kompozytów.





Rys.2. Porównanie erozji łukowej styków po 100 łączeniach: a) Test Nr 1 – prąd 6 kA; b) Test Nr 2 – prąd 10 kA.

Fig.2. Arc erosion of contacts after 100 switching operations: a) Test No.1 – 6 kA current; b) Test No.2 – 10 kA current.

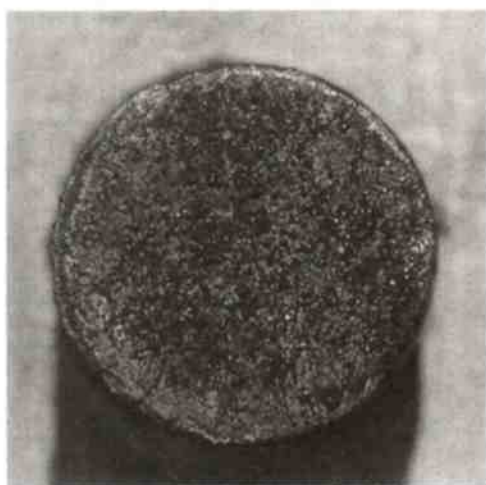
Charakterystyki erozyjne badanych kompozytów różnią się tym, że ubytki erozyjne anody WC-Ag30 od początku trwania testu były porównywalne z ubytkami katody. W efekcie, mimo nieco mniejszej erozji katody, łączny ubytek masy styków był większy dla styków WC-Ag30. Należy jednak zaznaczyć, że oba kompozyty odznaczają się dużą odpornością na działanie łuku przy dużych prądach, większą niż podobne kompozyty W-Ag [5]. Spadek wysokości styków po 100 łączeniach prądu 10 kA (przy energii łuku 990 Ws) wyniósł zaledwie 0,3-0,35 mm, był zatem niewielki.

Na Rys.3-4 zamieszczono fotografie powierzchni testowanych styków po badaniach elektrycznych. Obrazy anod różnią się od katod. Niewątpliwie gorszy stan powierzchni wykazują styki stanowiące katodę. Na fotografiach dobrze widoczne są ślady erozji łukowej, pozostawione przez stopy łuku po ostatnim łączeniu prądu. Stopy łuku obejmowały całą powierzchnię styków (177 mm²) przy prądzie 10 kA, natomiast 78 – 80% powierzchni przy prądzie 6 kA. Odpowiada to zastępczej powierzchni kołowej o średnicy ~13 mm.

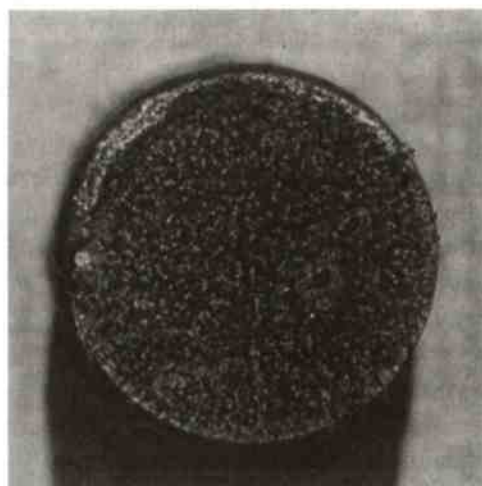
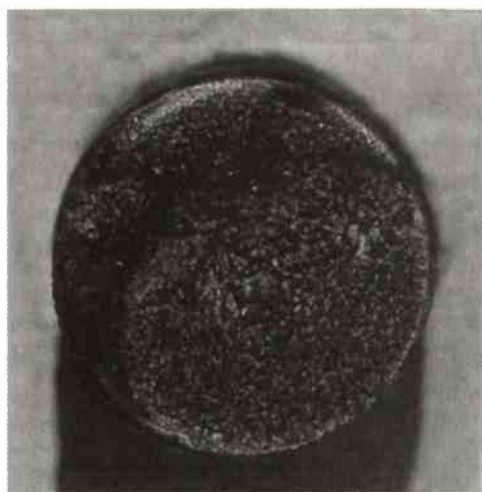
a)



b)



ANODA



KATODA

Rys.3. Fotografie powierzchni styków WC-Ag40 po badaniach elektrycznych: a) Test Nr 1 – prąd 6 kA; b) Test Nr 2 – prąd 10 kA.

Fig.3. Photographs of surfaces of WC-Ag40 contacts after electrical tests: a) Test No. 1 – 6 kA current; b) Test No. 2 – 10 kA current.

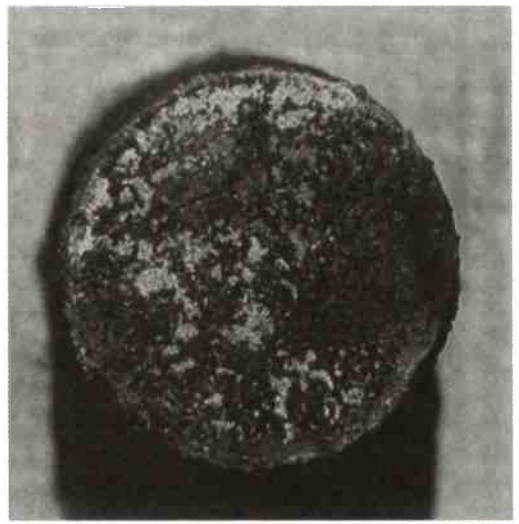
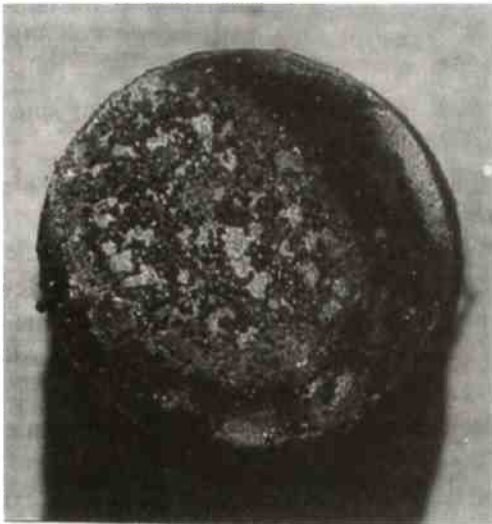
a)



b)



ANODA



KATODA

Rys.4. Fotografie powierzchni styków WC-Ag30 po badaniach elektrycznych: a) Test Nr 1 – prąd 6 kA; b) Test Nr 2 – prąd 10 kA.

Fig.4. Photographs of surfaces of WC-Ag30 contacts after electrical tests: a) Test No. 1 – 6 kA current; b) Test No. 2 – 10 kA current.

4. BADANIA POWIERZCHNI STYKÓW

4.1. Analiza teoretyczna przebiegu zmian na powierzchni styków WC-Ag

Aby uprościć analizę przebiegu zjawisk na powierzchni styku będziemy rozważać przypadki kiedy przy rozłączaniu prądu stopa łuku pokrywa całą powierzchnię styku o średnicy 15 mm. Jak wykazały próby wykonane w Instytucie Aparatów Elektrycznych Politechniki Łódzkiej, dotyczy to rozłączania prądów równych lub większych niż 6 kA, przy napięciu 500 V. Oddziaływanie łuku na powierzchnię styku jest bardzo dynamiczne. Czas łukowy w każdym cyklu trwa poniżej 9 ms. Przy wysokiej temperaturze łuku wszelkie zmiany struktury czy stanu skupienia zachodzą w skrajnie nierównowagowych warunkach termodynamicznych i w bardzo cienkiej warstwie powierzchniowej. Zmiany zachodzące w kompozytowym materiale stykowym WC-Ag (szkielet WC nasycony Ag) podczas każdego cyklu łukowego rozłączania prądu przebiegają w następującej kolejności, w miarę wzrostu temperatury kompozytu:

- od temperatury otoczenia do temperatury 1233,8 K nie obserwuje się zmian strukturalnych,
- w temperaturze 1233,8 K topi się srebro. Z uwagi na dynamikę wzrostu temperatury powierzchni styku pod działaniem ciepła łuku topnienie srebra zachodzi na powierzchni i w cienkiej warstwie przypowierzchniowej,
- kiedy szkielet WC osiągnie temperaturę 1728 K, wolny nikiel (aktywator spiekania szkieletu) topi się,
- po nagraniu powierzchni styku do temperatury 2486 K srebro wrze i gwałtownie odparowuje z powierzchni obnażając szkielet z krystalitów WC,
- temperatura obnażonego szkieletu gwałtownie rośnie. Srebro w kompozycie WC-Ag spełnia podobną rolę jak w kompozycie W-Ag [6]. Oprócz roli przewodnika prądu i ciepła, w warunkach pracy łukowej pełni również rolę medium chłodzącego. Wysokie ciepło właściwe, ciepło topnienia i ciepło parowania pochłaniają znaczne ilości energii cieplnej dostarczanej z łuku, chroniąc głębsze warstwy kompozytu przed nagrzewaniem, co opóźnia ich przegrzanie i erozję,
- wzrost temperatury obnażonego szkieletu powoduje jego wtórne spiekanie, co pociąga za sobą zmianę objętości szkieletu i wzrost naprężeń wewnętrznych,
- w miejscach gdzie naprężenia przekroczą doraźną wytrzymałość szkieletu na rozciąganie, pojawiają się pęknięcia. Pęknięcia te propagują się po powierzchni w miarę rozwoju destrukcji przypowierzchniowej warstwy materiału styku. Głębokość pęknięć ograniczona jest głębokością warstwy stopionego srebra,
- w miarę wzrostu grubości „gąbczastej”, wtórnie spieczonej warstwy krystalitów WC wzrasta jej temperatura, zwłaszcza na powierzchni,

- w temperaturze 3003 K nikiel odparowuje i przechodzi do plazmy łukowej,
- w zakresie temperatur 3073 - 3143 K zachodzi przemiana perytektyczna węgla wolframu (topnienie niekongruentne). Z węgla wolframu w miarę wzrostu temperatury wydziela się stały węgiel, aż do całkowitego rozkładu WC,
- powyżej temperatury 3143 K, aż do temperatury topnienia, każde z ziaren szkieletu zbudowane jest z drobnokrystalicznej mieszaniny węgla i wolframu,
- po przekroczeniu temperatury topnienia wolframu (3668 K), część mikrowydzieleń węgla może wypłynąć na powierzchnię kropelek czy warstewek stopionego wolframu. Z uwagi na bardzo krótki czas pozostawiania wolframu w stanie ciekłym, ilość wypływającego na powierzchnię węgla powinna być niewielka,
- po przekroczeniu temperatur topnienia (3925 K) i wrzenia (4473 K) węgla, przynajmniej część węgla znajdującego się na powierzchni styku powinna przejść w fazę ciekłą a następnie gazową i wzbogacić plazmę łuku elektrycznego.

Po zgaśnięciu łuku sekwencja zjawisk na powierzchni i w objętości styku powinna przebiegać następująco:

- stygnięcie kolumny plazmy łukowej osadza na stygnącej powierzchni styku kolejne fazy,
- jako pierwszy skrapla się na powierzchni styku (od temperatury 6173 K) wolfram,
- od temperatury 4473 K na ciekłym wolframe kondensuje się ciekły węgiel.

Ponieważ w literaturze nie znaleziono informacji czy i w jakim stopniu ciekły węgiel rozpuszcza się w ciekłym wolframe, nie jest możliwa interpretacja tego zjawiska,

- w temperaturze 3925 K ciekły węgiel przechodzi w stan stały i powinien nadal leżeć na powierzchni ciekłego wolframu lub się w nim rozpuszczać (również w tym przedmiocie nie znaleziono informacji w literaturze),
- w temperaturze 3668 K krzepnie wolfram,
- w zakresie temperatur 3143 - 3073 K (przemiana perytektyczna) tworzenie się węgla wolframu może zachodzić wyłącznie na powierzchni kontaktowej W i C, a więc w nieznaczonej objętości. Natomiast węgiel, który nie zdążył wypłynąć na powierzchnię wolframu i znajduje się wewnątrz warstw wolframu może ze znacznym prawdopodobieństwem tworzyć WC,
- w temperaturze 3003 K na powierzchni węgla i wolframu rozpoczyna się kondensacja niklu, którego niewielkie ilości przeszły do plazmy łukowej. Zanim temperatura obniży się do 1726 K (krzepnięcie niklu) powinien on dyfundować do wolframu, tworząc w warstwie przypowierzchniowej roztwór stały niklu w wolframe,
- w temperaturze 2486 K następuje skraplanie par srebra na powierzchni styku. Ponieważ srebro nie rozpuszcza się ani w wolframe, ani w węglu, ani w niklu, będzie ono występować w postaci mniejszych lub większych kropelek na

powierzchni styku. Tam, gdzie na powierzchni będzie występować czysty wolfram lub roztwór stały niklu w wolframie krople będą się rozpyływać (przynajmniej częściowo) ponieważ ciekłe srebro dobrze zwilża wolfram. Tam, gdzie na powierzchni wolframu będzie występował punktowo wydzielony lub osadzony węgiel, będziemy obserwowali regularne, kuliste, drobne krople srebra, ponieważ ciekłe srebro nie zwilża węgla i nie będzie mogło swobodnie rozpyływać się po powierzchni. Tam, gdzie na powierzchni wolframu czy węgla wolframu będzie występowała ciągła warstewka węgla, nie osiądą trwale kropelki ani film srebra,

- ostatnim etapem zmian powierzchniowych powinno być utlenianie wszystkich elementów występujących na powierzchni stygnącego styku.

4.2. Badania śladów erozji i składu chemicznego form powierzchniowych powstałych w wyniku działania łuku elektrycznego

Badania powierzchni styków po elektrycznych próbach łukowych przeprowadzono na skaningowym mikroskopie elektronowym Philips XL 30 z analizatorem rentgenowskim DX4-EDAX.

4.2.1. Badania styków z kompozytu WC-Ag40 po 100 cyklach łukowych przy polaryzacji „katoda”

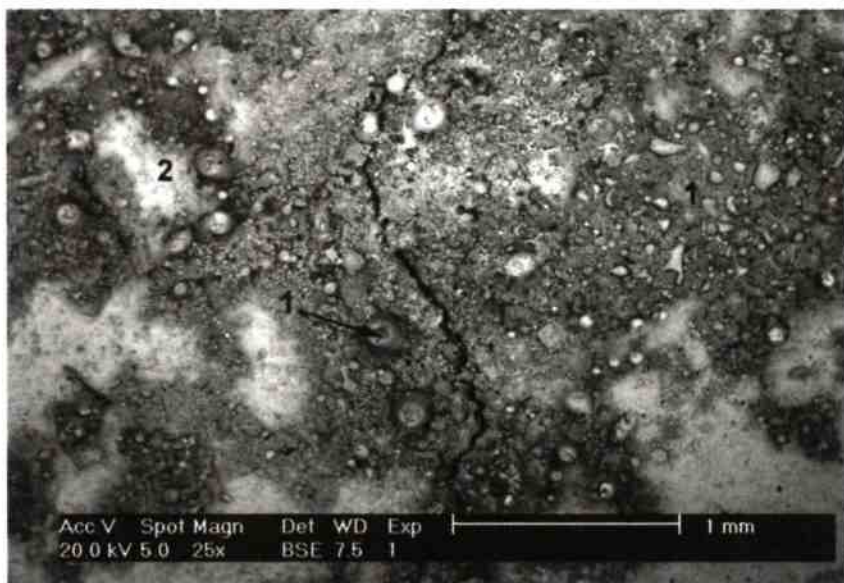
Podczas obserwacji powierzchni roboczej styku już przy powiększeniu 25x widoczne są duże zmiany stanu tej powierzchni (Rys.5):

- rozległe powierzchniowe pęknięcia,
- liczne drobne i większe krople,
- zróżnicowane zabarwienie poszczególnych partii powierzchni (od ciemnoszarego do jasnego),
- zróżnicowana chropowatość powierzchni (mniejsza w obszarach jasnych, większa w obszarach szarych).

Obszary powierzchni o szarym zabarwieniu i większe krople (oznaczone [1] na Rys.5-6) zidentyfikowano jako bogate w wolfram. Obszary o jasnej powierzchni [2] na tych rysunkach zidentyfikowano jako bogate w srebro (Tab.2).

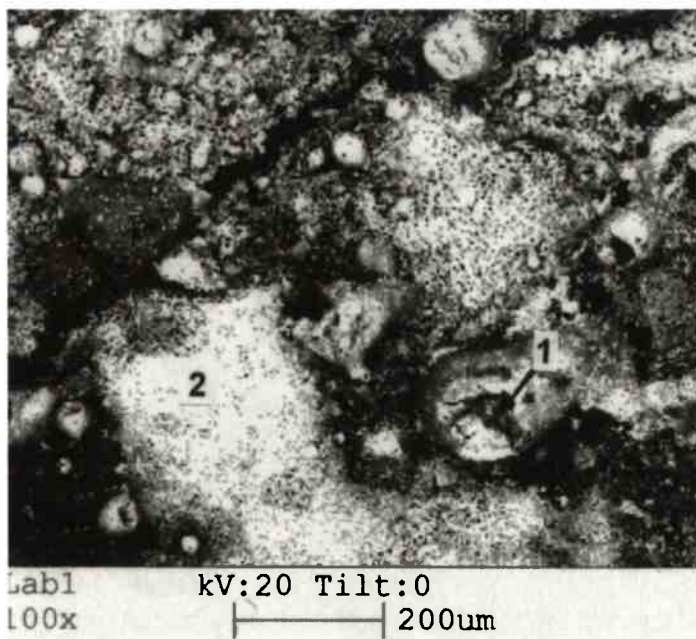
Rozkłady zawartości wolframu, srebra i węgla na badanym obszarze powierzchni styku (Rys.6) przedstawiono na Rys.7.

Na powierzchni z jasnego obszaru przy większym powiększeniu (Rys.8) widoczne są większe i mniejsze, okrągłe i wydłużone krople, pokryte jaśniejszymi drobnymi i bardzo drobnymi kropelkami. Wykonano punktowe analizy w miejscach oznaczonych na Rys.8 cyframi 1 do 5. Wyniki podano w Tab.3.



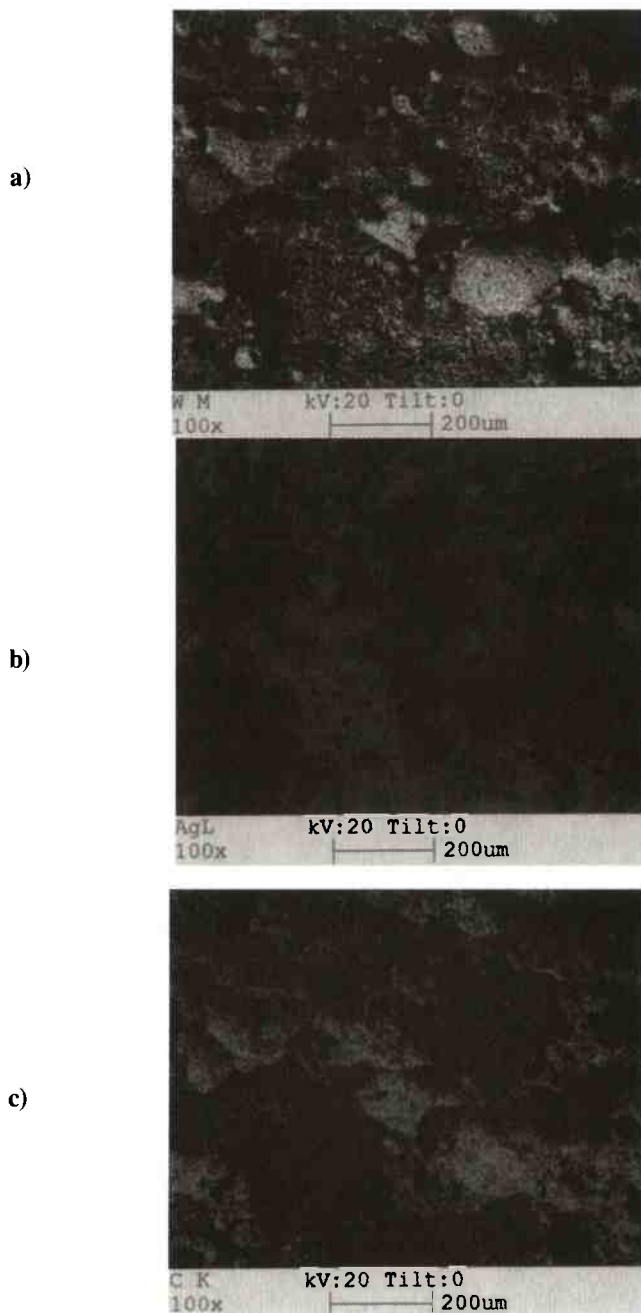
Rys.5. Centralna część katody po 100 cyklach łukowych. Pow. 25x.

Fig.5. Central part of cathode after 100 arc cycles. Magnification 25x.



Rys.6. Centralna część katody po 100 cyklach łukowych. Pow. 100x.

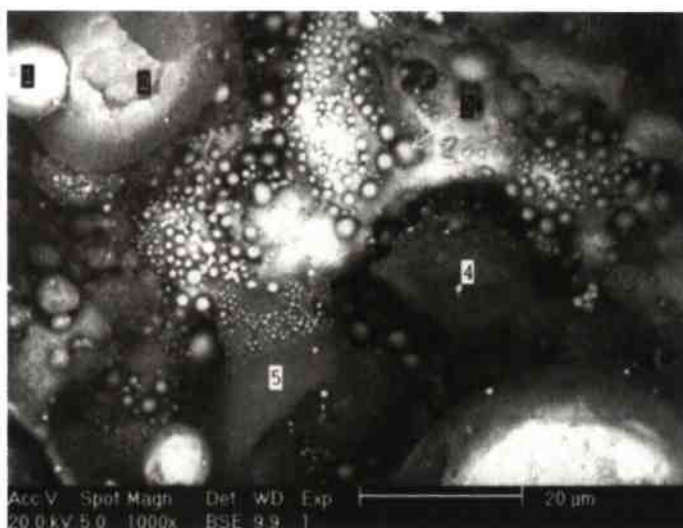
Fig.6. Central part of cathode after 100 arc operation cycles. Magnification 100x.



Rys.7. Rozkład zawartości pierwiastków na powierzchni styku z Rys.6.:

a) wolframu, b) srebra, c) węgla. Pow.100x.

Fig.7. Distribution of a) tungsten , b) silver, c) carbide, over surface of contact from Fig.6. Magnification 100x.



Rys.8. Fragment jasnej powierzchni z Rys.6. Cyframi 1 do 5 wskazano miejsca punktowych analiz chemicznych. Pow. 1000x.

Fig.8. Part of bright surface from Fig.6. Numbers from 1 to 5 indicate the points at which the local chemical analyses were carried out. Magnification 1000x.

Tabela 2. Wyniki punktowej analizy składu chemicznego (Rys.6).

Table 2. Results of local analysis of chemical composition (Fig.6).

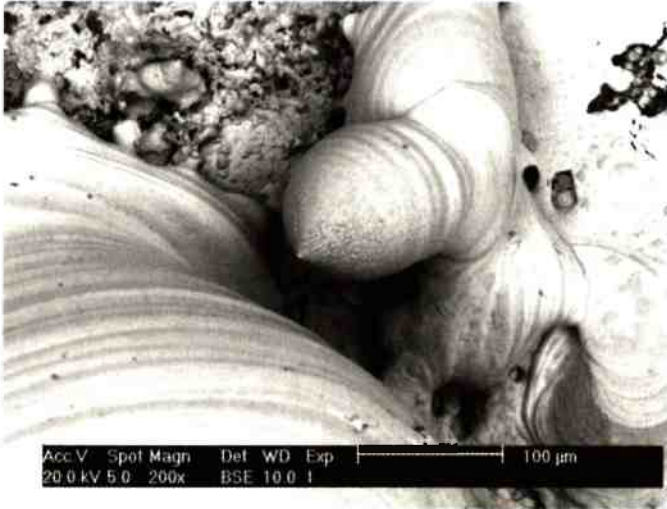
Miejsce	Zawartość składników [% wag.]			
	W	C	Ag	Ni
1.	84,84	7,26	5,86	2,03
2.	7,67	3,57	88,31	0,46

Tabela 3. Wyniki punktowej analizy składu chemicznego (Rys.8).

Table 3. Results of local analysis of chemical composition (Fig.8).

Miejsce	Zawartość składników [% wag.]			
	W	C	Ag	Ni
1.	92,44	7,42	0	0,14
2.	84,54	13,51	1,54	0,41
3.	3,38	1,72	94,46	0,44
4.	71,71	23,94	3,62	0,74
5.	68,18	25,98	4,88	0,96

Szczególną uwagę zwraca kształt większych i średnich kropli, bogatych w wolfram i węgiel. Jest on zupełnie odmienny od kształtu kropli wolframowych, obserwowanych na powierzchni styków z kompozytu W-Ag po pracy łukowej (Rys.9).



Rys.9. "Dziobek" i fałdy osiadania na kropli wolframu. Pow. 200x [8].

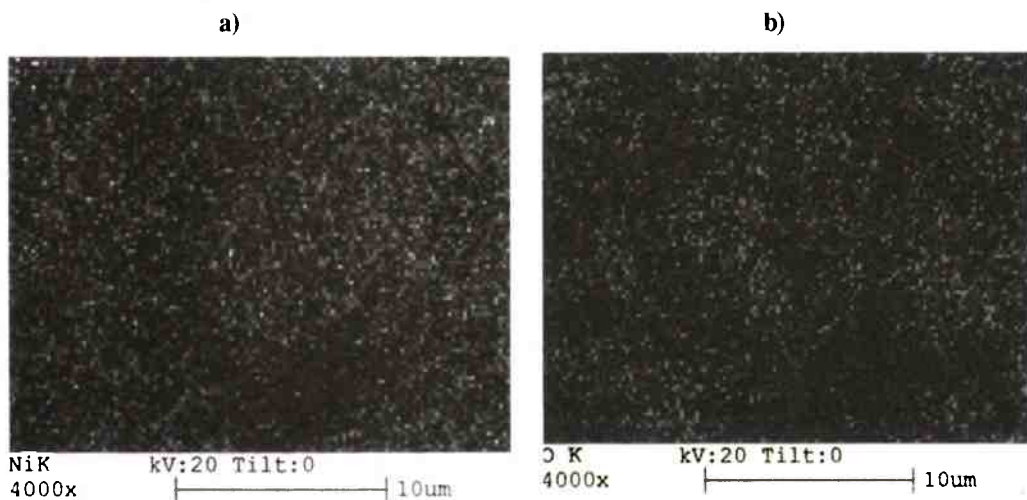
Fig.9. Spout and sagging creases on tungsten drop. Magnification 200x [8].

Charakterystyczne dla kropli wolframu na stykach W-Ag były fałdy osiadania i „dziobki” (Rys.9). Natomiast na powierzchni styku WC-Ag krople mają skurczowe zapadnięcia. Może to świadczyć o tworzeniu się na powierzchni kropli bardzo cienkiej, sztywnej błonki, która przy krzepnięciu wnętrza zapada się. Wielkość zapadliśka może sugerować, że błonka ta powstaje na kropli w temperaturze znacznie wyższej niż temperatura krzepnięcia wolframu. Ponieważ w literaturze nie znaleziono informacji o istnieniu faz WC powyżej zakresu reakcji perytektycznej, wyjaśnienie tego zjawiska wymaga dalszych badań. Warunki w kolumnie łukowej nie odbiegają zbytnio od koniecznych do syntezy fulerenów. Na ten aspekt też należałoby tu zwrócić uwagę.

Następnym skutkiem obecności węgla w kompozycie WC-Ag jest inny sposób osadzania srebra na powierzchni styku po zgaśnięciu łuku. Ciekłe srebro zwilża WC, ale nie zwilża węgla. W miejscach szczelnie pokrytych węglem (nawet najcieńszą warstwą) srebro nie osadzi się, natomiast tam gdzie warstwa C jest nieciągła, osiada w postaci kulistych kropelek i nie rozplływa się. Takie słabo osadzone kulki srebra, mogą odkruszać się z powierzchni styku przy zamykaniu zestyku.

Na Rys.10a pokazano rozkład Ni na powierzchni styku. Ponieważ ciekły Ni zwilża wszystkie fazy występujące na powierzchni styku w temperaturze skraplania Ni, jego rozkład jest dosyć równomierny.

Natomiast rozkład tlenu związanego na powierzchni jest mniej równomierny (Rys10b). Wynika to stąd, że na srebrze tworzy się tylko bardzo cienka warstewka Ag_2O , i to w temperaturze poniżej 500 K. Ponadto tam, gdzie występują kropelki zakrzepłego srebra (nieciągła warstwa srebra na podłożu częściowo pokrytym węglem), koncentracja tlenu jest najmniejsza.



Rys.10. Rozkład: a) niklu, b) tlenu. Pow. 4000x.

Fig.10. Distribution of: a) nickel, b) oxygen. Magnification 4000x.

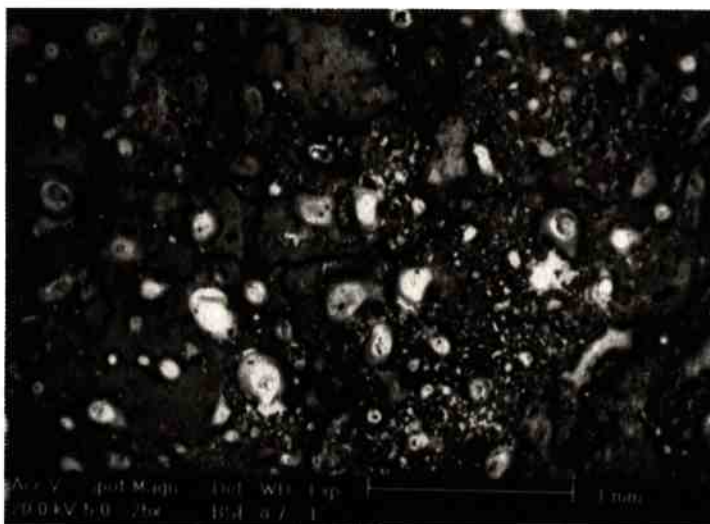
4.2.2. *Badanie styków z kompozytu WC-Ag40 po 100 cyklach łukowych przy polaryzacji „anoda”*

Na powierzchni anody (Rys.11), już przy niewielkich powiększeniach (25x), widoczne są liczniejsze niż na katodzie rozległe pęknięcia wtórnie spieczonego szkieletu. Liczniejsze są również zakrzepłe krople o bardziej lub mniej regularnych kształtach. Nie obserwuje się natomiast jasnych obszarów bogatych w srebro. Świadczy to o intensywniejszym niż na katodzie ubywaniu srebra. Może też wskazywać na intensywniejsze osadzanie węgla i wolframu na anodzie przy gaśnięciu łuku.

Wykonano punktowe analizy składu chemicznego w dwóch wybranych miejscach:

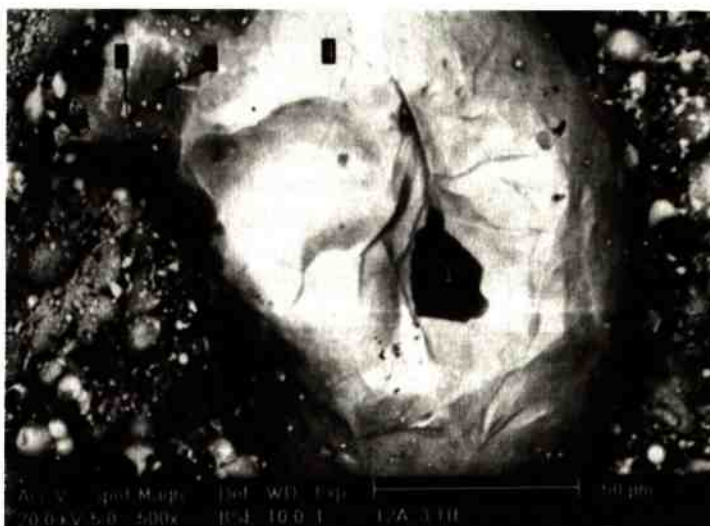
- na dużej kropli (Rys.12)
- w miejscu, gdzie występowała duża ilość drobnych kropelek (Rys.13).

Wyniki podano w Tab.4-5.



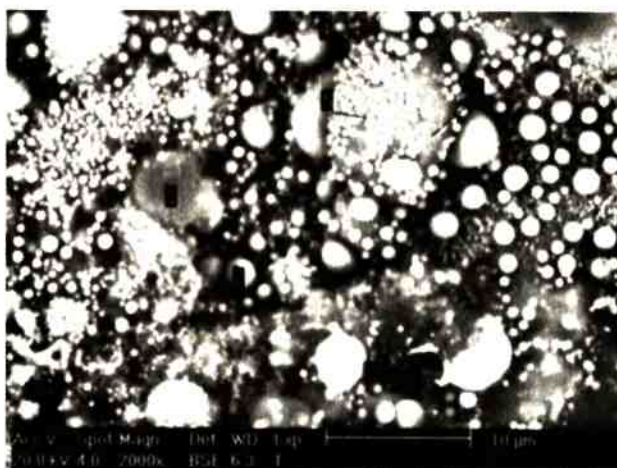
Rys.11. Centralna część anody. Pow. 25x.

Fig.11. Central part of anode. Magnification 25x.



Rys.12. Duża kropla na centralnej powierzchni anody. Pow. 500x. Widoczne są zapadliska na powierzchni kropli. Cyframi 1 do 4 oznaczono miejsca punktowych analiz składu chemicznego.

Fig.12. Large drop on central part of anode. Magnification: 500x. Collapses on the drop surface are seen. Numbers 1 to 5 indicate points of local analyses of chemical composition.



Rys.13. Skupisko kropeł o zróżnicowanych rozmiarach w centrum anody. Pow. 2000x. Cyframi 1 do 5 oznaczono miejsca punktowych analiz składu chemicznego.

Fig.13. Agglomeration of drops of different dimensions at the anode centres. Magnification 2000x. Numbers 1 to 5 indicate points of local analyses of chemical composition.

Tabela 4. Wyniki punktowej analizy składu chemicznego (Rys.12).

Table 4. Results of local analysis of chemical composition (Fig.12).

Miejsce	Zawartość składników [% wag.]		
	W	C	Ag
1.	39,69	58,19	2,11
2.	78,73	21,01	0,23
3.	75,02	24,65	0,33
4.	90,88	8,66	0,46

Tabela 5. Wyniki punktowej analizy składu chemicznego (Rys.13).

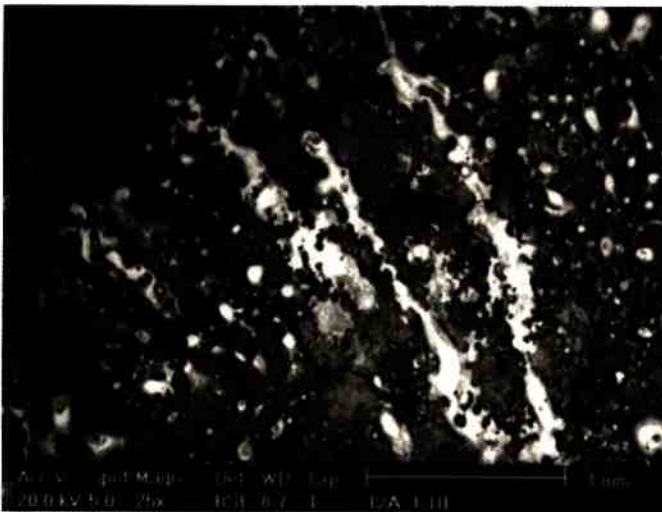
Table 5. Results of local analysis of chemical composition (Fig.13).

Miejsce	Zawartość składników [% wag.]			
	W	C	Ag	Ni
1.	13,9	10,21	75,20	0,69
2.	3,44	3,27	92,75	0,54
3.	9,01	4,31	85,88	0,80
4.	15,17	6,31	77,53	1,00
5.	8,48	6,41	84,52	0,58

Jak widać z Tab.4-5 srebro na powierzchni anody występuje jedynie w najdrobniejszych formach, widocznych przy powiększeniach ponad 500x. Mogłoby to wskazywać na przenoszenie na anodę w wiązce plazmy i osadzenie na jej powierzchni pierwiastków trudnotopliwych (W, C) i wysokotopliwego (Ni) w stopniu znacznie większym niż niskotopliwego srebra. Można to tłumaczyć następująco: pole elektromagnetyczne łuku elektrycznego utrzymuje wiązkę plazmy w której metale w stanie plazmy przenoszone są z katody na anodę. Przy gaśnięciu łuku następuje zanikanie pola elektromagnetycznego przy jednoczesnym spadku temperatury plazmy. Kondensują z niej na powierzchni anody najpierw węgiel i wolfram, potem nikiel. Kiedy temperatura plazmy zbliża się do temperatury kondensacji srebra, siły elektrodynamiczne podtrzymujące kolumnę łuku są już tak słabe, że tylko nieznaczne ilości srebra osiadają na anodzie, a reszta ulega rozproszeniu.

4.3. Transport materiału po powierzchni styków podczas pracy łukowej

Na obrzeżach obu styków - anody i katody - stwierdzono obecność śladów promieniowej wędrówki kropeł W (z zawartością C i Ni) od centralnej części styku do jego krawędzi (Rys.14) i poza tę krawędź. W centralnej części styku krople pozostają i krzepną bez przemieszczania się po powierzchni (Rys.11). Świadczy to, że oprócz ubytków masy styku przez odparowanie i ewakuację w wiązce plazmy, występuje tu również utrata masy przez spływanie kropeł poza krawędź styku.



Rys.14. Ślady migracji kropeł bogatych w wolfram do krawędzi styku. Pow. 25x.

Fig.14. Traces of migration of drops ample with tungsten to edge of contact. Magnification 25x.

5. DYSKUSJA WYNIKÓW

Badania po testach elektrycznych powierzchni styków wykonanych z kompozytów WC-Ag metodą nasycania srebrem szkieletu WC wykazują, że obecność węgla w materiale stykowym ma bardzo istotny wpływ na przebieg zjawisk zachodzących na powierzchni i w warstwach przypowierzchniowych styku, ale również i w łuku elektrycznym.

Ponieważ istota i charakter niektórych zjawisk nie są dziś jeszcze jasne, bardzo trudno jest na podstawie ich śladów na powierzchni styków wnioskować o mechanizmach erozji. Najtrudniejszy do rozwikłania jest wpływ obecności węgla zarówno w postaci krystalicznej jak i WC na przebieg erozji materiału styku, a także na powstawanie kropli i nacieków w trakcie osadzania i krzepnięcia materiału z plazmy łukowej po zgaśnięciu łuku.

W szczególności dotyczy to:

- wzajemnego oddziaływania ciekłego węgla z wolframem w temperaturach powyżej i poniżej temperatury topnienia wolframu,
- postaci krystalicznej węgla krzepnącego na ciekłym wolframie i wpływu tej postaci na tworzenie się sztywnej błonki na powierzchni kropli wolframowych oraz na reakcję perytektyczną w zakresie temperatur 3143 do 3073 K podczas stygnięcia. Interesujące będzie określenie składu i struktury tej błonki.

Szczególnie interesujące jest powstawanie powierzchniowej sztywnej błonki na powierzchni dużych kropli bogatych w wolfram.

Stosunkowo prosty do wyjaśnienia jest wpływ przemiany perytektycznej WC w zakresie temperatur 3073 - 3143 K w drobnokrystaliczną mieszaninę W i C. Reakcja ta pochłania część ciepła i opóźnia nagrzewanie głębszych warstw materiału. Również bardzo istotna jest drobnokrystaliczna struktura tej mieszaniny, ponieważ przepływ ciepła ma charakter falowy. Przy przechodzeniu fali cieplnej przez każdą granicę między W i C występować będzie częściowe odbicie i rozproszenie fali cieplnej. Efektem będzie opóźnienie wnikania impulsu cieplnego w głąb materiału i zmniejszanie erozji.

Należy tu jeszcze zwrócić uwagę na zaobserwowane podczas badań mechanizmy erozji (ubytki masy z powierzchni styków):

- migracja kropli po powierzchni styku od środka do krawędzi i ewakuacja poza krawędź styku. Część kropli zatrzymuje się na cylindrycznej, bocznej powierzchni nakładki stykowej, a część odpada od styku. Powoduje to, że mniejsze są ubytki masy nakładki stykowej, niż jej wysokości, szczególnie przy mniejszej ilości łączy,
- rozpryskiwanie drobnych kropelek materiału stykowego podczas pracy łukowej. O mechanizmie tym informuje sprawozdanie ITME [12]. Bliższych danych brak, ponieważ rozłączanie styków przeprowadzane było w otwartej

przestrzeni, bez możliwości zbierania rozpryskiwanych i ściekających kropeł,

- przenoszenie par składników kompozytu w wiązce plazmy łukowej z jednej elektrody na drugą oraz rozpraszanie par metali z tej wiązki przy gaśnięciu łuku (może również podczas jego trwania?),
- mechaniczne odkruszanie drobnych zakrzepłych kropelek podczas zamykania zestyku, głównie srebra, osadzonych na fragmentach powierzchni styku częściowo pokrytych węglem.

Ponieważ konstrukcja aparatury pomiarowej do badań elektrycznych nie umożliwia wychwytywania materiałów usuwanych przez łuk elektryczny z powierzchni styku, nie można obecnie określić udziału poszczególnych mechanizmów w destrukcji i erozji powierzchni nakładki stykowej.

6. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania dały szereg interesujących obserwacji, ale nie pozwalają jeszcze na szczegółowe określenie mechanizmów erozji kompozytów WC-Ag. Mechanizmy te odbiegają wyraźnie od mechanizmów erozji kompozytów W-Ag. Charakteru ich nie można obecnie określić, gdyż nie są dokładnie rozpoznane zjawiska występujące na powierzchni kompozytu WC-Ag i w wiązce plazmy łukowej podczas pracy łączeniowej. Autorzy pracy oceniają, że konieczne jest przeprowadzenie badań nad składem i strukturą powierzchniowej warstwy kropeł bogatych w wolfram i zawierających na powierzchni, a może i wewnątrz kropli, węgiel. Istotnym może być również określenie w jakich strukturach węgiel występuje wewnątrz kropli, a w jakich w warstwie powierzchniowej, co może pozwolić wyjaśnić zjawisko „zapadania się” kropeł podczas krzepnięcia. Bez rozpoznania tych problemów nie jest możliwa analiza zjawisk i procesów erozji łukowej kompozytu WC-Ag, a tym samym optymalizacja składu kompozytów, ich technologii oraz zakresów zastosowań.

Rozszerzenie zakresu badań o podane wyżej zagadnienia nie było w ramach grantu możliwe ze względu na brak odpowiedniej aparatury badawczej zarówno w ITME jak i w ośrodkach współpracujących.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Lindmayer M., Roth M.: Contact resistance and arc erosion of W/Ag and WC/Ag. 9th ICECP and Holm Conference on Electrical Contacts, Chicago (1978) 421-430.

K. Kaliszuk, K. Frydman, D. Wójcik-Grzybek, W. Bucholc, E. Walczuk,...

- [2] Leug C.H., Kim H.: A comparison of Ag-W, Ag-WC and Ag-Mo contacts. Vol.CHMT-7, March 1984, 69-75
- [3] Walczuk E., Boczkowski D., Błaszczyk H., Kaliszuk K.: Computer-aided investigations of erosion behavior and contact resistance of W-Ag50 contact materials. 8th International Conference on Switching Arc Phenomena, SAP & ETEP, Lodz (1997), 208-216
- [4] Kaliszuk K., Senkara J., Wehr A.: Erosion mechanism of W-Ag contact material in the air-blast circuit breaker under short-circuit conditions. 17th ICEC, Nagoya (1994), 531-538
- [5] Walczuk E., Borkowski P., Kaliszuk K., Frydman K.: Effect of composition and microstructure on the arc erosion and contact resistance for tungsten-silver composite materials at high currents. 20th ICEC, Stockholm (2000), 59-266
- [6] Kaliszuk K., Frydman K., Walczuk E., Borkowski P., Jakubowski J.: Arc erosion phenomena in tungsten-silver composite contact materials. 20th ICEC, Stockholm (2000), 281-289
- [7] Wingert Ph.C.: The detection and effects of oxide layers on silver-refractory contact surfaces. 43rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Philadelphia (1997), 104-114
- [8] Kaliszuk K., Frydman K., Wójcik-Grzybek D., Walczuk E., Borkowski P., Zasada D.: SEM study of W-Ag contact tips after electric arc testing. 9th International Conference on Switching Arc Phenomena, Lodz (2001), 209-212
- [9] Walczuk E., Kaliszuk K., Borkowski P., Frydman K. i in.: Badania podstawowe mechanizmów erozji łukowej i właściwości fizycznych kompozytowych materiałów stykowych wolfram-srebro. Sprawozdanie ITME (1998) niepublikowane
- [10] Baucio M.: ASM Engineered Materials Reference Book. 2nd edition, Mat. Park, OH, 1994
- [11] Binary Alloy Phase Diagrams. 2nd edition, ASM International the Materials Information Society, 1990
- [12] Frydman K., Kaliszuk K., Walczuk E., Bojar Z.: Kompleksowe badania własności styków elektrycznych z kompozytów Ag-WC. Sprawozdanie ITME (2002) niepublikowane.

Praca finansowana przez Komitet Badań Naukowych (Grant Nr 8 T10A 04918)

SEM STUDY OF WC-Ag CONTACT SURFACE AFTER ARC TESTING

SUMMARY

The paper presents results of investigations of surface of contacts made of composite materials tungsten carbide – silver (WC – Ag30 and WC – Ag40). after arc operation with the breaking of 6 kA and 10 kA current. The

composite materials were made using the press – sinter – infiltration method. The paper comprises discussion of findings and interpretation of phenomena occurring as a result of the action of arc.