

EROZJA ŁUKOWA I REZYSTANCJA ZESTYKOWA SILNOPRĄDOWYCH STYKÓW Z KOMPOZYTÓW WC-Ag

Eugeniusz Walczuk¹, Piotr Borkowski¹, Kazimierz Kaliszuk², Krystyna Frydman², Danuta Wójcik-Grzybek², Witold Bucholc²

Podano wyniki badań erozji łukowej i rezystancji zestykowej kompozytów WC-Ag40 i WC-Ag30 wykonanych metodą nasycania srebrem spieczonego szkieletu z węgla wolframu. Badania zostały wykonane w sterowanym komputerem systemie testującym, przy wysokich prądach, w zakresie od 2 kA do 10 kA. Przeprowadzona dyskusja wyników i porównanie testowanych kompozytów z kompozytami typu wolfram-srebro wykonanymi podobną metodą wykazały, że obecnie testowane kompozyty są bardziej odporne na erozję łukową.

1. WPROWADZENIE

Wysoka odporność na erozję łukową kompozytów typu wolfram-srebro, o zawartości 25-60% wag. srebra, przy jednocześnie dużej ich odporności na szczepianie sprawiła, że są one od dawna szeroko stosowane w wyłącznikach niskonapięciowych. Szczególnie chętnie są stosowane w wyłącznikach prądu przemiennego o działaniu klasycznym i ograniczających prąd. Wyłączniki takie nawet przy zminiaturyzowanych gabarytach pozwalają na osiągnięcie zdolności wyłączania prądów zwarciovych przekraczających 50 kA przy napięciu 550 V. Pewien problem konstrukcyjny stanowi stosunkowo duża rezystancja zestykowa styków wykonanych z tych kompozytów, która silnie wzrasta w wyniku łączenia prądu i erozji łukowej styków [1-3]. Duży wpływ na rezystancję zestykową ma stan powierzchni zerodowanych styków, a zwłaszcza jej skład chemiczny (skupiska wolframu, warstewki tlenków wolframu i inne) oraz ich rozmieszczenie [4].

¹ Instytut Aparatów Elektrycznych, Politechnika Łódzka, 90-924 Łódź, ul. B.Stefanowskiego 18/22, e-mail: ewalczuk@ck-sg.p.lodz.pl

² Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, 01-919 Warszawa, ul. Wólczyńska 133, e-mail: frydman_k@itme.edu.pl

Styki z kompozytu W-Ag są wytwarzane w różny sposób [5]. Dobre wyniki dla zastosowań w technice wysokich prądów uzyskuje się dla kompozytów ze szkieletem wolframowym nasycanym srebrem. Bardzo duży wpływ na odporność na erozję łukową styków W-Ag ma zarówno skład chemiczny, jak i struktura kompozytu.

Wyższą odporność na erozję łukową dla wysokich prądów oraz dobrą odporność na szepianie można uzyskać wprowadzając do kompozytu wolfram-srebro niewielkie dodatki renu [6]. Innym rozwiązaniem jest zastąpienie w materiale kompozytowym wolframu przez węgiel wolframu (WC). Znany jest również materiał stykowy, w którym kompozyt WC-Ag wzbogacono o węgiel, uzyskując kompozyt trójskładnikowy WC-Ag-C [7-8]. Badania właściwości erozyjnych takich kompozytów były prowadzone dotychczas w zastosowaniu zarówno do dużych [2], jak i małych prądów [8-9].

Przedmiotem artykułu są badania erozji łukowej i zmiany rezystancji zestykowej w wyniku erozji styków z kompozytu WC-Ag o zawartości 40 i 30% wag. Ag. Styki zostały poddane testom łukowym w zakresie prądów od 2 do 10 kA przy napięciu do 500 V.

2. PRZYGOTOWANIE STYKÓW DO BADAŃ

Styki do badań elektrycznych przygotowano w Pracowni Metali ITME. Wykonano je z kompozytu WC-Ag metodą nasycania srebrem spieczonego szkieletu z węgliku wolframu. Do wykonania szkieletów użyto proszku węgliku wolframu o średnicy ziarna 0,45 μm (proszek DS40) i 2,5 μm (proszek HC250). Spiekanie wyprasek z węgliku wolframu oraz nasycanie szkieletu ciekłym srebrem prowadzono w atmosferze wodoru, w temperaturze 1423 K. Wykonano dwa warianty kompozytu o różnej zawartości WC, gęstości i twardości. Własności fizyczne kompozytów podano w Tab.1, a mikrostrukturę kompozytu pokazano na Rys.1. Drogą obróbki mechanicznej wykonano cylindryczne nakładki stykowe:

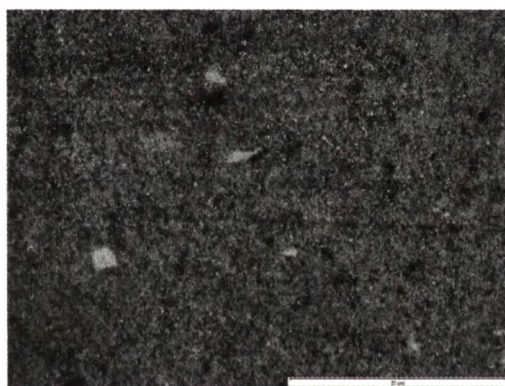
- o średnicy 10 mm i wysokości 3 mm,
- o średnicy 15 mm i wysokości 2 mm.

Na powierzchnię montażową nakładek stykowych nałożono warstwę spoiwa AgCu28P1 o grubości 0,2 mm, służącą do spajania z podłożem miedzianym.

Tabela 1. Właściwości fizyczne styków z kompozytów WC-Ag.

Table 1. Data of samples of contacts WC-Ag.

Materiał kompozytowy	Wielkość ziarna WC [μm]	Zawartość srebra [%wag.]	Gęstość kompozytu [g/cm^3]	Twardość HV10
WC-Ag40	0,45	37 + 0,3	12,8	270
WC-Ag30	2,5	33 + 0,3	13,3	310



Rys.1. Struktura próbki styku WC-Ag30. Szare, bardzo drobne ziarna szkieletu WC nasyczone srebrem. Z uwagi na submikronowe średnice kapilar międzyziarnowych wypełnionych srebrem widoczne są tylko przekroje większych kapilar. Czarne większe i mniejsze plamki przedstawiają zamknięte, nie wypełnione srebrem mikropory szkieletu. Większe, białe obszary to duże pory szkieletu wypełnione srebrem. Pow. 200x.

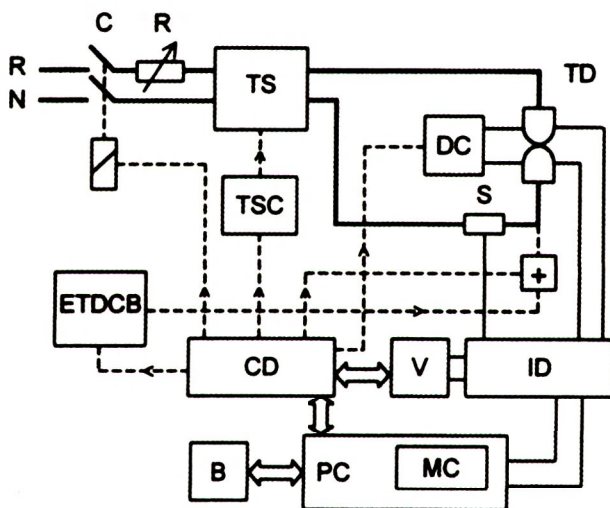
Fig.1. Structure of WC-Ag30 composite material. Very small, grey grains of WC skeleton infiltrated with Ag. Because of very small sizes of capillaries only the cross sections of bigger capillaries are visible. Bigger or smaller black spots are pinholes not filled with silver. Bigger, white spots are bigger pinholes filled with silver. Magnification 200x.

3. BADANIA

3.1. System probierczy

Badania erozji łukowej przeprowadzono w systemie probierczym sterowanym komputerem, w warunkach modelowych. Urządzenie probiercze stanowi model wyłącznika jednobiegunowego, w którym testowane styki usytuowane

są symetrycznie pionowo. Stykiem ruchomym jest styk dolny [8]. W urządzeniu zapewniona jest regulacja parametrów mechanicznych zestyku. Uproszczony schemat blokowy systemu probierczego przedstawia Rys.2. Obwód wysokich prądów zasilany jest z generatora prądu przemiennego o napięciu $550 V_{AC}$ i dużej mocy zwarciowej. Obwód ten zawiera: stycznik C, rezystor obciążenia R, łącznik tyrystorowy TS, bocznik pomiarowy S i testowane styki. Urządzenie probiercze TD zawiera: napęd pneumatyczny zamykający styki, zamek kulowy i szybkie urządzenie wyzwalające zasilanie z baterii kondensatorów ETCBD. Łącznik tyrystorowy ogranicza prąd przepływający przez testowane styki do jednej sinusoidalnej półfali o częstotliwości 50 Hz. Styki otwierane są przy nastawionym kącie fazowym w urządzeniu sterującym TSC.



Rys.2. Schemat blokowy systemu probierczego.

Fig.2. Block diagram of computer-controlled testing system.

System pomiarowo-kontrolny składa się z: wejściowego urządzenia pomiarowego ID, urządzenia sterującego CD, woltomierza cyfrowego V, wagi cyfrowej B i komputera osobistego PC z kartą pomiarową MC. Pomiar rezystancji zestykowej jest wykonywany metodą techniczną przy prądzie 5 A ze źródła prądu stałego DC.

System probierczy pracuje pod nadzorem programu *Erozja 2.1*. Urządzenia elektroniczne systemu stanowią jedynie interfejs pomiędzy urządzeniem probierczym a komputerem. Program komputerowy ma dostęp do wszystkich sterowanych obiektów i wykształca (zapewnia) automatyczny test według nastawionej sekwencji pomiarowej. W czasie trwania testu system rejestruje prze-

biegi prądu i napięcia łuku na badanych stykach. Przebiegi te są podstawą do ustalenia przebiegów czasowych i wartości całki $\int i dt$, energii łuku itd. Rezystancja zestyku jest mierzona po każdej operacji łączenia prądu. Szczegółowy opis systemu probierczego i możliwości oprogramowania podany jest w pracy [11].

3.2. Parametry probiercze

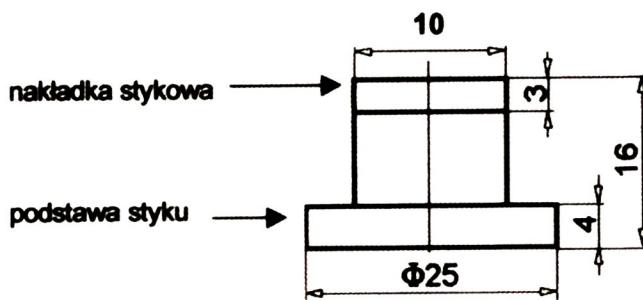
Badane materiały kompozytowe były testowane po przylutowaniu styków na miedzianych podstawach stykowych o kształcie i wymiarach podanych na Rys.3. Wykonano trzy serie testów przy parametrach mechanicznych i elektrycznych podanych w Tab.2.

Tabela 2. Warunki testowania styków.

Table 2. Test parameters.

Parametr testu	Jednostka	Test		
		Nr 1	Nr 2	Nr 3
1. Parametry mechaniczne				
- średnica styków	[mm]	10	10	15
- rozwarcie styków	[mm]	10	10	10
- przechył styków	[mm]	2	2	2
- siła dociskowa styków	[N]	30	30	30
- siła sprężyny otwierającej	[N]	50	50	50
2. Parametry elektryczne				
- prąd probierczy (ampl.)	[kA]	2	6	10
- całka $\int i dt$	[As]	11,7	33	55
- kąt fazowy otwierania styków	[deg]	40	40	30
- polaryzacja styków		anoda (+) katoda (-)		
- styk górny				
- styk dolny (ruchomy)				
- liczba łączy		200	100	100

Po utracie styczności styki poruszały się w pionie, ruchem przyspieszonym. W chwili zgaszenia łuku odległość pomiędzy stykami wynosiła ~ 4 mm. Nie stosowano poprzecznego wydmuchu magnetycznego.



Rys.3. Styk probierczy.

Fig.3. Sample contact.

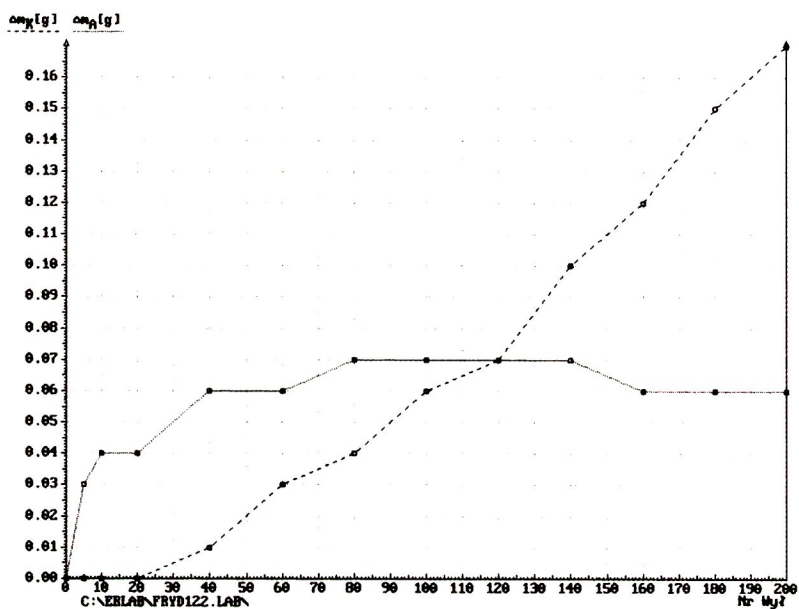
3.3. Wyniki i dyskusja

3.3.1. Erozja łukowa styków

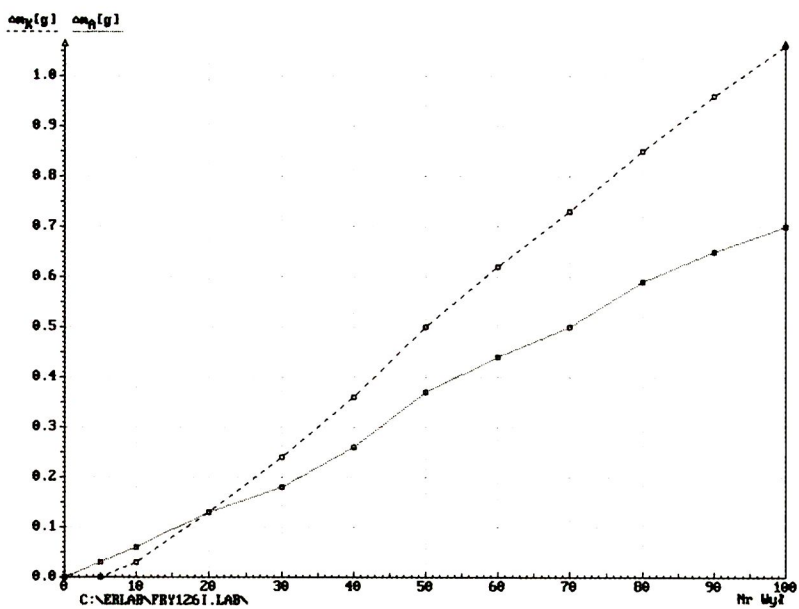
Na Rys.4 zamieszczono charakterystyki ubytków masy styków w funkcji ilości łączy dla styków z kompozytu WC-Ag40. Przy małym prądzie, na początku testu, bardziej zużywała się anoda. Po 200 łączeniach nastąpiło zrównanie ubytku masy anody i katody, a dalej ubytek masy anody już nie powiększał się (Rys.4a). Przy większym prądzie dla tych samych wymiarów styków prawie od początku testu anoda zużywała się nieco wolniej niż katoda (Rys.4b). Natomiast dla większych styków i dużego prądu po dziesięciu łączeniach prądu 10 kA zużywała się tylko katoda. Masa anody nawet nieco wzrosła w stosunku do masy początkowej i do końca trwania testu pozostawała już praktycznie stała (zerowy ubytek masy).

Przedstawione charakterystyki erozyjne styków z kompozytu WC-Ag40 jakościowo różnią się w sposób zasadniczy od charakterystyk uzyskiwanych przy dużych prądach dla kompozytów typu wolfram-srebro i innych [9-12]. Różnica polega na tym, że zawsze bardziej zużywa się anoda niż katoda, a więc odwrotnie niż w kompozycie WC-Ag, co jest zgodne z rozważaniami teoretycznymi procesów cieplnych na granicy łuk-elektroda. Z obliczeń potwierdzonych eksperymentalnie pomiarami temperatury styków wynika, że większa energia cieplna wprowadzana jest z łuku do anody. Należy zatem przypuszczać, że w przypadku badanego kompozytu WC-Ag40 zachodzi proces odzyskiwania masy anody wskutek kondensacji par metali z plazmy łukowej, przy czym pary te mogą pochodzić zarówno z anody, jak i katody.

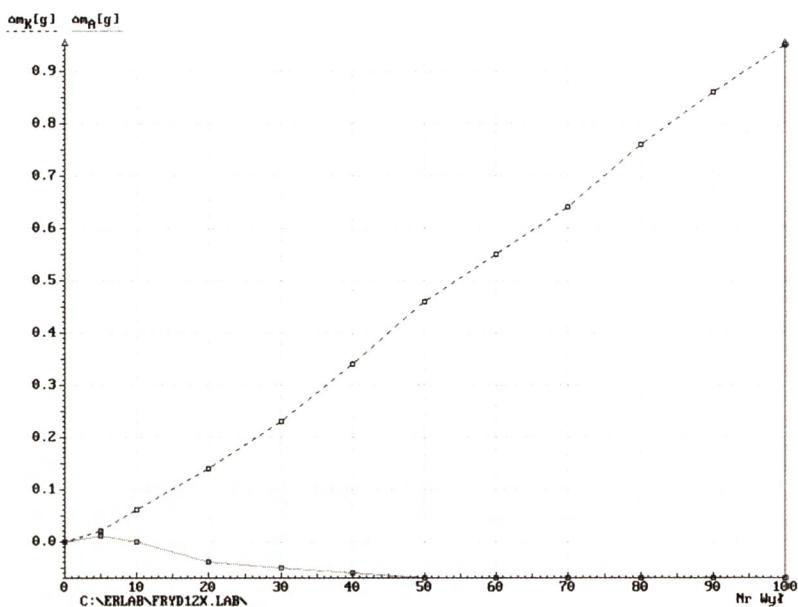
Proces ten ułatwia duża powierzchnia styków, większa od średnicy stóp łuku (Rys.5a). Na podstawie śladów erozji pozostawionych przez łuk można wyznaczyć średnicę zastępczej powierzchni kołowej stopy łuku i jej stosunek do średnicy powierzchni styków. W przeprowadzonych testach styków WC-Ag



a)



b)



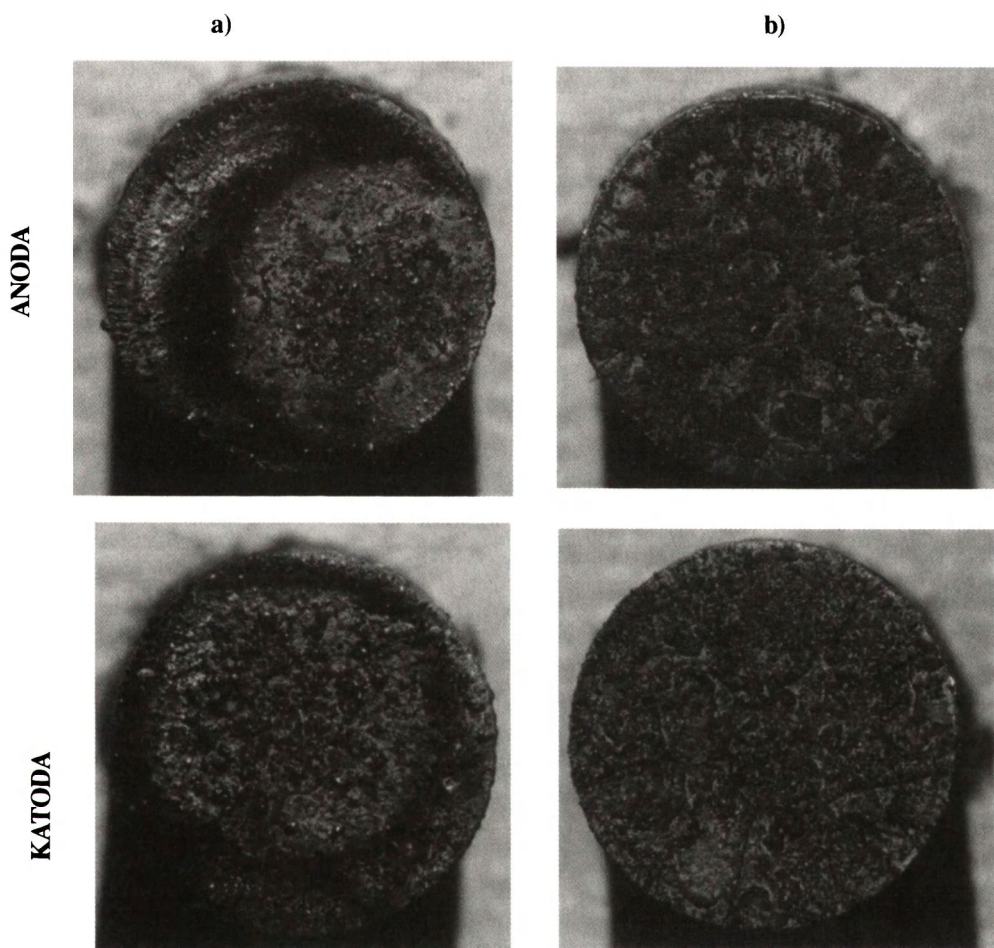
c)

Rys.4. Ubytek masy styków jako funkcja ilości łączeń dla styków WC-Ag40: a) test Nr 1 - prąd 2 kA; b) test Nr 2 - prąd 6 kA; c) test Nr 3 - prąd 10 kA.

Fig.4. Contact mass decrease versus number of switching operation, for WC-Ag40 contacts: a) Test No. 1 – 2 kA; b) Test No. 2 – 6 kA; c) Test No. 3 – 10 kA.

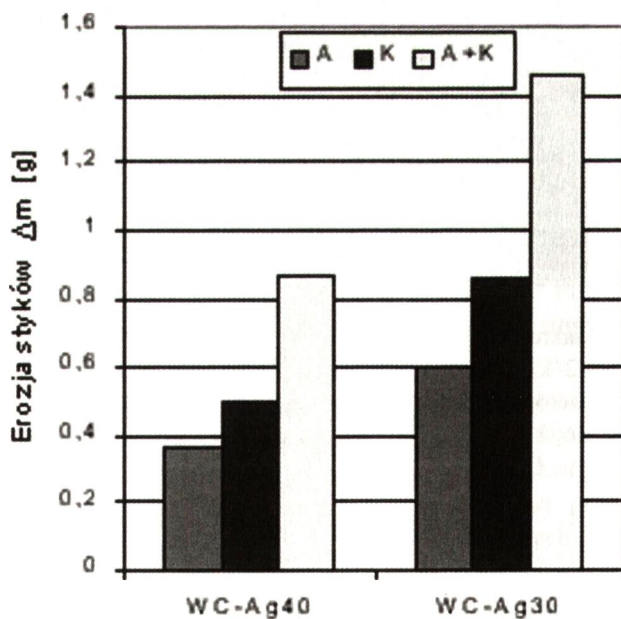
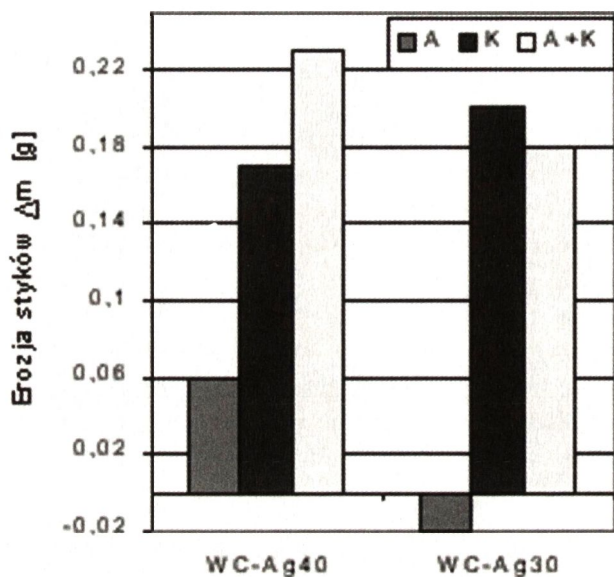
stosunek ten był przeważnie mniejszy od jedności. Np. dla testu Nr 1, tzn. połączeniu prądu 2 kA, na powierzchni styków (Rys.5) są dobrze widoczne ślady pozostawione przez stopy łuku po ostatnim łączeniu prądu. Pozwalają one określić i wyznaczyć średnicę zastępczej powierzchni kołowej stopy łuku. Wynosi ona 6,5 mm i zajmuje 42% powierzchni roboczej styków o średnicy 10 mm. Również makrofotografie styków wykonane po badaniach erozji wykazują wyraźnie lepszy stan (mniej zerodowany) anody niż katody.

Podane spostrzeżenia dotyczące erozji anody i katody dla kompozytu WC-Ag40 aktualne są również dla kompozytu WC-Ag30. Na Rys.6 przedstawiono w postaci diagramów ubytki masy styków dla obu testowanych wariantów kompozytu po 200 łączeniach (Test Nr 1) i 100 łączeniach (Test Nr 2). Jest dobrze widoczne, że ubytek masy katody styków WC-Ag40 przy mniejszym prądzie był 2,8-krotnie większy niż ubytek masy anody, zaś sumaryczny ubytek masy $\Delta m_{A+K} = 0,23$ g. Przy większym prądzie ubytek masy katody tych samych styków był tylko o 35% większy niż anody, a sumaryczny ubytek wynosił $\Delta m_{A+K} = 0,83$ g. Ta mała różnica wynika być może z tego, że przy prądzie 6 kA stopy łuku obejmują prawie całą powierzchnię styków.



Rys.5. Makrofotografia powierzchni styków WC-Ag40 po testach erozji łukowej: a) test Nr 1 – prąd 2 kA, 200 łączeń; b) test Nr 2 – prąd 6 kA , 100 łączeń.

Fig.5. Macrophotographs of surfaces of WC-Ag40 contact tips after the arc erosion testing: a) Test No. 1 – 2 kA, 200 switching; b) Test No. 2 – 6 kA, 100 switching.



Rys.6. Porównanie erozji łukowej testowanych kompozytów stykowych: a) test Nr 1 - prąd 2 kA; b) test Nr 2 - prąd 6 kA.

Fig.6. Arc erosion of tested contact tips: a) Test No. 1 – 2 kA; b) Test No. 2 – 6 kA.

Testowane kompozyty WC-Ag, różniące się zawartością węgla wolframu i strukturą, wykazują różną erozję łukową styków. Przy większym prądzie ubytki masy anody i katody oraz ubytek łączny (anody i katody) są większe o ~70% dla kompozytu WC-Ag30. Przy mniejszym prądzie różnice są mniej wyraźne i mają inny charakter jakościowy. Erozja anody jest większa dla kompozytu WC-Ag30, jednak łączny ubytek masy obu styków jest nieco mniejszy. Spowodowane to zostało nietypowym zachowaniem się anody, której masa w wyniku wykonania 200 operacji łączeniowych - zamiast zmniejszyć się - wzrosła.

W Tab.3 podane zostały wyznaczone z pomiarów wartości energii łuku, która zależy zarówno od prądu, czasu łukowego, jak i napięcia łukowego. Przy mniejszych nakładkach stykowych, przy tym samym prądzie i zbliżonym czasie łukowym, energia łuku jest nieznacznie większa dla styków z kompozytu WC-Ag30.

Tabela 3. Wartości średnie prądu, czasu łukowego i energii łuku zmierzone w testach erozji styków.

Table 3. Mean values of current, arcing time and arc energy measured in arc erosion tests.

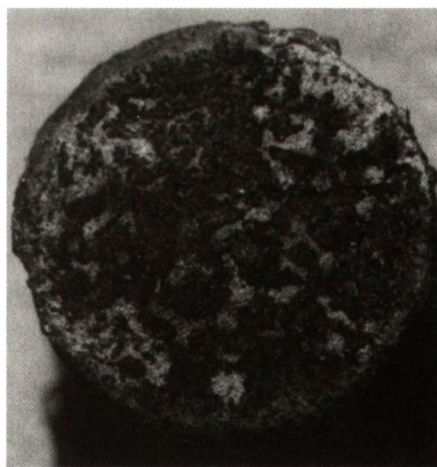
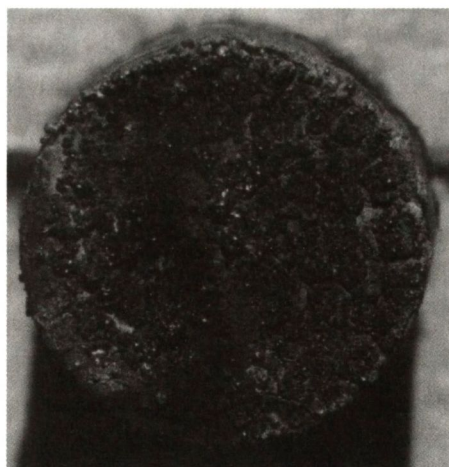
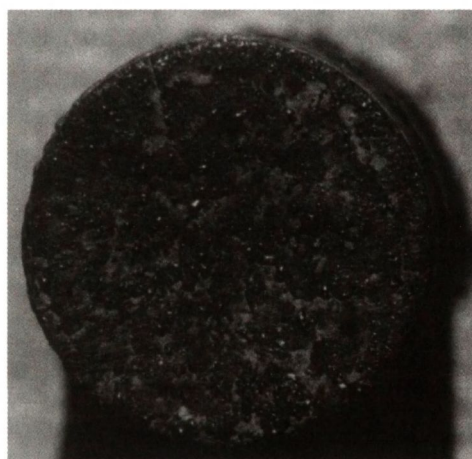
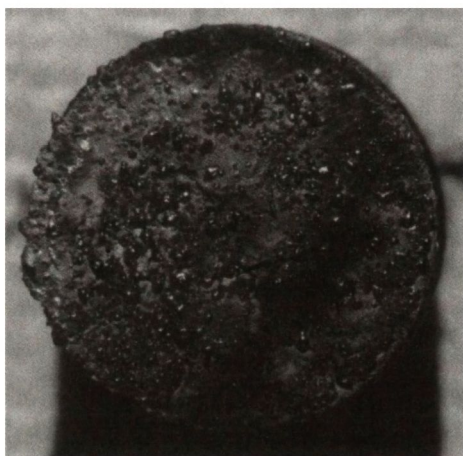
Materiał styków	Średnica styków [mm]	Prąd testu [kA]	Czas łukowy [ms]	Energia łuku [Ws]
WC-Ag40	10	2,0	7,80	184
	10	6,0	7,70	595
	15	10,0	8,63	997
WC-Ag30	10	2,0	7,70	206
	10	6,0	8,00	620
	15	10,1	8,53	985

Interesującym dla konstruktorów wyłączników może być porównanie erozji styków z badanymi kompozytów WC-Ag z erozją innych kompozytów odpornych na erozję. Na Rys.8 zestawiono wyniki badanych kompozytów z kompozytami typu W-Ag wykonanych podobną technologią (nasycania szkieletu wolframowego), które były przedmiotem obszernej pracy badawczej [12]. Bezpośrednie porównanie własności tych materiałów jest tutaj możliwe dzięki przyjęciu takich samych warunków testowania w obu przypadkach. Porównywane kompozyty W-Ag zawierały 25% Ag i różniły się między sobą strukturą (warianty I, II i III). Jak dobrze widać we wszystkich przypadkach odporność na erozję przy dużym prądzie kompozytów z węglikiem wolframu jest większa niż kompozytów z wolframem. Dla styków z kompozytu WC-Ag40 jest więk-

sza o od 65% do 400%, w zależności od wariantu kompozytu W-Ag. Należy jednak mieć na uwadze odwrotną relację jakościową i ilościową erozji anody i katody porównywanych kompozytów. W praktyce ma to znaczenie przy konstruowaniu styków wyłączników prądu stałego. Elektroda determinującą trwałość łączeniową przy dużych prądach będzie katoda w przypadku kompozytów WC-Ag, zaś anoda w przypadku kompozytów W-Ag.

a)

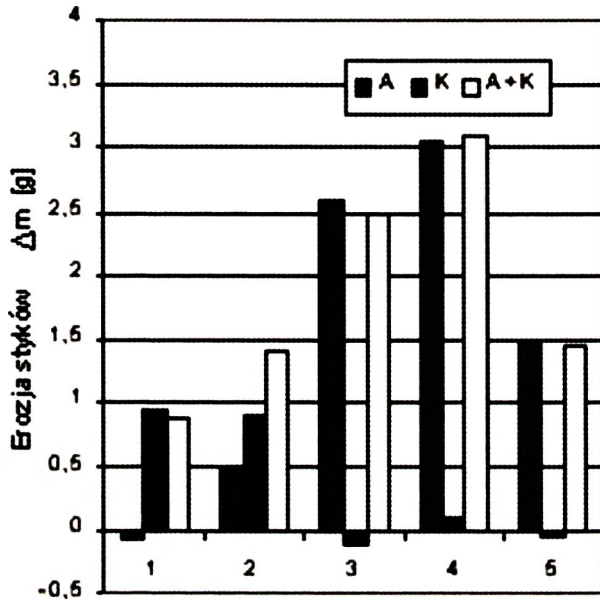
b)



Rys.7. Makrofotografia powierzchni styków WC-Ag30 po testach erozji łukowej: a) Test Nr 1 – prąd 2 kA; b) Test Nr 2 – prąd 6 kA.

Fig.7. Macrophotographs of surfaces of WC-Ag30 contacts after arc erosion testing: a) Test No. 1 – 2 kA; b) Test No. 2 – 6 kA.

D = 15 mm
I = 10 kA
 $\int idt = 55 \text{ As}$
n = 100



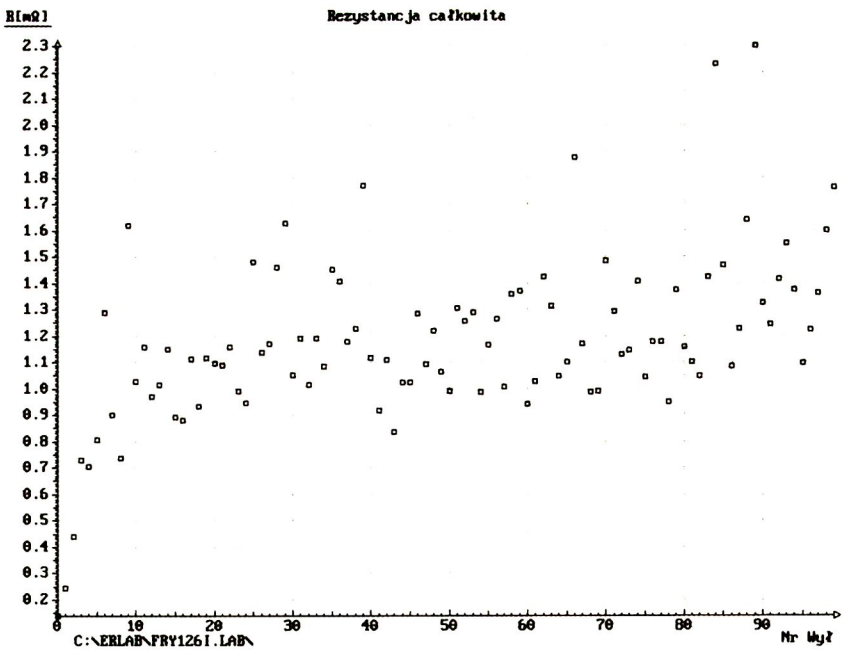
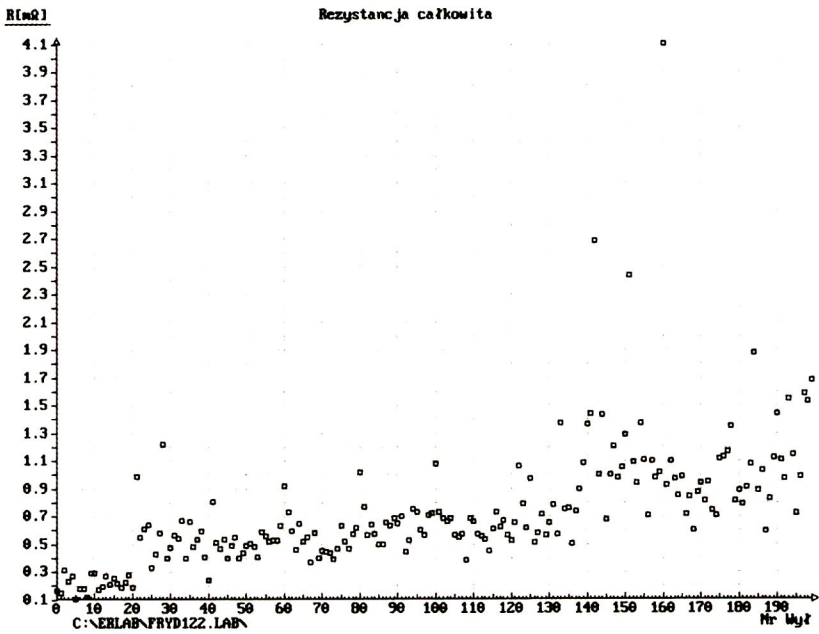
Rys.8. Porównanie erozji łukowej kompozytów WC-Ag i W-Ag: 1 – WC-Ag40; 2 – WC-Ag30; 3 - W-Ag25-I; 4 - W-Ag25- II; 5 - W-Ag25-III.

Fig.8. Arc erosion of WC-Ag and W-Ag contacts: 1 – WC-Ag40; 2 – WC-Ag30; 3 – W-Ag25-I; 4 – W-Ag25-II; 5 – W-Ag25-III.

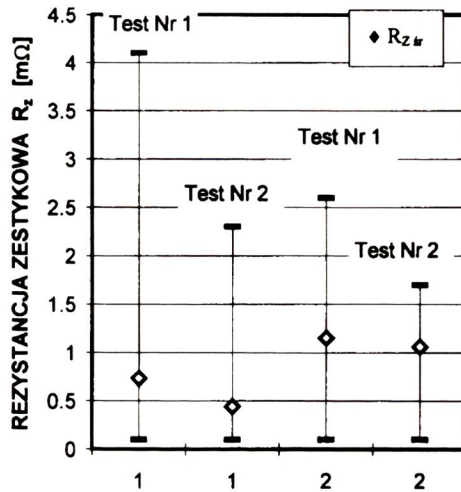
3.3.2. Rezystancja zestykowa

Na Rys.9 przedstawiono wyniki pomiarów rezystancji zestykowej otrzymane podczas testów erozji dla styków WC-Ag40. Wyniki pomiarowe dają obraz zmiany rezystancji zestykowej w wyniku erozji i postępującej degradacji powierzchni styków pod wpływem łuku w czasie łączenia prądu. Ich charakter jakościowy jest podobny do uzyskanego dla kompozytów typu wolfram-srebro [11-12]. Początkowe wartości rezystancji są rzędu 0,1-0,2 mΩ i stopniowo wzrastają z ilością wykonanych łączy prądu. Do oceny materiałów należy przyjąć średnie wartości arytmetyczne (obliczone ze wszystkich pomiarów jednego testu) oraz największe pomierzone, co przedstawiono na Rys.10. Te obie wartości rezystancji są większe przy mniejszym prądzie o ~ 60%. Wartości średnie dla styków z kompozytu WC-Ag30 są zbliżone przy łączeniu prądu 2 i 6 kA (Testy Nr 1 i 2) i są ~ 2-krotnie wyższe niż otrzymane dla styków z kompozytu WC-Ag40. Najwyższą wartość rezystancji pomierzono dla kompozytu WC-Ag40.

Erozja łukowa i rezystancja zestykowa silnoproudowych styków...



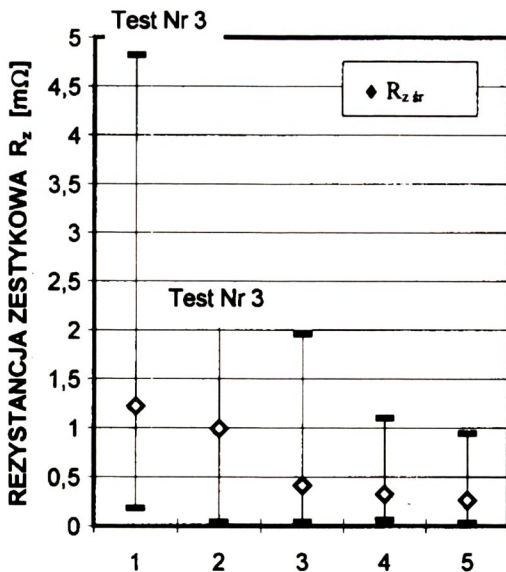
Rys.9. Rezystancja zestykowa zmierzona podczas testu erozji styków WC-Ag40.
Fig.9. Contact resistance measured during erosion test of WC-Ag40 contacts.



Rys.10. Charakterystyczne wartości rezystancji zestykowej zmierzone podczas testów erozji: 1 - WC-Ag40; 2 - WC-Ag30.

Fig.10. Characteristic values of contact resistance measured during erosion tests: 1 – WC-Ag40; 2 – WC-Ag30.

Wyniki pomiarów rezystancji zestykowej przy większym prądzie i większych wymiarach nakładek stykowych (Test Nr 3) miały podobny charakter jakościowy i nieco inne wartości (Rys.11). Największa pomierzona wartość rezystancji dla styków WC-Ag40 wyniosła 4,8 mΩ i była ponad 2-krotnie większa niż pomierzona dla styków z kompozytu WC-Ag30.



Rys.11. Porównanie rezystancji zestykowej dla styków z różnych materiałów kompozytowych: 1 - WC-Ag40; 2 - WC-Ag30; 3 - W-Ag25-I; 4 - W-Ag25-II; 5 - W-Ag25-III.

Fig.11. Comparison between contact resistances of different composite contacts: 1 – WC-Ag40; 2 – WC-Ag30; 3 – W-Ag25-I; 4 – W-Ag25-II; 5 – W-Ag25-III.

Podobnie jak w przypadku erozji i tutaj interesujące jest porównanie badanych kompozytów WC-Ag z kompozytami W-Ag. Rys.11 daje taką możliwość. Styki z kompozytów WC-Ag mają co najmniej 2-krotnie większe pomierzone rezystancje zestykowe niż styki z kompozytów W-Ag25-II i W-Ag25-III, dla których, co należy zaznaczyć, uzyskano stosunkowo małe wielkości rezystancji jak na tego typu kompozyty, nie przekraczające 1,1 mΩ [12].

4. Podsumowanie

Badane styki z materiału kompozytowego typu węgiel wolframu-srebro o zawartości 40 i 30% Ag, wykonane w ITME przy użyciu metody nasycania spieczonego szkieletu okazały się bardzo odporne na erozję łukową przy wysokich prądach, bardziej niż znane i powszechnie stosowane kompozyty typu wolfram-srebro. Łączny ubytek masy styków katody i anody przyłączeni prądu 10 kA i energii łuku rzędu 990 Ws był znacznie (nawet 4-krotnie) mniejszy niż dla kompozytów typu W-Ag25 wykonanych podobną metodą.

Spośród dwóch wariantów materiałów stykowych testowanych przy dużym prądzie, kompozyt WC-Ag40, wykonany z drobnoziarnistego proszku węgla wolframu, wykazał mniejszą o ~ 70% erozję niż WC-Ag30, mimo, iż zawierał mniejszą ilość węgla.

Interesującym spostrzeżeniem poczynionym w wykonanym eksperymencie była inna (odwrotna) ilościowa relacja erozji anody i katody. W przeciwieństwie do wyników laboratoryjnych uzyskanych dla kompozytów W-Ag i innych materiałów stykowych, w przypadku WC-Ag40 i WC-Ag30 elektrodą szybciej zużywającą się była zawsze katoda. Anoda zużywała się nieznacznie, a po dużej liczbie łączy następował przyrost masy ponad masę styku nowego. Uzasadnienie fizyczne tego zjawiska wymaga dalszych studiów nad wzajemnym oddziaływaniem łuku elektrycznego na materiał stykowy WC-Ag i materiału WC-Ag na charakter łuku.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Slade P.G., Kossowsky R.: Effect of surface structure on contact resistance as a function of operating life in Ag-W contacts. 7th ICECP, Chicago, 1974, 201 - 206
- [2] 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
- [3] Slade P.G.: Variations in contact resistance resulting from oxide formation and decomposition in Ag-W and Ag-WC-C contacts passing steady currents for long time periods. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol.CHMT-9, 1, March (1986) 3-16

E. Walczuk, P. Borkowski, K. Kaliszuk

- [4] 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
- [5] Slade P.G.: Electrical contacts. Principles and application. Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, 1999
- [6] Walczuk E., Stolarz S., Wojtasik K.: Experimental study of Ag-A-Re composite materials under high-current conditions. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Vol.CHMT-10, 2, June (1987) 283-289
- [7] Leug C.H., Kim H.: A comparison of Ag-W, Ag-WC and Ag-Mo contacts. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Vol. CHMT-7, March, (1984), 69-75
- [8] Slade P.G., Chien Y.K., Bindas J.A., Hoyer N.: Contact resistance variations in high silver content, silver-refractory carbide contacts. 13th ICEC, Lausanne, (1986), 216-220
- [9] Walczuk E., Stolarz S.: Investigations of technical properties of Ag/W contacts materials for the moulded case circuit breakers. 11.ITK, Berlin, (1982),180 - 184
- [10]Walczuk E.: Einfluß der Abmessungen von Kontaktauflagen auf das Abbrandverhalten in Niederspannungs-Leistungsschaltern. ETZ Archiv Bd.8, (1986), H.8, 285-291
- [11]Walczuk E., Boczkowski D., Błaszczuk 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
- [12]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, 259-266
- [13]Borkowski P., Walczuk E.: Contribution to contact arc erosion theory at high current. 21st ICEC, Zurich, 2002
- [14]Kaliszuk K., Frydman K., Wójcik-Grzybek D, Bucholc W., Walczuk E., Borkowski P. Zasada D.: SEM study of WC-Ag contact tips surface after testing. 21st ICEC, Zurich, 2002

Praca finansowana przez Komitet Badań Naukowych (Grant Nr 8 T10 049 18)

ARC EROSION AND CONTACT RESISTANCE OF WC-Ag HIGH-CURRENT CONTACTS

Summary

The paper presents results of investigations of arc erosion and contact resistance of the WC-Ag40 and WC-Ag30 composites obtained using the press-sinter-infiltration method. The investigations have been carried out on computer-controlled test system in current range 2 - 10 kA. Discussion of the results and comparison of the tested materials with the tungsten-silver composites are included.