

PIOTR BORKOWSKI

Politechnika Łódzka, Katedra Aparatów Elektrycznych

SYMULACJA PROCESÓW CIEPLNYCH W STYKACH ELEKTRYCZNYCH Z KOMPOZYTU Ag-W

Przedstawiono modele termiczne struktury kompozytowego materiału stykowego Ag-W. Symulacje obliczeń cieplnych dla styków narażonych na łuk elektryczny zostały wykonane w pakiecie ANSYS. Autor określił teoretyczne granice ubytku masy styków. Na ich podstawie została określona przydatność poszczególnych modeli do obliczeń naukowych. Stwierdzono, że najbardziej odpowiednim modelem jest model typu D, którego struktura jest utworzona z ośmiościanów foremnych.

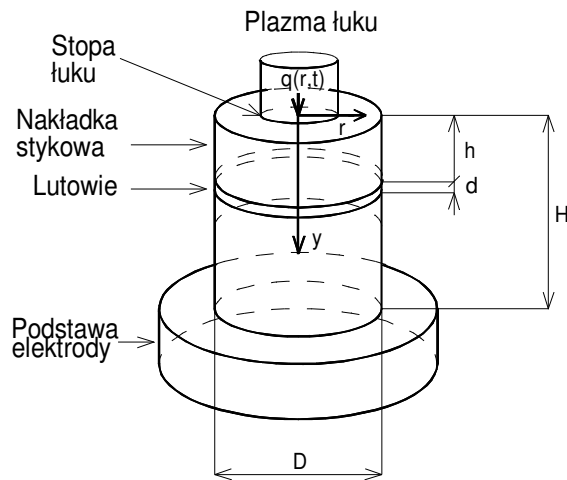
WPROWADZENIE

Wysokie wymagania stawiane nowoczesnym wyłącznikom niskiego napięcia w obwodach prądu przemiennego stwarzają konieczność stosowania na styki elektryczne materiałów kompozytowych charakteryzujących się specjalnymi właściwościami i wysoką jakością wykonania. Materiały te powinny wyróżniać się wysoką odpornością na erozję łukową i szepianie podczas wyłączania prądów zwarciovych. Powinny one również gwarantować niską i stabilną rezystancję styku podczas pracy. Kompozyty srebro-wolfram są najczęściej stosowanym materiałem na styki w wyłącznikach kompaktowych.

Ilość roztopionego i odparowanego materiału styków, jak również wybuchowy wyrzut ciekłego metalu oraz strumienie plazmy, zależą zarówno od wartości mocy cieplnej dostarczonej przez łuk elektryczny, jak i termicznych właściwości danego materiału. Analiza termiczna zjawisk fizycznych w łuku i stykach pozwala uzyskać profil temperatury w stykach, a także kształt i wymiary roztopionej części metalu. Pozwala to na dalszą ilościową ocenę teoretycznej granicy erozji styków, a tym samym trwałości styków wyłącznika podczas wyłączania prądów zwarciovych.

1. ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Przedmiotem analizy jest zestyk symetryczny osiowy pracujący pionowo, złożony z dwóch jednakowych elektrod walcowych o kształcie i wymiarach podanych na rys. 1.



Rys. 1. Kształt i wymiary modelowej elektrody (dolnej) z nakładką stykową [10]

Każda z elektrod wykonana jest z miedzi i zawiera styk w postaci nakładki stykowej połączonej z elektrodą podstawą za pomocą lutu typu LS28. W pracy rozważane będą tylko nakładki stykowe z kompozytów W-Ag o zawartości objętościowej srebra 50%, wykonane metodą nasycania szkieletu wolframowego srebrem. Stopy łukowe będą miały przekrój kołowy i będą tworzyć pojedynczą skoncentrowaną plamkę zastępczą [1]. Stopy łukowe będą umieszczone w centrum elektrod. Średnica stopy łukowej jest równa średnicy łuku i zależy od wartości prądu. Rozważane będą skutki zniszczenia i degradacji struktury powierzchni styków po jednokrotnym wyłączeniu.

Założenia szczegółowe upraszczające

Moc cieplna łuku przekazywana jest poprzez stopę łuku warstwie wierzchniej styków. Pomija się nagrzewanie elektrody ciepłem Joule'a. Powierzchnia boczna elektrody ma temperaturę równą temperaturze otoczenia. Przyjęto, że 80% mocy łuku dostarczone jest do styków, zaś 20% rozpraszane jest do otoczenia [2]. Wartości stałych cieplnych do obliczeń zostały przyjęte na podstawie literatury [3-6].

2. MODELE CIEPLNE STRUKTURY STYKU Z MATERIAŁU KOMPOZYTOWEGO Ag-W

Z uwagi na znacznie różniące się właściwości cieplne składników kompozytu Ag-W należy opracować model, który uwzględni ich strukturę. Przeprowadzona analiza stanu wiedzy specjalistycznej z zakresu inżynierii materiałowej [7-8] dała wynik negatywny. Rozważania przeprowadzone przez Nahagawę i Yoshioka [9] traktowania zbliżonego kompozytu (Cu-W) jako warstwowego nie wydają się odzwierciedlać rzeczywistej struktury kompozytu Ag-W i nie mogą być przyjęte jako uzasadnione.

Z tych względów autor postanowił przeprowadzić własne badania, przy czym w pracy ograniczył się do kompozytu Ag-W50 o składzie objętościowym 50%Ag i 50%W.

Zostaną utworzone następujące cztery charakterystyczne modele cieplne struktury styków z takiego kompozytu [10]:

- Model A przedstawiający budowę o strukturze jednofazowej i właściwościach cieplnych stanowiących średnie arytmetyczne dla wolframu i srebra (rys. 2.a),
- Model B przedstawiający budowę włóknistą utworzoną z sześciątów ułożonych szeregowo (rys. 2.b),
- Model C przedstawiający budowę o komórce podstawowej sześcienniej i przemiennym ułożeniu elementów (rys. 2.c),
- Model D przedstawiający budowę utworzoną z ośmiościanów foremnych o jednakowych ścianach bocznych i wysokości równej długości boku podstawy, o przemiennie ułożonych dwunastościanowych komórkach, zawierających 4 elementy W i dwa elementy Ag oraz 4 elementy Ag i 2 elementy W (rys. 2.d).

Ze względu na założoną wcześniej symetrię osiową styków, obliczenia w przestrzeni dwuwymiarowej zostaną wykonane w płaszczyźnie poprowadzonej przez oś styku. Do obliczeń przyjęto wielkość $a = 5 \mu\text{m}$, co odpowiada średnim wymiarom składników kompozytu.

3. ZAŁOŻONE DANE WYMUSZEŃ I PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ

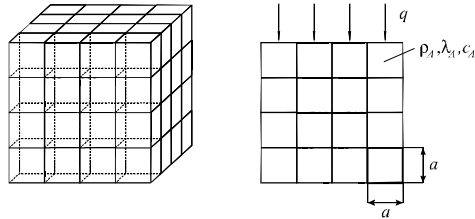
Warunki elektryczne i cieplne przyjęte do obliczeń symulacyjnych

Do obliczeń symulacyjnych przyjęto następujące dane wymuszenia elektrycznego:

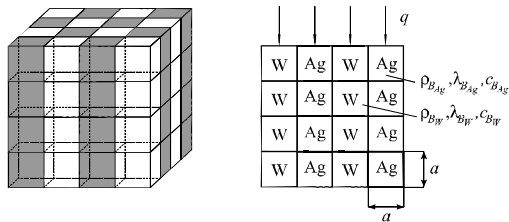
Przebieg prądu:	jedna półfala prądu sinusoidalnego o częstotliwość 50 Hz.
Amplituda prądu:	2,5 , 4 i 7 kA.

Napięcie źródła: 500 V.
 Średnica styku: 10 mm.
 Czas palenia się łuku: 8 ms.
 Średnica stopy łuku: 6 mm.

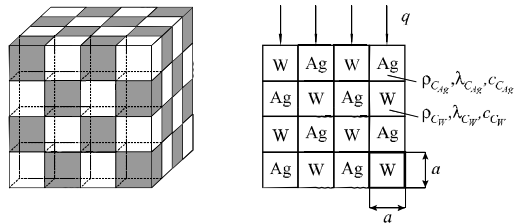
a)



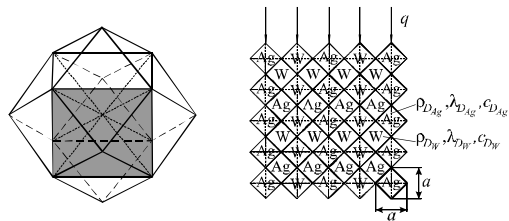
b)



c)



d)



Rys. 2. Fragmenty bryłowe styków oraz ich podział na elementy skończone w przestrzeni dwuwymiarowej dla różnych modeli struktury kompozytu Ag-W50:
 a) model A, b) model B, c) model C, d) model D

W pierwszym etapie obliczeń, przy wykorzystaniu programu EMRC NISA dla porównania różnych cieplnych modeli struktury kompozytu, wykonano obliczenia symulacyjne dla styku o średnicy 10 mm i prądu 5 kA [10]. Założono dostarczenie mocy cieplnej przez stopy łukowe do styków o stałym rozkładzie gęstości $q(r,t)$. Z uzyskanych wyników jednoznacznie wynikało, że model A, który był już przyjmowany w pracach [11, 12], odbiega znacznie wynikami od pozostałych modeli. Obliczone temperatury wg tego modelu są znacznie mniejsze od uzyskanych dla pozostałych modeli i daje się zauważyć tutaj nierealny, bardzo mały gradient temperatury. Po czasie 6 ms temperatura całej nakładki stykowej jest praktycznie jednakowa i nie jest to spowodowane przyjęciem stałych wartości fizycznych składników kompozytu. Oznacza to, że model A powstały poprzez przyjęcie wartości średnich własności cieplnych składników kompozytu nie odzwierciedla w sposób prawidłowy zjawisk cieplnych w zestyku z materiałów kompozytowych typu srebro-wolfram.

Nie powinno się go zatem stosować. Z pozostałych modeli cieplnych kompozytu najmniejsze przyrosty temperatury uzyskano dla modelu D, który zdaniem autora najwierniej odtwarza strukturę kompozytu Ag-W50. W modelu tym najpóźniej pojawiło się maksimum temperatury w punkcie leżącym w odległości 2 mm od powierzchni styku. Jednak, ze względu na dużą komplikację podczas edytowania modelu D, do dalszych rozważań został przyjęty model C, którego wyniki różnią się od wyników dla modelu D tylko o kilka procent [10].

W kolejnych symulacjach, tym razem przeprowadzonych w programie ANSYS, już tylko na modelu C (rys. 2c), rozważono trzy przypadki gęstości mocy cieplnej łuku przyłożonej do powierzchni styków.

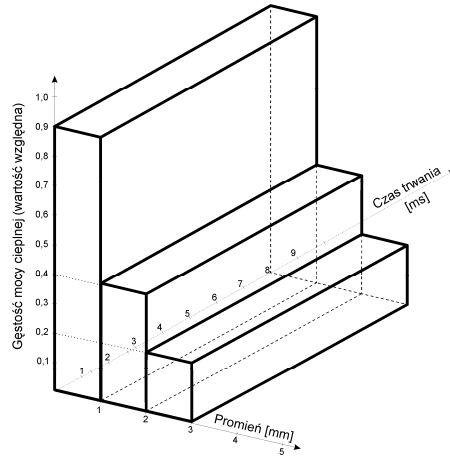
Przypadek 1. Średnia gęstość mocy cieplnej na powierzchni styku jest równomierna i stała w czasie.

Założono, że promień stopy łuku oraz średnia gęstość mocy cieplnej na powierzchni styku, która jest równomierna, są stałe w czasie palenia się łuku. Jest to najdalej idące, przyjęte uproszczenie. Założenie to ma sens dla prądów DC. Wyniki obliczeń pokażą, czy można takie uproszczenie stosować dla prądów AC.

Dla wymuszeń przedstawionych w dalszej części artykułu założono, że łuk elektryczny zaczyna palić się jednocześnie na obszarze określonym promieniem stopy łuku na powierzchni styku.

Przypadek 2. Średnia gęstość mocy cieplnej na powierzchni styku jest nierównomierna, ale stała w czasie.

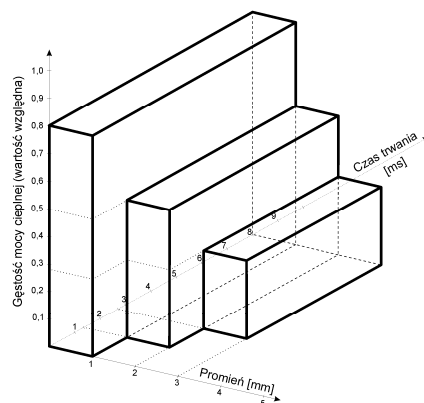
Średnia gęstość mocy cieplnej w tym przypadku jest nierównomierna. Przypadek taki ma miejsce w obwodach AC. Wzdłuż promienia stopy łuku gęstość mocy cieplnej na powierzchni styku maleje w sposób przedstawiony na rys. 3. Założenie takie przyjęto na podstawie prac Bolanowskiego [13], Sobieszczuka [14] i Marusik [15].



Rys. 3. Rozkład gęstości mocy cieplnej rozłożonej w stopie łuku nierównomiernie na powierzchni styku

Przypadek 3. *Gęstość mocy cieplnej zmienna na powierzchni styku i w czasie.*

Wymuszenia cieplne dla tego przypadku są najbardziej zbliżone do występujących w praktyce w łącznikach w obwodach AC. Podstawą do przyjęcia takiego przypadku były własne wyniki obserwacji łuku ze zdjęć wykonanych szybką kamerą [1]. Na filmie można było zauważyć zmianę średnicy stopy łuku w czasie przepływu prądu. Analiza poszczególnych klatek pozwoliła również na stwierdzenie, że gęstość mocy jest nierównomierna na całej powierzchni stopy łuku, co potwierdziło wcześniejsze przypuszczenia Bolanowskiego [13]. Na rys. 4 przedstawiono, przyjętą do obliczeń, zmienność w czasie promienia stopy i powierzchniowego rozkładu gęstości mocy cieplnej.

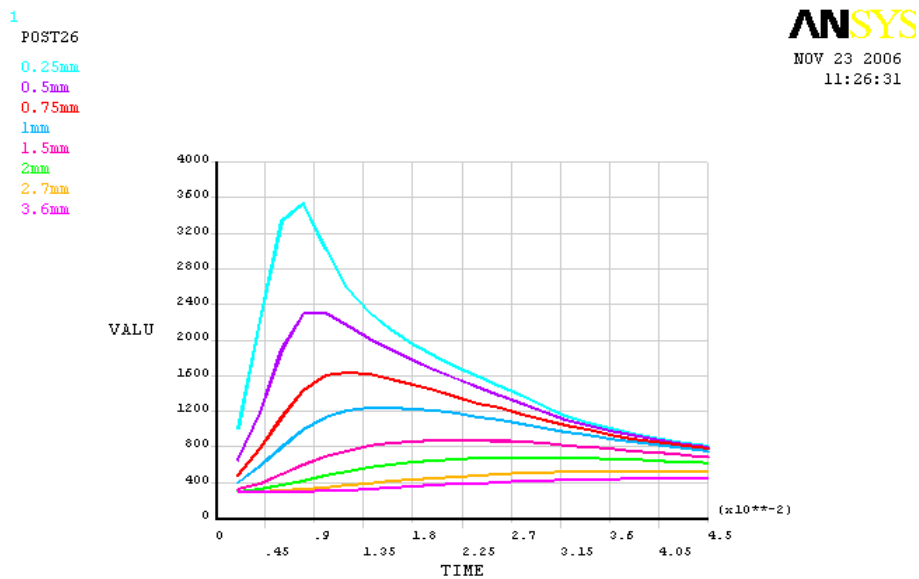


Rys. 4. Rozkład gęstości mocy cieplnej zmiennej na powierzchni styku i w czasie

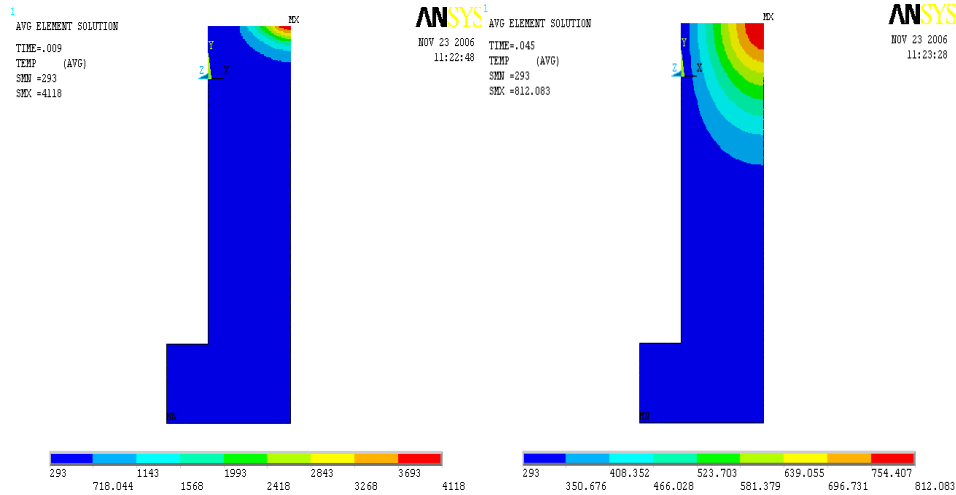
Siatka znacząco wpływa na dokładność otrzymanych wyników. Różnice otrzymanych wyników mogą być rzędu nawet setek stopni Celsjusza. Niestety, zwiększenie liczby elementów siatki znacznie wydłuża czas trwania obliczeń. W niektórych ważnych miejscach (w nakładkach stykowych), aby zwiększyć dokładność obliczeń wykonano ręczne zagęszczenia siatki. Na rys. 5-6 przedstawiono przykładowe uzyskane wyniki symulacji.

4. ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ I WNIOSKI

Zastosowanie wymuszenia cieplnego w postaci różnego rozkładu gęstości mocy pozwoliło na oszacowanie ubytku masy styków dla kompozytu Ag-W50. Dla *przypadku 1* o stałej w czasie i równomiernej gęstości mocy cieplnej na powierzchni styku, amplituda sinusoidalnej półfali prądu była równa 4 i 7 kA. Dla dwóch pozostałych przypadków wymuszenia: nierównomiernej gęstości mocy cieplnej na powierzchni styku, ale stałej w czasie (*przypadek 2*) i gęstości mocy cieplnej zmiennej na powierzchni styku i w czasie (*przypadek 3*) amplituda sinusoidalnej półfali prądu była równa 2,5 i 4 kA.



Rys. 5. Wykres zmian temperatury w funkcji czasu dla węzłów znajdujących się w osi symetrii na głębokości 0,25 - 3,6 mm (amplituda 4 kA, czas 45 ms)



Rys. 6. Rozkład pola temperaturowego dla amplitudy prądu 4 kA i czasu 9 i 45 ms

Wymuszenie cieplne łuku, trwającego 8 ms we wszystkich przypadkach, obejmowało około 60% powierzchni roboczej nakładki stykowej.

Dla wszystkich rozważanych przypadków wymuszeń stykowych określono charakterystyczne ubytki masy i objętości styków, odpowiadające erozji wywołanej tylko topieniem i parowaniem (wartość maksymalna) lub tylko wrzeniem i usuwaniem materiału drogą rozpraszania cząstek (wartość minimalna). W tym celu rozważono dwa teoretyczne przypadki erozji.

Erozja minimalna, w której uwzględniono tylko stan wrzenia składnika łatwotopliwego kompozytu – srebra i założono, że ubytek masy styków spowodowany jest usunięciem z powierzchni styku tej części styków, która osiągnęła temperaturę parowania składnika łatwotopliwego, zaś składnik trudnотopliwy (wolfram) pozostał w stanie stałym. Przy tych założeniach uzyskuje się minimalny ubytek masy styku.

Erozja maksymalna, w której uwzględniono tylko stan topnienia składnika łatwotopliwego kompozytu – srebra i ubytek masy styków został określony jako równoważny usunięciu z powierzchni styku tej części objętości srebra, która osiągnęła temperaturę topnienia srebra. W tym przypadku uzyskuje się z kolei maksymalny ubytek masy styków.

Otrzymane dane przedstawione zostały w tabelach 1 i 2.

Analiza uzyskanych wyników obliczeń wykazała, że *przypadek 1* jest przypadkiem znacznie zawiżającym dynamikę zmian rozkładu temperatury w styku. Skutkiem tego są zawyżone wartości ubytku masy styków, nawet wielokrotnie. Zatem *przypadek 1* nie odzwierciedla rzeczywistych procesów

cieplno–erozyjnych, zachodzących w styku pod wpływem działania łuku elektrycznego.

Tabela 1. Zestawienie ubytków objętości i masy materiału dla przypadku maksymalnej i minimalnej erozji (*przypadek 1*)

Materiał	Objętość ΔV [mm ³]				Masa Δm [mg]			
	Max. ubytek objętości		Min. ubytek objętości		Max. ubytek masy		Min. ubytek masy	
	4 kA	7 kA	4 kA	7 kA	4 kA	7 kA	4 kA	7 kA
Ag-W50	7,55	18,30	1,77	9,80	88,8	161,6	28,58	56,65

Tabela 2. Zestawienie ubytków objętości i masy materiału dla przypadku maksymalnej i minimalnej erozji

Materiał Ag-W50	Objętość ΔV [mm ³]				Masa Δm [mg]			
	Max. ubytek objętości		Min. ubytek objętości		Max. ubytek masy		Min. ubytek masy	
	2,5 kA	4 kA	2,5 kA	4 kA	2,5 kA	4 kA	2,5 kA	4 kA
<i>Przypadek 2</i>	2,31	5,30	0,27	2,92	24,21	42,4	2,85	13,70
<i>Przypadek 3</i>	2,64	6,36	0,283	3,51	27,7	59,9	2,96	15,40

Rzeczywiste warunki termodynamiczne zestyku, poddanego działaniu łuku, najlepiej są odwzorowane przez *przypadek 3*. Dla *przypadku 3*, obliczona temperatura maksymalna styku (wzdłuż osi symetrii styku) w funkcji odległości, mierzonej od powierzchni początkowej styku, niewiele różni się od wartości obliczonych dla *przypadku 2*. W konsekwencji wartości ubytku masy dla obu tych przypadków są do siebie zbliżone. Różnica pomiędzy *przypadkiem 2* i *3* osiąga wartość od kilku do kilkunastu procent, podczas gdy pomiędzy *przypadkiem 1* i *3* jest ponad 40%.

Ponadto, charakterystyki temperatury w funkcji głębokości ubytku materiału wskutek erozji prawie się pokrywają dla *przypadku 2* i *3*. Wnioskować zatem można, że rozkład gęstości mocy cieplnej, rozważany w *przypadku 2*, jest wystarczająco dokładny do prowadzenia obliczeń w pakiecie ANSYS. Na dodatek wprowadzenie parametrów tego rozkładu do pakietu ANSYS jest łatwiejsze niż dla *przypadku 3*.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że przepływ ciepła przez materiał kompozytu, zawierający składniki łatwotopliwy i trudnotopliwy, obniża wartości maksymalnych temperatur. Zdaniem autora, może to być spowodowane zjawiskiem odbijania ciepła od powierzchni granicznych składników kompozytu. Zagadnienie to jest jednak bardzo trudne do obliczeń,

a w dostępnych autorowi programach nie ma takich możliwości. Zagadnienie to wymaga odrębnej pracy naukowej.

Autor przeprowadził weryfikację eksperymentalnej wyników obliczeń. W stanowisku probierczym [16], wykonał badania erozji oraz zarejestrował dynamikę wyładowania łuku krótkiego kamerą szybką prądu 2,5 kA i 4 kA. W tabeli 3 zostały przedstawione wyniki pomiarów ubytku masy anody i katody.

Tabela 3. Pomierzone ubytki masy dla Ag-W50

Materiał	Masa Δm [mg]			
	2,5 kA		4 kA	
	m_A [mg]	m_K [mg]	m_A [mg]	m_K [mg]
Ag-W50	4,23	2,82	14,18	8,99

Uzyskane wyniki ubytku masy styków potwierdzają poprawność zaproponowanej metody modelowego ujęcia erozji styków za pomocą komputerowej symulacji pozwalającej określić minimalny i maksymalny ubytek masy. Mieszczą się w one obliczonych zakresach podanych w tabeli 2. Można ją zatem stosować w praktyce.

Rzeczywiste ubytki masy styków przyjmują wartości bliższe minimalnym ubytkom masy, która uwzględnia głównie wrzenie materiału, ponieważ trudno jest uwzględnić w obliczeniach cieplnych eksplozyjne wyrzucanie materiału do otoczenia, najpierw w wyniku termodynamicznego rozpadu mostka, a później w wyniku palenia się łuku.

LITERATURA

- [1] **Borkowski P.:** Modelowanie i badanie erozji styków, Praca habilitacyjna, Politechnika Łódzka, Zeszyty Naukowe PŁ Nr 1014, (Z. 365), 2008.
- [2] **Bolanowski B.:** Bilans mocy łuku prądu stałego niskiego napięcia ze szczególnym uwzględnieniem obszaru przykatodowego. Praca doktorska, PŁ, 1964.
- [3] **Barin I., Knacke O.:** Thermochemical properties of inorganic substances. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Verlag Stahleisen m.b.H. Düsseldorf, 1973.
- [4] **David R. Lide:** Handbook of chemistry and physics, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 79th edition, 1998.
- [5] **Hodgman Ch.D.:** Handbook of Chemistry and Physics, 40th edition, Chemical Rubber Publishing Co., Cleveland, Ohio 1959.
- [6] **Weast R.C. et al eds.:** CRC Handbook of Chemistry and Physics. 70th Edition, CRC Press Inc., Boca Rotan, Florida 1990.
- [7] **Tyrkiel E.:** Termodynamiczne podstawy materiałoznawstwa. PWN, Warszawa 1987.

-
- [8] **Porter D.A., Easterling K.E.:** Phase Transformations in Metals and Alloys. Van Nostrand Reinhold Co Ltd., Workingham 1982.
 - [9] **Nakagawa Y., Yoshioka Y.:** Theoretical calculation of the process of contact erosion using one dimensional contact model. Proc. 8th ICECP, Tokyo, 1976, s. 216-220.
 - [10] **Borkowski P.:** Computer simulation of thermal processes in contacts and arc erosion of silver-tungsten composite materials. Archives of Electrical Engineering, PAN w Warszawie, Vol. LVI, No. 1, s. 89-98, 2007.
 - [11] **Davies T.S., Nouri H., Fairhurst M.:** Experimental and theoretical study of heat transfer in switches. Proc. 42nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, USA, 1996, s. 45-49.
 - [12] **Lefort A., Andanson P.:** Experimental investigation of the energy exchange process at contacts subjected to an electric arc of intensity less than 3000A. Proc. 10th ICECP, Budapeszt 1980, s. 129-137.
 - [13] **Bolanowski B.:** Gęstość prądu w plamce katodowej oraz pole temperaturowe w katodzie łuku elektrycznego. Praca habilitacyjna, PŁ, 1967.
 - [14] **Sobieszczuk A.:** Synteza zjawisk cieplnych na katodzie łuku elektrycznego w świetle aktualnego stanu badań nad wyładowaniami elementarnymi. Prace Naukowe PL, Nr 146, 1985.
 - [15] **Marusik M.:** Dynamika wyładowania elementarnego łuku krótkiego. Praca doktorska, PŁ, 1982.
 - [16] **Borkowski P., Boczkowski D., Wysocki T.:** Computer-controlled system for testing contacts on switching high current. Measurement, Vol. 40/3 2007, s. 294-299.

COMPUTER SIMULATION OF THERMAL PROCESSES IN CONTACTS OF SILVER-TUNGSTEN COMPOSITE MATERIALS

Summary

The paper presents thermal models of contacts structure for Ag-W composite materials. The author has used ANSYS package to perform simulation thermal computations for contacts exposed to an electric arc and has defined theoretical limits of contact mass loss. On their basis, the usefulness of each model for scientific computations has been discussed. It has been established that the most suitable model is a model of D type, whose structure is created of regular octahedrons.

Keywords: computer simulation, arc, contacts erosion.