

Edward DOBAJ

Instytut Spawalnictwa

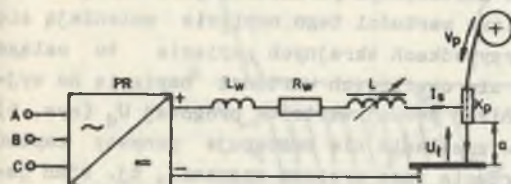
BADANIE ZJAWISK W PRZESTRZENI MIĘDZYELEKTRODOWEJ PRZY SPAWANIU ŁUKIEM ZWARCIOWYM

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badania przebiegu rezystancji przestrzeni międzyelektrodowej w czasie wyładowania łukowego w osłonie CO_2 , parametrów granicznych wyładowania łukowego określających warunków stabilności łuku oraz do ponownego zapłonu łuku. Uzyskane wyniki wykorzystano do doboru prostownika tyrystorowego do zasilania procesu spawania łukiem zwarciovym.

1. WPROWADZENIE

Proces spawania elektrodą topliwą w osłonie CO_2 ze zwarciovym przenoszeniem metalu z elektrody do jeziora spoiny nazywany w literaturze spawaniem metodą MAG (metal active-gas), spawaniem łukiem krótkim lub spawaniem łukiem zwarciovym [1], charak-

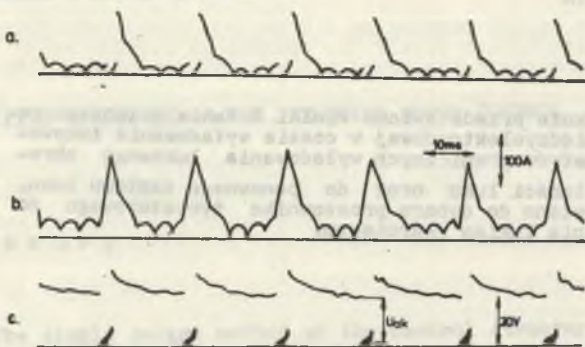
teryzuje się powtarzającymi się systematycznie zvarciami przestrzeni międzyelektrodowej. Gdy kropla roztopionego metalu elektrody drutowej dotyka jeziora spoiny łuk gaśnie a roztopiony metal tworzy mostek pomiędzy końcówką elektrody i jeziorkiem spoiny. Pod wpływem działania sił ciężkości, napięcia powierzchniowego, elektromagnetycznych i termoeksplzji [1] mostek zostaje przerwany a roztopiony metal spływa do je-



Rys. 1. Schemat uproszczony obwodu spawalniczego do spawania łukiem zwarciovym. PR - prostownik, L_w - indukcyjność wewnętrzna, R_w - rezystancja wewnętrzna, L - indukcyjność dodatkowa, I_s - średnia wartość prądu spawania, U_1 - średnia wartość napięcia, V_p - prędkość podawania elektrody, K_p - ślizgowy element kontaktowy, a - długość elektrody na wolnym wylocie

ziorka spoiny. Równocześnie pojawia się ponownie wyładowanie łukowe powodująca topienie elektrod. Tak cyklicznie powtarzający się proces uzyskiwany jest w spawalniczym obwodzie elektrycznym o uproszczonym schemacie pokazanym na rys. 1.

Warunkiem uzyskania spawania łukiem zwarciovym jest ciągle podawanie elektrody, zastosowanie atmosfery ochronnej łuku, składającej się z CO_2 lub mieszaniny gazów, np. argonu i CO_2 oraz zastosowanie źródła zasilania o płaskiej charakterystyce zewnętrznej $U(I)$ i odpowiednich właściwościach dynamicznych. Warunki te przy odpowiednio dobranych parametrach obwodów umożliwiają powstanie procesu samoregulacji w obwodzie spawalniczym, objawiającym się w automatycznym dopasowaniu prędkości topienia elektrody do prędkości jej podawania.



Rys. 2. Oscylogram przebiegów czasowych: a - mocy; b - prądu; c - napięcie w przestrzeni międzyelektrodowej, U_{ak} - suma napięć przyelektrodowych

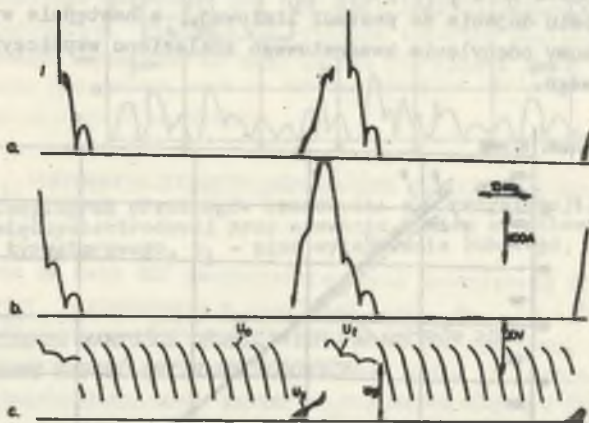
Proces spawania jest wówczas stabilny i charakteryzuje się dwiema cyklicznie powtarzającymi się fazami, tj. fazą wyładowania łukowego i fazą zwarcia elektrod (rys. 2).

Problem zasilania procesu spawania łukiem zwarciovym komplikuje się przy zastosowaniu prostowników tyrystorowych. Wówczas, przy obniżeniu napięcia zasilania przestrzeni międzyelektrodowej przez zmianę wysterowania tyrystorów, pojawia się trzecia faza procesu spawania, tj. stan jałowy (rys.

3) [3]. Dzieje się tak dlatego, że nastawianym parametrem jest napięcie o wartości średniej, natomiast chwilowe wartości tego napięcia zmieniają się w bardzo szerokich granicach. W przypadkach skrajnych napięcie to osiąga wartości równe zero. Po obniżeniu się chwilowych wartości napięcia na wyjściu prostownika tyrystorowego poniżej pewnej wartości progowej U_d (rys. 6) łuk gaśnie a przy następnym pulsie zasilania nie następuje ponowny zapłon łuku. W ten sposób pojawiła się trzecia faza procesu spawania, tj. stan jałowy. Proces spawania przebiega w dalszym ciągu cyklicznie [3, 4], jednakże występuje duża ilość rozprysków metalu a uzyskane połączenie jest złej jakości. Proces taki określany jest jako niestabilny. Przy innych metodach spawania problem ten rozwiązywany jest przez zastosowanie odpowiednio dużej indukcyjności w obwodzie spawalniczym. Jednakże przy spawaniu łukiem zwarciovym indukcyjność jest ściśle określona przez dynamikę przebiegów zwarciovych i jest wielokrotnie mniejsza od wartości wymaganej do uży-

skania odpowiedniego współczynnika filtracji. Prawidłowy wybór zasilacza sterowanego fazowo dla uzyskania stabilnego procesu spawania łukiem zwarciowym wymaga zatem poznania podstawowych parametrów przestrzeni międzyelektrodowej, którymi są:

- rezystancja przestrzeni międzyelektrodowej w czasie wyładowania łukowego i jej zależność od prądu łuku oraz rezystancja i moc w czasie zwarcia,
- napięcia przyelektrodowe U_a , U_k lub suma tych napięć U_{ak} ,
- graniczne napięcie łuku U_g i prąd graniczny I_g oraz moc graniczna $P_g = U_g I_g$. Są to wartości napięcia i prądu w obwodzie, przy których następuje gaśnięcie łuku,
- napięcie progowe zasilania przestrzeni międzyelektrodowej U_d . Jest to wartość minimalna napięcia resztkowego, przy zasilaniu obwodu spawalniczego z prostownika tyrystorowego sześciopulsowego. Po obniżeniu się napięcia zasilania poniżej tej wartości nie nastąpi już ponowny zapłon łuku po zakończeniu przez tyrystory następnego pulsu napięcia o wartości większej od napięcia granicznego U_g ,
- czas dejonizacji przestrzeni międzyelektrodowej względnie czas ponownego zapłonu. Jest to czas jaki upływa od chwili osiągnięcia przez napięcie zasilania wartości mniejszej od napięcia granicznego U_g , do chwili osiągnięcia przez przestrzeń takiego stanu energetycznego, przy którym powrót napięcia występującego w obwodzie spawalniczym o wartości większej od granicznego nie spowoduje już ponownego zapłonu łuku.



Rys. 3. Oscylogram przebiegów czasowych przy niestabilnym procesie spawania: a - mocy; b - prąd; c - napięcia, U_0 - napięcie stanu jałowego, U_g - napięcia mostka zwierającego elektrody, U_1 - napięcie łuku, U_g - graniczna wartość napięcia

2. WYZNACZENIE REZYSTANCJI ŁUKU W FUNKCJI PRĄDU

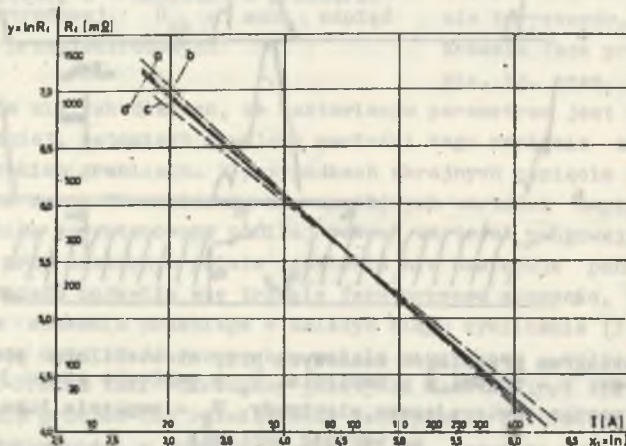
Zależność rezystancji łuku w funkcji prądu wyznaczono doświadczalnie [4]. W tym celu wykonano szereg równoczesnych pomiarów wartości chwilowych napięcia łuku i prądu w obwodzie przy różnych parametrach spawania i przy średnicach drutu elektrodowego 0,8; 1,2 i 1,6 mm. Do pomiarów zastosowano opracowany w Instytucie Spawalnictwa rejestrator mikrokomputerowy [9] o częstotliwości pomiarów 2 i 10 kHz. Pamięć rejestratora umożliwiła zarejestrowanie 256 par wyników podczas jednej próby spawania. Dla każdej elektrody wykonano po dziesięć prób uzyskując przy dwóch zestawach parametrów 2560 par wyników dla każdej średnicy elektrody. Do analizy wybrano losowo dwa razy po 60 wyników dla każdej średnicy elektrody.

Na podstawie oceny uzyskanych wyników badań założono prawdopodobne przybliżenie zależności $R_2 = f(I_2)$ jako funkcję potęgową w postaci:

$$R_2 = \alpha I_2^\beta \quad (1)$$

gdzie: α i β - współczynniki.

Współczynniki α i β równania (1) znaleziono po zlogarytmowaniu tego równania w celu dojścia do postaci liniowej, a następnie wychodząc z zasady minimum sumy odchylenia kwadratowego znaleziono współczynniki tego równania liniowego.



Rys. 4. Wykresy uśrednionych zależności rezystancji łuku w funkcji prądu przy spawaniu elektrodami o średnicach: a - 0,8 mm, b - 1,2 mm, c - 1,6 mm, d - zależność wypadkowa

Równanie (1) dla elektrody o średnicy 0,8 mm ma ostateczną postać:

$$R_2 = 16,2 I_2^{-0,9} \quad (2)$$

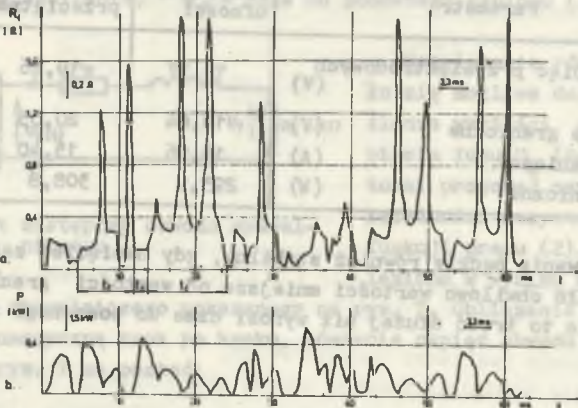
w przedziale $15 < I_2 < 500A$.

Po uśrednieniu wyników uzyskanych przy zastosowaniu elektrod o średnicach 0,8; 1,2 i 1,6 mm zależność wypadkowa $R_2 = f(I_2)$ ma postać

$$R_2 = 14,8 I_2^{-0,88} \quad (3)$$

w przedziale $70 < I_2 < 500A$.

Wykresy zależności $R_2 = f(I_2)$ dla wymienionych elektrod oraz zależności wypadkowe pokazane są na rys. 4, a przebieg czasowy rezystancji i mocy przestrzeni międzyelektrodowej dla elektrody 0,8 mm pokazany jest na rys. 5.



Rys. 5. Oscylogram przebiegów czasowych: a - rezystancji, b - mocy, przestrzeni międzyelektrodowej przy spawaniu łukiem zwarciovym zasilanym z prostownika tyrystorowego, t_1 - czas wyładowania łukowego, t_2 - czas zwarcia

3. WYZNACZENIE WARTOŚCI GRANICZNYCH PARAMETRÓW ŁUKU ORAZ SUMY NAPIĘĆ PRZYELEKTRODOWYCH

Wartości graniczne parametrów łuku w przestrzeni międzyelektrodowej wyznaczono za pomocą oscyloskopu z pamięcią odczytując wartości napięcia U_g i prądu I_g w chwili gaśnięcia łuku na ekranie oscyloskopu (rys. 3) [4]. Pomiar sumy napięć przyelektrodowych U_{ak} wykonano również za pomocą oscyloskopu z pamięcią. Warunkiem pomiaru U_{ak} jest stabilny przebieg procesu spawania. Jako wynik odczytano różnicę napięcia łuku tuż przed zwarcie oraz na mostku zwierającym elektrody tuż po zwarcie (rys. 2). Wartości przeciętne i przedziały ufności z wykonanej serii pomiarów oszacowano stosując twierdze-

nie i rozkład Studenta. Wyniki badań zestawiono w tabeli 1. W wyniku badań stwierdzono, że wartość graniczna U_g napięcia łuku, przy której następuje zgaśnięcie łuku jest większa od sumy napięć przyelektrodowych U_{ak} a proces spawania łukiem zwarciovym jest stabilny w fazie wyładowania łukowego (tzn. łuk nie gaśnie), jeżeli napięcie zasilania $U_z(I_g)$ jest większe od wartości granicznej U_g

$$U_z(I_g) > U_g > U_{ak} \quad (4)$$

Tabela 1

Zestawienie przeciętnych wartości
i przedziałów ufności wartości granicznych parametrów łuku U_g , I_g , P_g
oraz sumy napięć U_{ak}

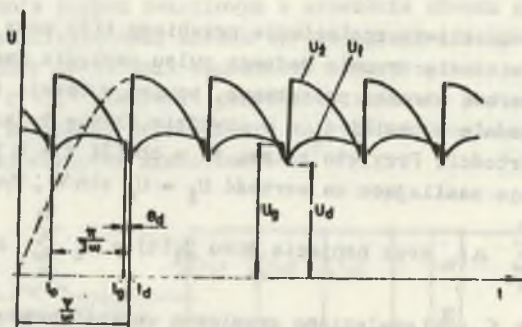
	Parametr	Przedział ufności	Wartość przeciętna	Przedział ufności
1	Suma napięć przyelektrodowych U_{ak} (V)	19,17	19,66	20,15
2	Napięcie graniczne (V)	19,64	20,05	20,46
3	Prąd graniczny (A)	14,96	15,40	15,82
4	Moc graniczna (W)	293,9	308,8	323,7

Proces spawania będzie również stabilny, gdy napięcie zasilania $U_z(I_g)$ będzie osiągało chwilowo wartości mniejsze od wartości granicznej U_g , jednakże nie może to trwać dłużej niż wynosi czas do ponownego zapłonu Θ_d .

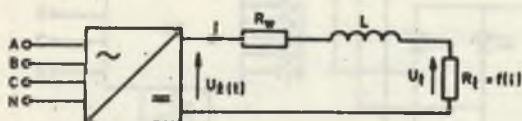
4. WYZNACZENIE CZASU DEJONIZACJI PRZESTRZENI MIĘDZYELEKTRODOWEJ

Czas dejonizacji przestrzeni międzyelektrodowej lub czas do ponownego zapłonu łuku w osłonie CO_2 Θ_d , przy zasilaniu z prostownika tyrystorowego sześciopulsowego, jest liczony od chwili t_g , w której napięcie łuku U_z osiąga wartość graniczną U_g a łuk gaśnie, do chwili t_d , w której napięcie zasilania U_z osiąga wartość progową U_d a załączone przez tyrystory w chwili t_d napięcie zasilające większe od granicznego nie powoduje już ponownego zapłonu łuku bez zwarcia elektrod (rys. 6) [4]. Przy zasilaniu z prostownika tyrystorowego sześciopulsowego czas dejonizacji wynosi:

$$\Theta_d = \frac{\pi}{3\omega} - t_g \quad (5)$$



Rys. 6. Przebieg graniczny napięcia wyprostowanego; U_z , napięcie źródła, U_1 - napięcie łuku, U_g - wartość graniczna napięcia łuku, U_d - wartość progowa napięcia zasilania, θ_d - czas do ponownego zapłonu (dejonizacji)



Rys. 7. Schemat zastępczy obwodu spawalniczego

Rozwiązanie równania (5) stało się możliwe dopiero od określenia wartości granicznej napięcia łuku U_g (tabl. 1), wartości progowej napięcia U_d oraz zależności rezystancji łuku w funkcji prądu (2). Czas t_g znaleziono w wyniku analizy nieliniowego

obwodu spawalniczego pokazanego na rys. 7. Obliczenia wykonano stosując metodę numeryczną krok po kroku. Równanie napięć obwodu spawalniczego pokazanego na rys. 7 ma postać:

$$U_z(t) = i(t) R_w + i(t) R_z + \frac{di(t)}{dt} L \quad (6)$$

stąd:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{U_z(t) - i(t) R_w - i(t) R_z}{L} \quad (7)$$

Przyjmując skończenie małe przyrosty czasu określono z równania przyrosty prądu Δi_n

$$i_n = \frac{U_m \sin(\omega n \Delta t + \psi) - R_w \sum_{1}^{n-1} \Delta i_n - R_z \sum_{1}^{n-1} \Delta i_n}{L} t \quad (8)$$

Równanie (8) umożliwia znalezienie przebiegu $i(t)$ oraz przebiegu napięcia łuku $U_x(t)$ w czasie trwania jednego pulsu napięcia zasilania. Do obliczeń przyjęto zerowe warunki początkowe, bowiem w czasie trwania poprzedniego pulsu łuk gaśnie w chwili t_g a w obwodzie płynie tylko prąd połączkowy o bardzo małej wartości. Przyjęto zatem, że w chwili $t = 0$ prąd w obwodzie $i = 0$, a napięcie zasilające ma wartość $U_z = U_m \sin \psi$. Wyznaczając przebieg

$$\text{prądu } i(t) = \sum_1^n \Delta i_n \text{ oraz napięcia łuku } U_x(t) = R_x \sum_1^n \Delta i_n \text{ w przedziale}$$

czasowym $0 < t < \frac{\pi}{3\omega}$ znaleziono graniczną wartość prądu i_g , przy której napięcie łuku ma wartość graniczną U_g . Czas, po którym napięcie łuku osiąga wartość U_g jest poszukiwanym czasem t_g . Wyliczony z równania (5) czas dejonizacji przestrzeni międzyelektrodowej wynosi $\Theta_d = 83 \mu s$. Jest on mniejszy od termicznych stałych czasowych łuku spotykanych w literaturze [8,10], które wynoszą 100- 200 μs .

5. PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ

Uzyskane wyniki badań mają duże znaczenie dla dalszego rozwoju procesu spawania łukiem zwarciovym. Rozwój ten będzie się odbywał w najbliższym czasie przez:

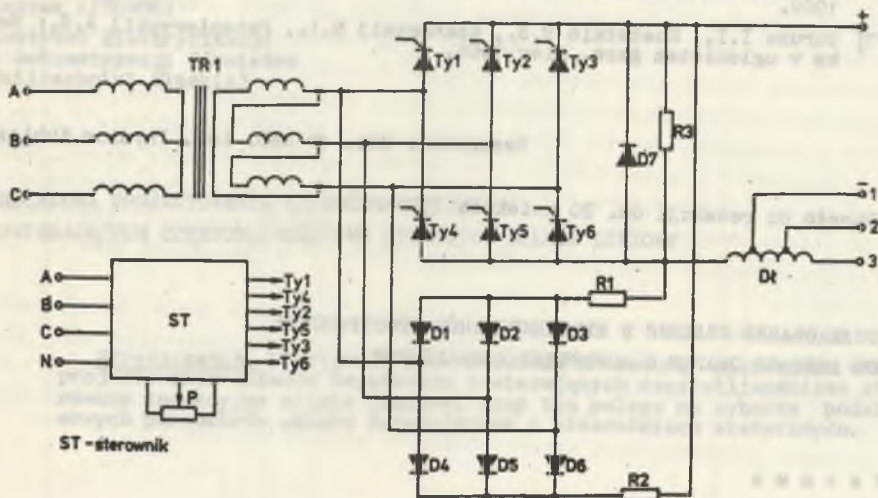
- uproszczenie zasilaczy tyrystorowych,
- optymalizację doboru parametrów obwodu spawalniczego i procesu spawania,
- zastosowanie systemów mikrokomputerowych do sterowania ilością energii dostarczanej w poszczególnych fazach procesu spawania.

Wyniki badań przestrzeni międzyelektrodowej umożliwiły poszerzenie wiedzy o procesie spawania łukiem zwarciovym, jako odbiorniku energii elektrycznej i ewentualnym obieku regulacji przez:

- poznanie charakteru zmian rezystancji zjonizowanej przestrzeni międzyelektrodowej w funkcji prądu płynącego w obwodzie, w warunkach rzeczywistych procesu spawania,
- poznanie warunku stabilności procesu spawania w fazie wyładowania łukowego przy zasilaniu napięciem sterowanym fazowo,
- poznanie wartości granicznych parametrów wyładowania łukowego w osłonie dwutlenku węgla. Są to wartości, poniżej których następuje dejonizacja i zanik przewodności przestrzeni międzyelektrodowej.

Stwierdzono, że parametrami granicznymi łuku w osłonie CO_2 są: napięcie zasilania przestrzeni międzyelektrodowej U_g o wartości 20V i prąd graniczny I_g o wartości 14,5A. Wykorzystując wyniki badań zoptymalizowano zasilacz

tyrystorowy do spawania łukiem zwarciovym o schemacie obwodu głównego pokazanym na rys. 8. W zasilaczu tym, oprócz tyrystorowego prostownika głównego, zastosowano diodowy prostownik pomocniczy o mocy ograniczonej przy pomocy rezystorów R_1 i R_2 . Prostownik pomocniczy zapewnia podtrzymanie procesów jonizacyjnych w czasie, gdy napięcie na wyjściu prostownika tyrystorowego maleje poniżej wartości granicznej.



Rys. 8. Schemat zasilacza tyrystorowego

LITERATURA

- [1] Clymans J.: Recherche sur l'appartition du collage lors du soudage sous CO_2 . Revue de la Soudure, nr 4 1977.
- [2] Dobał E.: Zastosowanie tyrystorów w źródłach prądu do spawania. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa nr 67, 1976.
- [3] Dobał E.: Nowe źródła prądu do zautomatyzowanego spawania elektrodami topliwymi w atmosferach ochronnych. Przegląd Spawalnictwa nr 2, 1980.
- [4] Dobał E.: Analiza elektrycznego obwodu spawalniczego przy tyrystorowym sterowaniu procesem spawania w atmosferze dwutlenku węgla. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska, 1982.
- [5] Dobał E., Zaremba T., Czyłok K., Wypiór W., Lewandowski W.: Prostownik tyrystorowy do zasilania łuku spawalniczego w atmosferach ochronnych. Patent nr 118 668. Urząd Patentowy PRL.
- [6] Leskov G.I.: Električeskaja svaročnaja duga. Moskva 1970.
- [7] Niedham J.C.: New-generation maters track Weld parameters. Welding Designing Fabrication, October 1980.

- [8] Schellhase M.: Matematičeskaja model perehodnycn procesov i svaročnoj dugle i ee issledovanie. Avt. Svarka nr 7, 1977.
- [9] Szebeszczyk T., Fabian T.: Zastosowanie mikrokomputerów i mikroprocesorów do badania procesów spawalniczych. Referat wygłoszony na Kongresie Spawalnictwa "Welding 82" Brno 1982.
- [10] Weinschek H.E., Schellhase M.: Einige Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von Kriterien für das Brennstabilitätsverhalten von Schweisslichtbögen. Wissenschaftliche Zeitschrift der T.H. Heft 7, Magdeburg 1969.
- [11] Zaruba I.I., Kostatkin B.S., Kocharskij N.I., Potapiervskij A.G.: Svarka v uglekistem gaze. Kiev 1966.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Irydion Kubiszyn

Wpłynęło do redakcji dn. 20 kwietnia 1984 r.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ В МЕЖЭЛЕКТРОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ
ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ С КОРОТКИМИ ЗАМЫКАНИЯМИ

Р е з ю м е

В статье представлены результаты исследования протекания во времени сопротивления межэлектродного пространства во время дугового разряда в среде CO_2 , предельных параметров дугового разряда определяющих условие стабильности дуги и времени до последующего зажигания дуги. Полученные результаты были использованы при разработке тиристорного выпрямителя для дуговой сварки с короткими замыканиями.

INVESTIGATION OF ARC SPACE PHENOMENA IN DIP TRANSFER WELDING

S u m m a r y

The test results of changes of arc space resistance during arc discharge in CO_2 , those of limit parameters of arc discharge determining the arc stability condition as well as those of arc re-initiation time are presented. The obtained results have been used in the selection of thyristor rectifier for energizing the dip transfer welding process.