

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń	7
Od Autora	9
1. Wstęp	10
2. Podstawy zjawisk w łuku elektrycznym	13
2.1. Modele fizyczne łuku krótkiego	13
2.2. Modele cieplne łuku krótkiego	15
2.2.1. Podstawowe równanie przewodzenia cieplnego	15
2.2.2. Model cieplny łuku dla prądów małych i średnich	17
2.2.3. Model cieplny łuku dla prądów dużych.....	23
2.3. Energetyczne spadki napięć	25
2.4. Charakterystyki napięcia łuku krótkiego.....	29
2.4.1. Charakterystyki statyczne	29
2.4.2. Charakterystyki dynamiczne.....	32
2.5. Wnioski	34
3. Modele fizyczne i matematyczne erozji styków	35
3.1. Wprowadzenie	35
3.2. Modele erozji przy małych prądach.....	36
3.3. Modele erozji przy średnich prądach	43
3.4. Modele erozji przy dużych prądach	44
3.5. Erozja styków w różnych stanach fizycznych materiału.....	48
3.5.1. Równanie bilansu masy styków przy wyładowaniu łukowym	48
3.5.2. Różne procesy fizyczne i mechaniczne powodujące erozję styków przy wyładowaniu łukowym.....	50
3.5.3. Przemieszczanie masy wskutek parowania materiału	52
3.5.4. Przemieszczanie masy wskutek topienia materiału.....	52
3.6. Wnioski	57
4. Symulacja procesów erozyjnych w zestyku przy wyładowaniu łukowym ..	58
4.1. Geometryczne modele pola temperaturowego w stykach	58
4.1.1. Model jednobryłowy	63
4.1.2. Modele wielobryłowe.....	65
4.2. Analiza matematyczna przebiegów cieplnych w zestyku otwieranym ...	67
4.2.1. Ogólne założenia.....	67
4.2.2. Symulacyjne obliczenia komputerowe	71
4.3. Wnioski	76
5. Modelowanie erozji styków przy użyciu programów komputerowych ...	77
5.1. Założenia	77
5.2. Zastosowanie programu ANSYS do modelowania cieplnej struktury styku z materiału kompozytowego Ag-W	78
5.2.1. Wyniki symulacji komputerowej	83

5.2.2. Obliczenia ubytku masy dla anody i katody	87
5.2.3. Weryfikacja eksperymentalna.....	90
5.3. Program komputerowy do obliczania erozji styków.....	95
5.3.1. Wprowadzenie	95
5.3.2. Algorytm procedury obliczania ubytku masy styków z metalu	96
5.3.3. Niektóre wyniki obliczeń.....	101
5.4. Wnioski	107
6. Badanie wpływu parametrów elektrycznych i zestykowych na erozję styków w łącznikach	109
6.1. Wprowadzenie	109
6.2. Wpływ parametrów łuku elektrycznego.....	112
6.2.1. Wpływ rodzaju i wartości prądu	112
6.2.2. Wpływ czasu, napięcia i energii łuku	116
6.3. Wpływ kształtu i wymiarów styków	118
6.4. Wpływ prędkości rozchodzenia się styków.....	126
6.5. Wpływ materiału styków.....	127
6.6. Wnioski	147
7. Badanie migracji i degradacji łukowej styków	150
7.1. Opis stanowiska badawczego	150
7.2. Metoda badań erozji styków z użyciem ekranu-pułapki	155
7.3. Badane materiały	156
7.4. Parametry probiercze i wyniki pomiarów	157
7.5. Analiza wyników badań.....	160
8. Mechanizm erozji styków z kompozytów wolfram-srebro.....	164
8.1. Uwagi ogólne.....	164
8.3. Stan powierzchni po wielokrotnych wyłączeniach.....	166
8.4. Mechanizm erozji i degradacji badanych kompozytów wolfram-srebro	171
8.5. Wnioski	178
9. Podsumowanie.....	180
Literatura.....	182
Spis rysunków	193
Spis tabel	198
Summary	199

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- A – stała proporcjonalności,
- a – przyspieszenie,
- a_o – średnica plamki elementarnej,
- a_t – współczynnik rozszerzalności cieplnej,
- B – indukcja pola magnetycznego,
- C – ciepło właściwe,
- d – odległość do podstawy styku i z powrotem,
- d_f – głębokość dyfuzji,
- D – odległość między elektrodami,
- E – moduł sprężystości,
- E_a – energia aktywacji,
- f_i – współczynnik odpowiadający przepływowi prądu jonowego,
- F – docisk,
- F_z – siła zestykowa,
- h – wysokość styków
- h_e – wysokość odcinka kuli,
- H_s – ciepło sublimacji,
- j_s – gęstość prądu w plamce katodowej,
- k_p, k_l, k_v, k_s – współczynniki usuwania materiału w różnych stanach materii
- K_b – stała Boltzmanna,
- l_{lk} – strefa ładunku przestrzennego,
- l_{jk} – strefa jonizacji przy katodzie,
- l_o – wymiar obszaru poddanego działaniu fali cieplnej, w przybliżeniu równy $(\alpha_i t)^{0,5}$,
- L_v – utajone ciepło parowania,
- m_i – masa jonów,
- Δm_p – usunięta masa cząstek naładowanych,
- Δm_v – usunięta masa obojętnych par,
- Δm_l – usunięta masa materiału stopionego,
- Δm_s – usunięta masa materiału w stanie stałym,
- M_W – masa atomowa metalu,
- N – liczba wykonanych łączy,
- p_o – ciśnienie początkowe,
- p_j – ciśnienie jonów,
- p_r – ciśnienie nad powierzchnią o promieniu krzywizny r ,
- p_∞ – ciśnienie nad powierzchnią płaską,
- p_p – ciśnienie plazmy,
- ΔP – ciśnienie kapilarne,
- q – gęstość strumienia cieplnego,

- q_j – gęstość mocy cieplnej powstała w wyniku bombardowania naładowanymi i obojętnymi cząsteczkami (strumienie plazmy),
- q_c – gęstość mocy cieplnej powstała w wyniku przewodzenia,
- q_{cv} – gęstość mocy cieplnej powstała w wyniku konwekcji,
- q_r – gęstość mocy cieplnej powstała w wyniku promieniowania,
- q_{ch} – gęstość mocy cieplnej powstała w wyniku zachodzenia reakcji chemicznych,
- q_{ev} – gęstość strat mocy cieplnej powstała w wyniku parowania,
- q_i – ładunek jonów,
- Q – ładunek elektryczny,
- r – promień stopy łuku,
- r_1, r_2 – promienie krzywizny powierzchni zwilżanej,
- R – stała gazowa,
- R_{WP} – promień izotermy o temperaturze T_{WP} ,
- R_z – rezystancja zestykowa,
- t – czas,
- t_a – czas ruchu przyspieszonego materiału plamki na drodze promienia plamki $a_0/2$,
- t_p – czas powrotu fali akustycznej,
- t_m – chwila rozpadu mostka,
- T_t – temperatura topnienia,
- T_w – temperatura wrzenia,
- u_l – napięcie łuku,
- v – prędkość rozchodzenia się styków,
- v_i – prędkość jonów,
- v_{kr} – średnia prędkość wyrzutu materiału,
- v_0 – prędkość dźwięku w danym materiale stykowym,
- v_r – szybkość reakcji,
- V_e – objętości wycinka kuli,
- V_l – objętość materiału elektrody,
- z_p – głębokość materiału, który zmienił swój,
- z_m – głębokość topienia,
- z_v – głębokość wyparowanego materiału,
- α – dyfuzyjność cieplna,
- η – lepkość dynamiczna materiału katodowego,
- λ – przewodność cieplna,
- μ_o – przenikalność magnetyczna,
- ρ_m – gęstość stopionego materiału,
- ρ_{i0} – rezystancja właściwa,
- σ_s – tensor naprężenia,
- σ_T – współczynnik Thomson'a,
- ϕ – średnica styków,
- ω^{LV} – energia powierzchniowa ciało stałe – ciecz.

OD AUTORA

Książka ta jest studium jednego z najbardziej zawiłych teoretycznie i trudnych eksperymentalnie problemów, determinujących właściwe funkcjonowanie elektrycznych aparatów łączeniowych w warunkach rzeczywistych. Niektóre jej fragmenty były już wcześniej publikowane w naukowych czasopismach i materiałach konferencyjnych oraz w monografii habilitacyjnej [35]. Książka jest odpowiedzią autora na liczne pytania ze strony podmiotów badawczych i przemysłowych z sektora aparatów elektrycznych o dostępność monografii [35], zawierającej m.in. wiele przydatnych dla praktyki informacji o charakterze aplikacyjnym.

1. WSTĘP

W obwodach elektrycznych w energetyce i automatyce przemysłowej, górnictwie i hutnictwie, na kolei i okrętach, w budynkach bytowo-komunalnych niezbędnymi i szczególnie ważkimi dla realizowania przewidzianych dla nich celów (doprowadzenie energii elektrycznej przez załączenie i wyłączenie prądu) są aparaty łączeniowe, zwane także łącznikami elektrycznymi lub w skrócie łącznikami. Wśród nich największe znaczenie znajdują łączniki zestykowe, w których funkcje przerywania i zamykania obwodu elektrycznego realizowane są poprzez zestyki łączeniowe, tj. współpracujące ze sobą dwa lub więcej styki, z których przynajmniej jeden jest stykiem ruchomym.

Styki elektryczne stanowią podstawowe i najbardziej odpowiedzialne elementy konstrukcji łączników zestykowych. Od ich jakości i poprawnego działania w łączniku w różnych warunkach pracy, a szczególnie w stanach zwarciovych obwodu, zależy niezawodność funkcjonowania układów elektroenergetycznych i szeroko rozumianej automatyki.

Na pracę łączników zestykowych, na ich zdolność łączeniową, trwałość i niezawodność działania decydujący wpływ ma łuk łączeniowy pojawiający się w zestykach podczas wykonywania czynności łączeniowych, którego szkodliwym efektem jest m.in. erozja styków. Erozja styków jest skutkiem wielu zjawisk cieplnych zachodzących w układzie zestyku z łukiem podczas procesów łączenia prądu w obwodzie elektrycznym. Rozpoczyna się ona już w czasie bezpośrednio poprzedzającym otwarcie zestyku (erozja mostkowa) i występowania łuku (erozja łukowa) i trwa w niektórych przypadkach również po zgaszeniu łuku łączeniowego (erozja połukowa). W przypadku łączników elektroenergetycznych decydujące znaczenie dla trwałości łączeniowej styków ma erozja łukowa i ona jest przedmiotem pracy.

W czasie pracy łącznika i przepływu prądu elektrycznego przez tory prądowe łącznika w zestykach występują różnorodne zjawiska fizyczne, chemiczne i elektromechaniczne, które determinują parametry znamionowe łącznika. Zestyki muszą być odporne na takie zjawiska, jak: nagrzewanie i wzrost temperatury, prowadzące do starzenia izolacji (ograniczenie żywotności łącznika), szczepienia styków, na wspomniane wyżej zużywanie styków pod wpływem działania łuku elektrycznego (erozja łukowa), ścieranie mechaniczne, utlenianie i korozję elektromechaniczną i inne. Stąd kapitalne znaczenie ma materiał, z którego wykonane są styki lub tylko ich fragmenty robocze (nakładki i nity stykowe).

Parametry znamionowe łącznika elektrycznego określone są przez producenta i są uwarunkowane przewidywanymi warunkami pracy łącznika. W eksploatacji łączników jednak często występują warunki obwodowe i środowiskowe odbiegające (niekiedy znacznie) od tych, dla których podano w informacji technicznej (katalogu) jako parametry znamionowe. Projektant obwodów elektrycznych jest zmuszony podejmować samodzielnie decyzję, jaki zastosować łącznik, aby uzyskać dużą jego niezawodność w warunkach, w których będzie pracował. Nie jest to łatwa decyzja, wymagająca dużej wiedzy i doświadczenia zawodowego.

Spełnienie różnorodnych wymagań konstruktorów łączników elektrycznych stawianych producentom podstawowych materiałów stykowych typu miedź czy srebro w większości przypadków praktycznie nie jest możliwe. Wprawdzie srebro ma największą przewodność elektryczną, cieplną i pojemność cieplną, ale niską temperaturę topnienia i wrzenia, przez to mało odporne na działanie łuku elektrycznego. Z kolei takie metale, jak wolfram i molibden odznaczają się wysoką temperaturą topnienia i wrzenia. Są zatem odporne na działanie łuku elektrycznego, ale mają małą przewodność elektryczną. Stąd od wielu lat znalazły w praktyce zastosowanie materiały kompozytowe na bazie srebra typu Ag-Me (AgW, AgMo, AgNi, CuW, CuMo) bez i z małymi procentowymi dodatkami innych metali. Szerokie zastosowanie znalazły również kompozyty typu srebro-tlenek metalu Ag-MeO (AgCdO, AgSnO₂, AgFe₂O₃). Największe znaczenie techniczne w łącznikach stosowanych w obwodach o dużych prądach zwarciovych mają kompozyty srebro-wolfram (AgW) i srebro-węgiel wolframu (AgWC) oraz ich pochodne tworzone poprzez modyfikowanie innymi metalami lub węglem. Szczególne znaczenie dla pewnych rodzajów łączników mają kompozyty typu AgC (duża odporność na szepianie). Cechą charakterystyczną kompozytów srebro-węgiel jest duża zależność właściwości elektrycznych od sposobu wykonywania. Tutaj są duże możliwości rozwiązań technologicznych i w tym zakresie prowadzone są ciągle badania przez największych producentów styków.

Obecnie w aparatach łączeniowych niskiego napięcia do podstawowych zastosowań (praca manewrowa), gdzie wymaga się dużej odporności na erozję łukową przy wyłączaniu dużych prądów, stosowane są powszechnie materiały kompozytowe typu srebro-metal i srebro-tlenek metalu o zawartości procentowej 90% Ag. W wyłącznikach niskonapięciowych przemysłowych i instalacyjnych najlepiej zdają egzamin materiały kompozytowe typu wolfram-srebro o zawartości (25-60)% Ag i strukturze szkieletowej.

Wymagania stawiane przez konstruktorów łączników producentom materiałów stykowych są bardzo różnorodne i stale wzrastają, co powoduje

konieczność stałego prowadzenia badań i prac rozwojowych w inżynierii materiałowej. Ponieważ jest to problematyka interdyscyplinarna, szczególnego znaczenia nabiera współpraca z ośrodkami naukowo-badawczymi zajmującymi się łącznikami (aparataami) elektrycznymi, szczególnie z ośrodkami, które w tym zakresie mają doświadczenie i dysponują możliwościami badawczymi w zakresie określania właściwości elektrycznych materiałów stykowych. Instytut (obecnie Katedra) Aparatów Elektrycznych PŁ zajmuje się problematyką badań właściwości styków od wielu lat. Wynikiem tego są funkcjonujące stanowiska probiercze, jedyne w kraju, do badań porównawczych i oceny właściwości łączeniowych materiałów stykowych w warunkach modelowych.

Badania materiałów stykowych prowadzone są również w wielu laboratoryjnych ośrodkach w przemyśle zagranicznym. Jednak trudno jest wyniki badań z różnych ośrodków badawczych porównywać i wyciągnąć jednoznaczne wnioski praktyczne. Powodem tego jest zależność wyników nie tylko od składu i technologii badanych materiałów, ale również od sposobu przeprowadzania badań (w łącznikach lub modelowych układach probierczych) i przyjętych warunków probierczych.

Kilkudziesięcioletnia współpraca Instytutu Metali Nieżelaznych w Gliwicach oraz Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie z Katedrą (poprzednio Instytutem) Aparatów Elektrycznych w tym zakresie odniosła wiele sukcesów i może być wzorem do naśladowania.

Problem jakościowego i ilościowego ujęcia erozji w zestykach przy wyłączaniu prądów roboczych i zwarciovych, typowych dla niskonapięciowych wyłączników nie został dotychczas dostatecznie poznany i teoretycznie opracowany. Na obecnym etapie znajomości tego problemu, trudno jest w pełni określić ilościowy i jakościowy wpływ wszystkich wielkości fizycznych i czynników wpływających na erozję styków w łącznikach. Dla tego też w tej monografii, obok prezentacji i analizy wyników badań różnych autorów podane zostały badania własne stwarzające podstawy do coraz lepszych, bardziej świadomych poczynań w zakresie konstrukcji łączników, opracowywaniu i badaniach nowych materiałów stykowych.

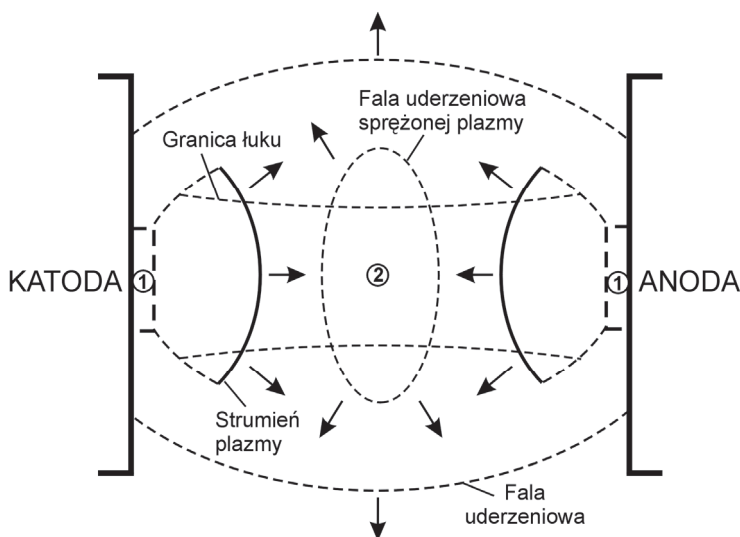
Podjęcie tej tematyki w monografii jest w pełni uzasadnione ze względu zarówno na jej duże znaczenie naukowe jak i aplikacyjne dla konstruktorów łączników i producentów materiałów stykowych, jak również dla umożliwienia racjonalnej eksploatacji łączników, a tym samym zwiększenia niezawodności obwodów, w których zostały zastosowane. Monografia będzie użyteczna również dla dydaktyki akademickiej.

2. PODSTAWY ZJAWISK W ŁUKU ELEKTRYCZNYM

2.1. Modele fizyczne łuku krótkiego

W łącznikach zestykowych przewidzianych dla obwodów wysokiego napięcia długość łuku przy przerywaniu obwodu może wynosić dziesiątki, a nawet setki centymetrów. W łącznikach niskiego napięcia długość łuku zwykle nie przekracza kilku centymetrów. W tym ostatnim przypadku przyjęło się mówić o tzw. łuku krótkim.

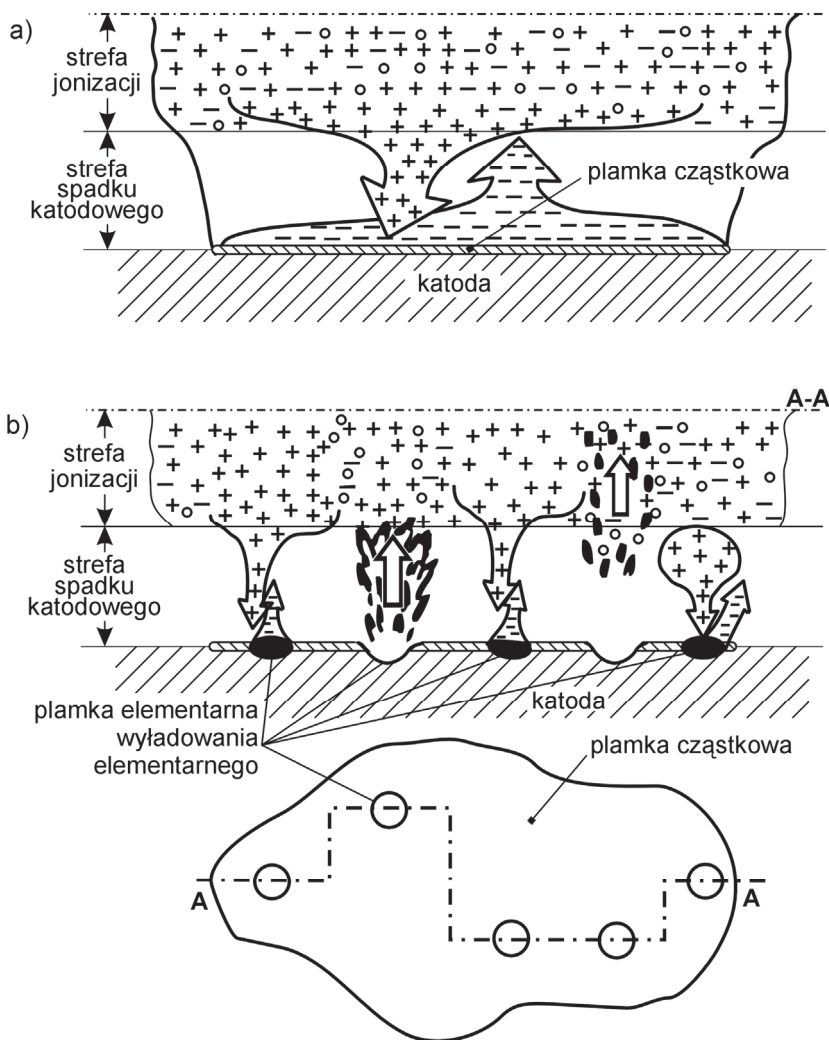
Długość łuku, obok prądu przewodzącego przez łuk, jest jedną z najważniejszych wielkości, od której zależy intensywność erozji łukowej styków. Na rys. 1 została przedstawiona schematycznie struktura łuku krótkiego, z podziałem na stopy łuku połączone ze strefami przejściowymi, przykatodową (przy katodzie) i przyanodową (przy anodzie), kolumnę łukową, obszary działania strumieni plazmy oraz obszar i kierunek działania fali uderzeniowej wytworzonej przez kolumnę łukową (sprężonej plazmy) i cały łuk występujący między elektrodami.



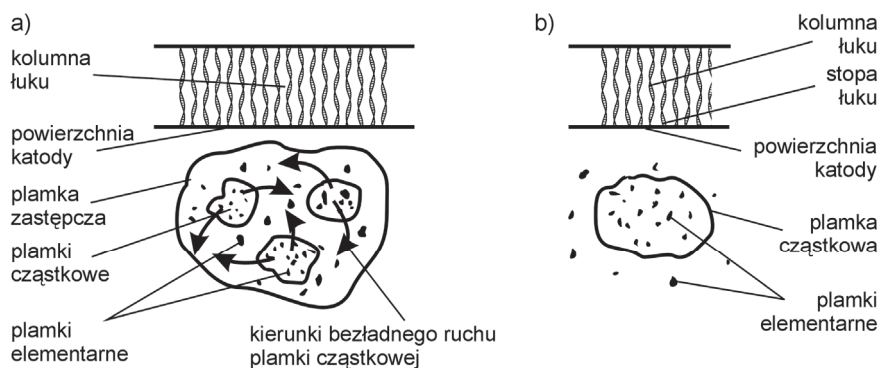
Rys. 1. Schematycznie przedstawiona struktura łuku krótkiego (nie zachowano skali)
1 – stopa łuku ze strefą przejściową (przykatodową i przyanodową), 2 – kolumna łukowa

Ze względu na szczególne znaczenie dla opisu i zrozumienia erozji łukowej spowodowanej zjawiskami zachodzącymi na i przy katodzie pokazane zostały na rys. 2 i 3 modele katodowej stopy i katodowej plamki łuku, tj. z wyodrębnioną powierzchnią katody uwzględniającą występowanie mikroplamek i mikrowyła-

dowań w plamkach elementarnych [135]. Poprzez te mikroplamki zachodzi wymiana energii, cząstek zjonizowanych oraz materiału (par metalu pomiędzy łukiem i katodą). Ze względu na silną zależność zjawisk pokazanych na rys. 2 i 3 od wartości prądu łuku i konstrukcji zestyku, podane na nich obrazy należy traktować jako orientacyjne dla łuku prądów powyżej kilkudziesięciu amperów, długości powyżej dwóch milimetrów oraz dużej (nieograniczonej) powierzchni katody. Bardziej szczegółowy opis został podany w pracy [35].



Rys. 2. Model katodowej stopy łuku przedstawiający zjawiska w plamce cząstkowej [135]
 ”+”, ”-” – cząstki naładowane, ”o” – cząstki nienaładowane (obojętne),
 ☼ – cząstki stopionej katody lub pary metalu katody



Rys. 3. Model katodowej plamki łuku:
a) schemat plamki zastępczej, b) schemat plamki cząstkowej [135]

Przedstawione modele są trudne do eksperymentalnej weryfikacji, ale dobrze wyjaśniają niektóre skutki działania erozyjne łuku krótkiego.

2.2. Modele cieplne łuku krótkiego

2.2.1. Podstawowe równanie przewodzenia cieplnego

Obszar stopienia i wyparowania materiału elektrody połączonego z eksplozyjnym i plazmowym wyrzutem kropli zależy zarówno od wartości dostarczonej mocy cieplnej, jak i własności cieplnych materiału elektrod. Analiza cieplna pozwala na poznanie rozkładu temperatury w stykach, kształtu i rozmiaru stopionej części metalu, szybkości nagrzewania i chłodzenia. Na podstawie tych parametrów można oszacowywać ilościowo erozję styków, a co za tym idzie trwałość łączeniową styków w łącznikach.

Już w latach siedemdziesiątych XX. wieku badacze zauważyli odmienną proces erozji dla prądów małych i dużych, przy czym granica wartości prądu nie została wyraźnie określona [144]. Zauważono także, że anoda zużywa się znacznie bardziej niż katoda [151, 152, 155]. W pewnych przypadkach (warunkach) na katodzie może wystąpić nawet przyrost materiału w stosunku do stanu początkowego, kiedy styki są jeszcze nowe. Stwierdzenie to dotyczy różnych materiałów styków typu srebro-metal, srebro-grafit oraz srebro-tlenek metalu [126, 152]. Dotychczas brak jest analizy i dobrego uzasadnienia, dlaczego występują tak duże różnice ilościowe erozji tych elektrod.

Próby opisu oddziaływania łuku na styki na drodze teoretycznej podejmowali kilkakrotnie naukowcy na przestrzeni ostatnich 40 lat. Opracowywali różne modele matematyczne procesów cieplnych w zestykach. Do ich rozwiązania matema-

tycznego równań cieplnych wykorzystywali początkowo metody analityczne, później wraz z rozwojem komputerów, zaczęli wykorzystywać metody numeryczne.

Przyjmując jako kryterium podziału wartość prądu wyłączanego, wyodrębnia się następujące modele procesów cieplnych w stykach dla zakresu prądów:

- małych (do 10 A),
- średnich do (10-1.000 A),
- dużych (powyżej 1.000 A).

W każdym przypadku trzeba rozwiązać podstawowe równanie przewodzenia ciepła o ogólnej postaci

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

które we współrzędnych prostokątnych, przyjmuje postać:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

gdzie: $T = T(x,y,z,t)$ – temperatura w punkcie o współrzędnych (x,y,z) w czasie t ,

$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ – współczynnik dyfuzyjności cieplnej, λ – przewodność cieplna,

ρ – gęstość właściwa, c – ciepło właściwe.

Większość podstawowych rozwiązań analitycznych podanego równania przewodzenia ciepła (1) dla szczególnych przypadków praktycznych dokonali Carslow i Jaeger [37]. Przyjmowali oni dla ułatwienia rozwiązań, że:

- nie ma promieniowania i konwekcji z powierzchni elektrody,
- własności cieplne i gęstość materiału elektrody nie ulegają zmianie podczas przewodzenia ciepła,
- nie ma wrzenia podczas przewodzenia ciepła,
- ciepło topnienia jest równe zero.

Mimo tak dużej liczby uproszczeń udało się im uzyskać rozwiązanie analityczne tylko dla najprostszycch przypadków wymuszeń, m.in. dla wymuszenia w postaci chwilowego źródła punktowego [37]:

$$T(x, y, z, t) = T_o + \frac{q_o}{4 \cdot \rho \cdot c \cdot (\pi \cdot \alpha \cdot t)^{\frac{3}{2}}} \cdot e^{-\frac{(x^2+y^2+z^2)}{4 \cdot \alpha \cdot t}} \quad (3)$$

Inne przypadki wymuszeń dają skomplikowane rozwiązanie analityczne uzyskane w oparciu o funkcję błędu. Mogą one być rozwiązane jedynie metodami numerycznymi.