ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1969

Seria: MECHANIKA z. 39 Nr kol. 258

JAN WĘGRZYN
Katedra Spawalnictwa

ŁUK ELEKTROD OTULONYCH (EMISJA ELEKTRONÓW I PRZENOSZENIE MATERIAŁÓW W ŁUKU)

Streszczenie: Jest to próba teoretycznej analizy sił i czynników wpływających na emisję elektronów i przenoszenie materiałów w łuku elektrod otulonych. Gazowe reakcje metalurgiczne w topiącym się metalu elektrody oraz procesy gazowe w topiącej się otulinie mogą mieć decydujący wpływ na sposób topienia się elektrody, transport materii w łuku oraz emisję elektronów. Temperatura i ciśnienie w pobliżu topiącej się elektrody jest zapewne większe niż w pobliżu materiału rodzimego, niezależnie od rodzaju prądu i biegunowości i decydować to też może o przenoszeniu materii w łuku elektrod otulonych. Zjawisko to istotniejsze jest jednak zapewne dla innych łuków spawalniczych, szczególnie o dużej gęstości prądu jak np. przy spawaniu metodą MIG i w CO_2.

1. WSTĘP

Żadne z zagadnień spawalnictwa nie jest tak dyskusyjne i niedostatecznie wyjaśnione jak zagadnienia łuku spawalniczego.

Stosunkowo najlepiej poznane są procesy występujące w czasie jarzenia łuku jako zjawiska czysto elektrycznego, gdy jak zwykle w tym przypadku katodę i anodę stanowią tworzywa nie topiące się a więc np. elektrody węglowe, grafitowe, wolframowe. Natomiast w technice spawalniczej procesy związane z jarzeniem łuku i jego właściwościami są mniej poznane i znacznie trudniejsze do wyjaśnienia, ponieważ zjawisku emisji elektronów towarzyszą równocześnie procesy takie jak przenoszenie metalu i żużla, tworzenia się plazmy, występowanie różnych reakcji fizykochemicznych, metalurgicznych, elektroenergetycznych, a które z kolei wpływają na procesy emisji katodowej, ułatwiając a czasem utrudniając ją.

Spawalnikom dobrze znany jest wpływ rodzaju prądu i biegunowości elektrody na proces spawania. W procesie spawania aluminium metodą TIG np. właściwym jest prąd zmienny, natomiast w procesie spawania aluminium również w atmosferze argonu, ale metodą MIG bardziej prawidłowym jest prąd stały i załączenie elektrody do bieguna dodatniego. Podobnie postępuje się przy spawaniu metodą MIG innych metali. Prawdopodobnie jeszcze bardziej złożona sytuacja jest przy spawaniu elektrodami otulonymi. Wytrawny nawet spawalnik zastosowuje się biernie do zaleceń wytwórcy załączając zgodnie z instrukcją elektrodę do bieguna ujemnego lub dodatniego i nie analizując przyczyn tego. Większość stalowych elektrod kwaśnych, rutylowych, celulozowych i im podobnych załącza się do bieguna ujemnego albo stapia się je prądem zmiennym. Natomiast większość elektrod zasadowych załącza się do bieguna dodatniego, chociaż ostatnio znane są również elektrody do spawania prądem zmiennym. Korzystniejsze stapianie się elektrod kwaśnych i rutylowych po załączeniu ich do bieguna ujemnego a elektrod zasadowych do bieguna dodatniego zostało ustalone na drodze doświadczeń i prawdopodobnie zagadnienia te nie są jeszcze dokładnie poznane mimo, że stanowią one przedmiot dużych zainteresowań specjalistów zatrudnionych przy opracowaniu elektrod i różnych innych materiałów spawalniczych. Ten duży wpływ biegunowości jest zapewne mniej istotny przy spawaniu elektrodami o otulinach składających się przeważnie z różnych tlenków, a więc otulin kwaśnych, rutylowych i im podobnych. Natomiast przy spawaniu elektrodami o otulinach zawierających oprócz tlenków różne fluorki, wpływ rodzaju prądu i biegunowości może decydować o możliwości spawania.

Mało spawalników może wie, że po załączeniu do bieguna ujemnego elektrody aluminiowej, której otulina jak zwykle składa się z fluorków i chlorków, nie można praktycznie uzyskać spoiny, ponieważ metal topiącej się elektrody wyrzucany jest poza łuk i jeziorko. Natomiast po załączeniu tej samej elektrody do bieguna dodatniego uzyskuje się prawidłową spoinę.

Podobny przypadek może mieć miejsce przy spawaniu innymi elektrodami metalowymi o otulinach zawierających znaczne ilości fluorków.

Również nie wyjaśnione jest jeszcze dostatecznie zjawisko łuku elektrod głęboko wtapiających. Elektroda głęboko wtapiająca ujawnia przeważnie dwukrotnie większe napięcie łuku w porównaniu ze zwykłą elektrodą i prawie niezależnie od tego, do jakiego źródła prądu jest załączona. Również i w tym przypadku skład otuliny wpływa na napięcie łuku i kieruje procesem emisji elektronów i przemieszczaniem się kropel metalu, żużla i tzw. plazmy.

Często wydaje się, że nawet znane już od dawna siły i różne czynniki sprzyjające przenoszeniu kropel z elektrody do jeziorka jak pinch efekt, siła Lorentza, działanie plazmy, czy ciśnienie magnetyczne w różnych procesach spawania łukowego mogą mieć różny i trudny do określenia wpływ, a szczególnie przy spawaniu otulonymi elektrodami. Próba wyjaśnienia niektórych z poruszonych tu zjawisk będzie przedmiotem niniejszego artykułu.

2. ANALIZA SIŁ DZIAŁAJĄCYCH W ŁUKU

W łuku dokonuje się równocześnie emisja elektronów, topienie, podgrzewanie i przenoszenie materiałów. Różne siły i różne inne czynniki biorące udział w tych procesach łuku elektrod otulonych można podzielić oddzielnie na czynniki i siły mające wpływ na emisję elektronów oraz na przenoszenie materiałów w łuku. Procesy emisji elektronów uzależnia się od:

a. Natężenia pola elektrycznego i temperatury łuku,

b. Procesów jonizacji.

Natomiast przenoszenie materiału w łuku uważa się, iż zależy od:

a. Sił grawitacji,

b. Pinch efektu (działanie ściskające),

c. Siły Lorentza,

d. Ciśnienia magnetycznego,

e. Działania plazmy.

Natężenie pola elektrycznego i temperatura łuku. Gęstości prądu stosowane przy łukowym spawaniu otulonymi elektrodami nie są duże. W tych warunkach i natężenie pola elektrycznego w pobliżu katody jest zbyt małe, ażeby mogła nastąpić emisja elektronów (uważa się, że natężenie pola potrzebnego do spowodowania emisji powinno wynosić ok. 10^6 V/cm).

Emisji elektronów sprzyja więc w tych warunkach wysoka temperatura katody, czyli występuje cieplna emisja katodowa, którą zgodnie z równaniem Richardsona przedstawia się wzorem:

$$J = AT^2 e^{\frac{E.L}{KT}}, \qquad (1)$$

gdzie:

A - stała, zależna od rodzaju metalu katody,
T - temperatura w stopniach Kelwina,
e - podstawa logarytmu naturalnego,
E - wielkość ładunku elektrycznego,
L - praca wyjścia elektronu z katody,
K - stała Boltzmanna.

Ażeby osiągnąć gęstości prądu, jakie stosowane są przy spawaniu otulonymi elektrodami, temperatura katody powinna wynosić zgodnie z równaniem Richardsona, ponad 3000°C.

Wynika z tego, że przy łukowym spawaniu tylko elektrody wolframowe lub molibdenowe mogłyby topiąc się emitować elektrony. W praktyce spawalniczej jednak nie tylko elektrody stalowe lecz również i aluminiowe, a więc z metali o znacznie niższej temperaturze topnienia, zapewniają prawidłową emisję elektronów. Natomiast elektrody wolframowe przeważnie nie topią się w łuku. Prawdopodobnie więc powierzchnia katody osiąga znacznie większe temperatury od topienia technicznych metali i bardzo prawdopodobne jest, że temperatura ta jest bliska wrzenia danego metalu. Zapewne istnieje wzajemne współdziała-

nie pola elektrycznego i wysokiej temperatury w emitowaniu elektronów. Uważa się, że natężenie pola w pobliżu katody przy spawaniu elektrodami otulonymi nie jest na ogół większe niż 10^{-4} V/cm [1].

W tych więc warunkach mogą tworzyć się małe plamki katodowe o powierzchni dziesiętnych części milimetra, które emitują elektrony o gęstości dochodzącej do 10^7 A/cm^2. W tych miejscach natężenie pola może wynosić nawet wymagane 10^6 V/cm i dokonuje się to w myśl tzw. zasady minimum.

Procesy jonizacji w łuku. Dużym ułatwieniem dla emisji elektronów jest obecność zjonizowanych cząsteczek w łuku. Jednym z zadań otuliny elektrod jest poprawienie przewodności łuku przez wytworzenie w nim zjonizowanych cząsteczek. Nie wszystkie otuliny w jednakowym stopniu jonizują łuk. Najlepsze właściwości jonizacyjne ma łuk elektrod posiadających w otulinie dużą ilość związków potasu, ponieważ potas posiada najniższy potencjał jonizacyjny spośród pierwiastków występujących zwykle w składnikach otulin. Potencjały jonizacyjne ważniejszych pierwiastków i związków mogących istnieć w łuku elektrod otulonych podane są w tablicy 1.

Tablica 1

Potencjały pierwszego stopnia jonizacji niektórych pierwiastków i związków (V)

K	4,34	O	13,5
Na	5,14	H	13,5
Ca	6,11	CO	14,1
Ti	6,84	CO_2	14,3
Fe	7,83	N	14,5
Si	8,15	H_2	15,4
NO	9,6	N_2	15,6
O_2	12,5	Ar	15,7
H_2O	13,2	F	18,6
Cl_2	13,5	Ne	21,5
		He	24,5

Potencjał jonizacyjny mieszaniny gazów i par w łuku zależy w dużej mierze od składnika o najniższym potencjale jonizacji. Im niższy potencjał jonizacyjny posiada mieszanina par i gazów w łuku, tym niższe jest napięcie łuku, ponieważ katodowy spadek napięcia jest proporcjonalny do energii pochłanianej przez procesy jonizacji. Napięcie łuku elektrod z otuliną zawierającą dużo związków bogatych w potas jest więc najmniejsze. Jednak ważną rzeczą przy tym jest, aby związki potasu stanowiły wtedy np. tlenki, krzemiany, a więc połączenia tlenowe, a nie fluorowe lub chlorowe, ponieważ fluor i chlor mogą w określonych warunkach dejonizować łuk.

Panuje pogląd, że w łuku istnieją kationy K^+, Na^+, które decydująco obniżają potencjał jonizacyjny atmosfery łuku. W otulinach elektrod, potas i sód występują przeważnie w postaci K_2O i Na_2O jako składniki różnych złożonych krzemianów lub glinokrzemianów. Elektrody mające otulinę z przewagą K_2O (szkło potasowe) przeznaczone są często do spawania prądem zmiennym, ponieważ lepiej jonizują łuk. Energia swobodna K_2O i Na_2O jest tak duża, iż trudno sobie wyobrazić, ażeby tlenki te mogły ulec dysocjacji cieplnej wg reakcji:

$$K_2O = 2K + O \tag{2}$$

$$Na_2O = 2Na + O, \tag{3}$$

a następnie z kolei jonizacji

$$K = K^+ + e^- \tag{4}$$

$$Na = Na^+ + e^- \tag{5}$$

Prawdopodobnie więc w łuku istnieją zjonizowane nie atomy lecz związki potasu, np. tlenki, podobnie jak np. istnieją zdysocjowane tlenki CO czy CO_2 (tablica 1).

Uwzględniając natomiast w rozważaniach teorię jonową żużli, wg której w ciekłych żużlach tlenki K_2O i Na_2O występują w postaci zdysocjowanej:

$$K_2O = 2K^+ + O^{2-} \tag{6}$$

$$Na_2O = 2Na^+ + O^{2-} \tag{7}$$

można chyba również uznać, że w wyniku parowania żużla mogą istnieć w atmosferze łuku pewne ilości kationów K^+ i Na^+.

Istnienie takich kationów nie jest wynikiem klasycznego procesu jonizacji i tworzenie się ich nie powinno decydować o wielkości katodowego spadku napięcia.

Uważa się, że w łuku prądy jonowe stanowią nieznaczną część całkowitego prądu. Zasadniczy więc prąd stanowi przepływ strumienia elektronów, a prąd jonowy stanowi przeważnie strumień kationów. Dotyczy to zwłaszcza elektrod o otulinach tlenkowych, kwaśnych, rutylowych i im podobnych. W przypadku gdy otuliny zawierają równocześnie tlenki i fluorki, mogą występować w przestrzeni łuku oprócz kationów również pewne ilości anionów, zwłaszcza anionu w postaci jonu fluoru F^-. Fluor odznacza się wysokim potencjałem jonizacji, więc nie ulega jonizacji polegającej na utracie elektronów lecz odwrotnie przyłącza elektron, ponieważ fluor ma stosunkowo duże powinowactwo elektronowe

$$F + e^- = F^-. \tag{8}$$

Również zgodnie z teorią jonową w ciekłych żużlach fluor występuje w postaci ujemnego jonu F^-.

Przy spawaniu prądem zmiennym szkodliwe działanie fluoru jest znane. Przy zmianie biegunowości prądu przemieszczają się w przeciwnych kierunkach kationy i aniony i w czasie tego przemieszczania następuje dejonizacja atmosfery łuku, np.

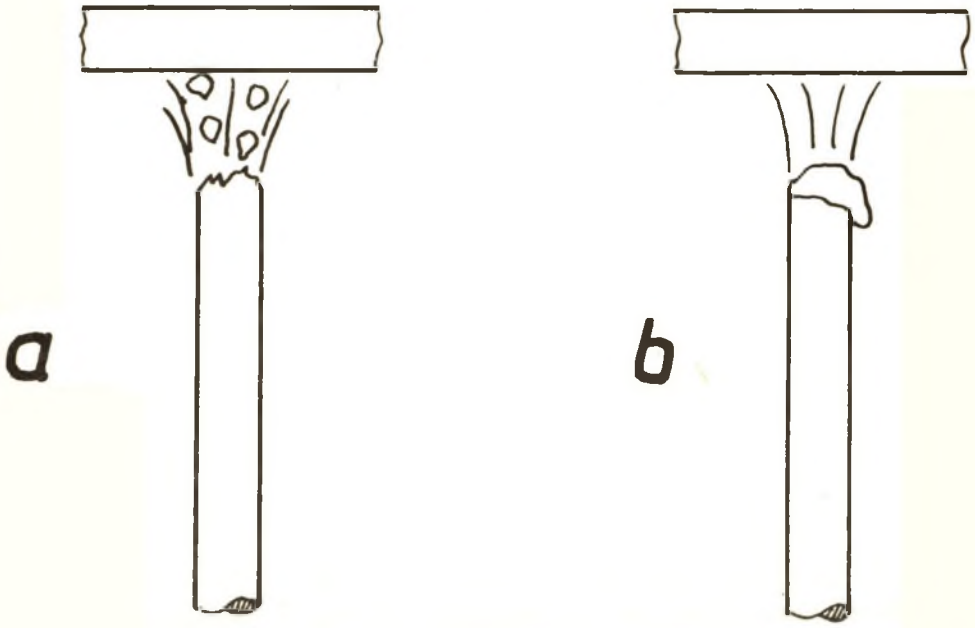
$$K^+ + F^- = KF \tag{9}$$

Natomiast przy spawaniu prądem stałym stabilność jarzenia łuku, emisja katodowa, przenoszenie materiałów w łuku i inne zjawiska zależą w decydującym stopniu od załączenia elektrody do bieguna dodatniego lub ujemnego i zagadnienia te będą szczegółowiej omówione w rozdziale dalszym. Podobnie jak fluor zachowuje się również w łuku chlor, ponieważ należąc do tej samej grupy pierwiastków chemicznych zachowuje się w reakcjach analogicznie.

Siły grawitacji w łuku. Siły grawitacji sprzyjają przenoszeniu metalu w łuku w czasie spawania w pozycji podolnej, natomiast przeciwdziałają wędrówce kropel z elektrody do spoiny przy spawaniu w pozycjach przymusowych, szczególnie przy spawaniu w pozycji sufitowej. Siły te jednak nie są duże i nie mają istotniejszego znaczenia przy spawaniu otulonymi elektrodami. Wystarczająco uzasadnia to spawanie łukowe w powietrzu gołym, niskowęglowym drutem z uspokojonej i nieuspokojonej stali. W czasie spawania w pozycji podolnej nie ma większych różnic przy spawaniu tymi drutami. Natomiast spawanie w pozycji sufitowej w powietrzu gołym drutem ze stali nieuspokojonej jest możliwe, a ze stali uspokojonej jest niemożliwe. Reakcje gazowe, zachodzące w nadtopionym końcu drutu i powodujące burzenie się nieuspokojonej stali, są wystarczająco duże dla transportu kropel w górę i siły te, jakkolwiek bardzo małe, pokonują siły grawitacji. Przy spawaniu natomiast w tych samych warunkach drutem ze stali uspokojonej łuk się wprawdzie jarzy, lecz krople nie przemieszczają się w górę w kierunku materiału. Stopiony metal na końcu elektrody spływa po elektrodzie w dół jak stopiona parafina przy paleniu się świecy (rys. 1).

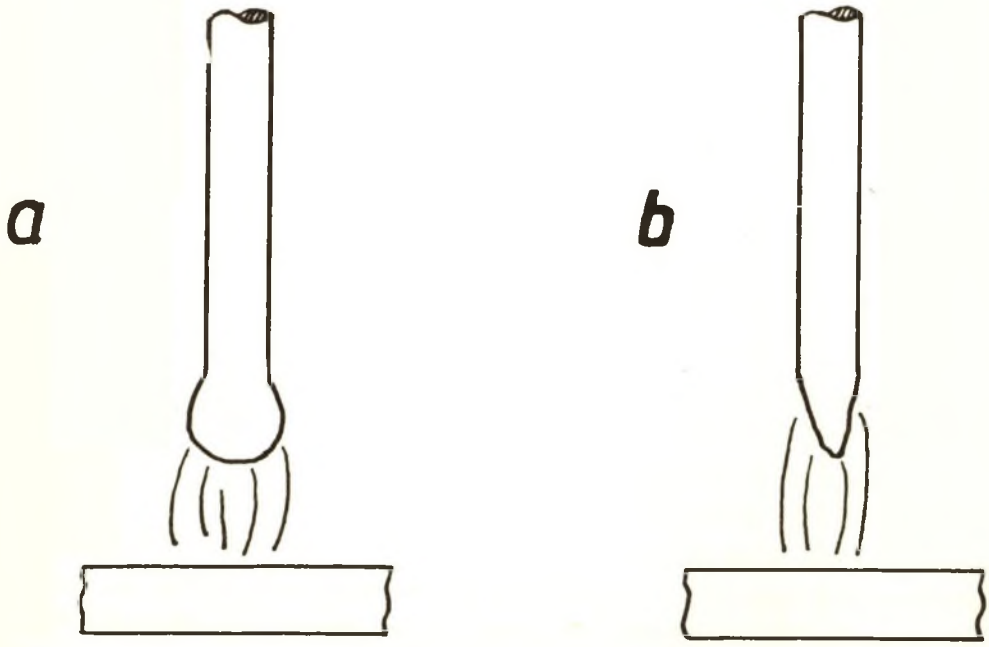
Przy spawaniu elektrodami otulonymi znaczenie sił grawitacji jest jeszcze mniejsze wobec całego szeregu czynników wpływających na transport kropli, takich jak większa gęstość prądu, wyższe temperatury w łuku, intensywniejsze reakcje gazowe.

Pinch efekt. Pinch efekt, polegający na promieniowym działaniu siły ściskającej przewodnik elektryczny i tworzący w nim tzw. szyjkę, nie wydaje się mieć żadnego istotnego znaczenia przy spawaniu elektrodami otulonymi. Samo zjawisko tworzenia



Rys. 1. Spawanie w pozycji sufitowej, w powietrzu, gołym drutem stalowym
a) nieuspokojonym, b) uspokojonym

się szyjki nie musi być wiązane z przepływem prądu przez topiącą się elektrodę. Zjawisko to wiąże się raczej z napięciem powierzchniowym topiącego się końca drutu. Napięcie powierzchniowe utrzymuje rosnącą kroplę, która starając się przyjąć najbardziej kulistą postać tworzy u góry przewężenie tzw. szyjkę. Ze wzrostem gęstości prądu siła zaciskająca powinna być coraz większa, tymczasem po przekroczeniu krytycznej gęstości prądu topienie drutów, np. w metodzie MIG, dokonuje się bez charakterystycznej szyjki rys. 2. Siły podobne do pinch efektu występują pomiędzy oddzielonymi przewodnikami w polu elektrycznym. Trudno sobie wyobrazić taką sytuację w jednorodnym przewodniku. Niemniej jednak jeżeli nawet siły takie istnieją to przy spawaniu elektrodami otulonymi nie mają one istotniejszego znaczenia i łatwo to stwierdzić obserwując nadtopione końce różnych elektrod.



Rys. 2. Topienie się drutu przy spawaniu w atmosferze gazów ochronnych
a) małym natężeniem prądu, b) dużym natężeniem prądu

Siła Lorentza. Również i ten rodzaj siły nie ma chyba istotniejszego znaczenia przy przenoszeniu kropel w łuku. Siła ta powinna działać w kierunku osiowym, ponieważ powodowana jest ona przepływem prądu, powinna więc być w pewnym stopniu uzależniona od kierunku jego przepływu. Tymczasem przyjmuje się, że działa ona zawsze w kierunku od elektrody do spawanego materiału, niezależnie od biegunowości elektrody [2]. Przyjmując nawet, że tak jest, można w łatwy sposób sprawdzić, że działanie tej siły jest niewielkie. Elektrody otulone, które przeznaczone są normalnie do spawania we wszystkich pozycjach, tracą często zdolność do spawania w pozycji sufitowej po wyprażeniu ich w temperaturze pow. ok. 700°C. Usunięcie więc gazów z otulin elektrod, czyli wyeliminowanie częściowe reakcji gazowych w ciekłym żużlu oraz reakcji pomiędzy składnikami gazowymi otuliny i ciekłym metalem, ma znacznie istotniejszy wpływ od siły Lorentza. Podobnie jak w przypadku drutów ze

stali uspokojonej i nieuspokojonej również i otuliny można podzielić na metalurgicznie i fizycznie aktywne. Otuliny zasadowe są niskowodorowe i metalurgicznie bierne w stosunku do metalu, a nawet uspakajają go krzemem.

Natomiast elektrody kwaśne, rutylowe i im podobne są wysokowodorowe i metalurgicznie aktywne w stosunku do metalu. Po wyprażeniu elektrod zasadowych pow. 700°C tracą one zupełnie zdolność do spawania w pozycji sufitowej. Elektrody kwaśne, rutylowe lub im podobne tracą tą zdolność tylko w dużym stopniu w zależności od składu otulin, ilości w nich uwodnionych glinokrzemianów i składników aktywnych w stosunku do metalu. Wyniki badań nad wpływem składu otulin na przenoszenie ciekłej materii w łuku będą przedstawione w dalszych rozdziałach.

Ciśnienie magnetyczne. Siła ta, o której mówi się obecnie, że ma duży wpływ na przenoszenie metalu przy spawaniu metodami o dużej gęstości prądu np. MIG [3], też prawdopodobnie nie ma większego znaczenia przy spawaniu elektrodami otulonymi. Wynika to stąd, że gęstości prądu przy spawaniu elektrodami otulonymi są małe, a ilości materiału do przenoszenia duże, mając na uwadze przenoszenie zarówno metalu, jak i żużla. Potwierdza to bardzo wyraźnie wspomniane już poprzednio doświadczenie przy spawaniu w pozycji sufitowej elektrodami o wyprażonych otulinach prawie wolnych od gazów. Uwzględniając, że równocześnie mogą działać siła Lorentza i ciśnienie magnetyczne, to nawet wspólne działanie tych sił nie przenosi materiału w łuku przy spawaniu w pozycji sufitowej otulonymi elektrodami wyprażonymi. W tym przypadku łączne te siły są tak małe, że nie pokonują nawet siły grawitacji. W pozycji podolnej spawanie elektrodami wyprażonymi nie przedstawia większych trudności. Przy okazji należy wspomnieć, że kierunek działania ciśnienia magnetycznego, podobnie zresztą jak i siła Lorentza, powinien być w pewnym stopniu zależny od kierunku przepływu prądu przez łuk. W praktyce nie stwierdza się tego, co może nasuwać pewne wątpliwości o skuteczności tej siły.

Działanie plazmy. Uważa się, że działanie plazmy odgrywa bardzo istotną rolę w przenoszeniu materiału w łuku [4]. Z drugiej jednak strony musi budzić się wątpliwość, dlaczego kierunek przepływu plazmy skierowany jest zawsze do materiału spawanego, niezależnie od biegunowości elektrody. Plazma, jako stan materii zawierający duże ilości jonów i elektronów, powinien przemieszczać się w określonym kierunku, uzależnionym od położenia katody i anody. Gdyby znowu posłużyć się przykładem spawania w pozycji sufitowej wyprażonymi elektrodami, to można by uznać, że działanie plazmy może mieć wpływ na przenoszenie materii ciekłej w łuku. Otuliny bez części gazowej nie tworzą bowiem dużej ilości plazmy - czynnika przenoszącego materiał ciekły w łuku. Jest to jednak stwierdzenie pozornie słuszne i próba wyjaśnienia tego będzie podana w części następnej wywodu, dotyczącego reakcji gazowych.

3. REAKCJE GAZOWE

Proces topienia się elektrod otulonych i przenoszenia materii przez łuk przypomina pod pewnymi względami wypływ z rury sprężonych gazów lub ich mieszanin, np. wylot sprężonego powietrza i piasku w czasie operacji piaskowania. W pobliżu końca topiącej się elektrody ciśnienie łuku wydaje się być znacznie większe niż w pozostałej części łuku i łuk przez to rozchyla się stożkowo w kierunku materiału spawanego. Zjawisko to jest niezależne od biegunowości elektrody. W poprzednich rozważaniach przedstawiono, że znane na ogół siły, występujące w łuku elektrycznym nie mają istotnego znaczenia przy spawaniu ręcznym. Przytoczone bowiem proste przykłady spawania gołym drutem ujawniły, że reakcje gazowe w stopionym końcu elektrody mają większy wpływ na przenoszenie metalu w łuku, niż wszystkie pozostałe siły, natomiast przy spawaniu elektrodami otulonymi tak samo ważny wpływ mają gazy zawarte w otulinach. Reakcje gazowe, decydujące o przenoszeniu materii ciekłej w łuku elektrod otulonych, można podzielić na dwa zasadnicze rodzaje:

a) reakcje w topiącym się końcu elektrody, czyli reakcje wewnątrz metalu i żużla oraz na granicy tych faz,

b) reakcje w pobliżu topiącej się elektrody.

Reakcje gazowe w topiącym się gołym drucie. Jeżeli ciekły metal jest metalurgicznie nieuspokojony, to przebiegają w nim przeważnie reakcje odtleniania i wydzielania się z niego gazów, jako produktów odtleniania lub przesycenia gazami o zmiennej rozpuszczalności z temperaturą. W nieuspokojonej niskowęglowej stali jest to przeważnie reakcja:

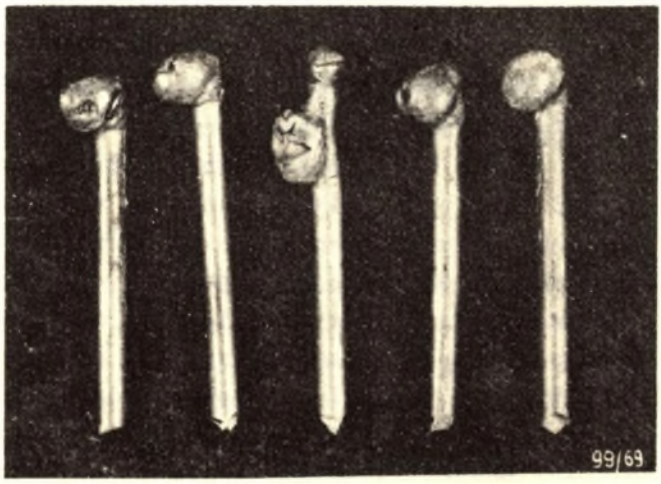
$$FeO + C = Fe + CO. \qquad (10)$$

Zarodkowanie pęcherzy odbywa się często na granicy faz stałych i ciekłych, a ulatniające się gazy porywają za sobą cząsteczki metalu. Obecność gazów w metalu powoduje jego burzenie się i gotowanie. Metal więc przy znacznie niższej temperaturze pozornie osiąga temperaturę wrzenia, co znacznie ułatwia jego transport w przymusowych pozycjach spawania. Im metal bardziej odbiega od stanu uspokojenia w pojęciu metalurgicznym, tym większe siły pomagają w jego transporcie; jest to szczególnie widoczne przy spawaniu w pozycji sufitowej, gdzie trzeba pokonać siły grawitacji. Przenoszone kropelki metalu są bardzo lekkie, ponieważ wnętrze ich jest wypełnione gazami o wysokiej temperaturze.

Krople powstające na końcu topiącego się uspokojonego drutu nie nasycają się od razu znaczną ilością tlenu i azotu, ponieważ dyfuzja tych pierwiastków nie jest bardzo duża, np. w porównaniu z wodorem. Tlen tworzy przede wszystkim warstewkę tlenków na powierzchni powstającej kropli, co wpływa w większym stopniu na wartość napięcia powierzchniowego kropli, niż na burzenie się metalu. Tlen łączy się wtedy głównie z krzemem, co ogranicza możliwość tworzenia się tlenku węgla. Natomiast przy spawaniu drutami nieuspokojonymi rozpuszczający się tlen sprzyja tej reakcji i burzeniu się metalu. Rozpuszczający się azot nie powoduje znacznego burzenia się topiącego się drutu,

ponieważ ma on dość dużą rozpuszczalność oraz bardzo ograniczone możliwości reagowania w ciekłym metalu.

Próby ręcznego spawania w pozycji sufitowej w powietrzu gołymi drutami ze stali nieuspokojonej i uspokojonej potwierdziły, że w łuku o małej mocy możliwy jest tylko transport kropli z nieuspokojonych drutów (tablica 2).
Końce drutów ze stali uspokojonej nadtopione przy łukowym spawaniu w powietrzu w pozycji sufitowej przedstawiono na (rysunku 3).



Rys. 3. Końce drutów ze stali uspokojonej, stapianych łukowo w pozycji sufitowej, w powietrzu

Reakcje gazowe w topiącym się drucie elektrod otulonych. Niskowęglowe stalowe elektrody otulone wykonuje się przeważnie z drutów nieuspokojonych, a elektrody wysokostopowe z drutów uspokojonych. Przy topieniu się elektrod otulonych reakcje gazowe, przebiegające w topiącym się rdzeniu elektrod, podobne są jak przy spawaniu gołymi drutami w powietrzu. Reakcje te potęgowane są przeważnie przenikaniem wodoru do kropel oraz tlenu. Szczególnie przy spawaniu elektrodami kwaśnymi, rutylowymi i im podobnymi, znaczne ilości wodoru, a czasem i tlenu, przenikają do topiącego się końca drutów rdzeniowych.

Tablica 2

Wpływ rodzaju i składu chemicznego drutów na transport metalu w łuku (spawano w pozycji sufitowej w powietrzu gołymi drutami o średnicy 3,25 mm natężeniem prądu ok. 90 A)

Rodzaj drutu	Skład chemiczny %%							Transport w łuku
	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	
nieuspokojony niskowęglowy	0,09	śl.	0,68			0,027	0,024	jest
niskowęglowy nieuspokojony	0,07	śl.	0,47			0,035	0,028	jest
niskostopowy uspokojony	0,11	0,83	1,52			0,018	0,021	nie ma
niskostopowy uspokojony	0,28	0,59	1,12	1,24		0,031	0,023	nie ma
wysokostopowy uspokojony	0,07	0,52	1,38	19,12	9,45	0,021	0,027	nie ma

Zwiększa to stan nieuspokojenia stali zgodnie z reakcją (10) oraz reakcją

$$FeO + 2H = Fe + H_2O \qquad (11)$$

Reakcje te ułatwiają transport ciekłej materii w łuku. Przy spawaniu elektrodami zasadowymi mała ilość wodoru (elektrody niskowodorowe) przenika do topiącego się końca elektrod, a ponadto przenikać tam może i krzem, który uspokaja metalurgicznie metal. Stąd też elektrody te topią się między innymi dlatego grubokroplowo. Po wyprażeniu tych elektrod, nie stwierdza się transportu fazy ciekłej przy spawaniu w pozycji sufitowej.

Reakcje gazowe w topiącej się otulinie. Reakcje związane z wydzielaniem się gazów mogą mieć miejsce nie tylko w ciekłym metalu, lecz również w żużlu oraz na granicy tych faz. Otuliny elektrod zawierają różne ilości uwodnionych glinokrzemianów i wilgoci. Część wody z dodawanego do masy otulinowej szkła wodnego zostaje też związana w trwałą postać krystalizacyjną po wyprasowaniu elektrod. Ten proces wiązania wody podobny jest częściowo do procesu wiązania wody w różnych cementach. Proces topienia otulin elektrod jest przeważnie szybszy niż odgazowanie otulin. Dlatego też z topiącej otuliny wydzielają się znaczne ilości gazów, co powoduje burzenie się i wrzenie topiącego żużla i ułatwia transport ciekłej fazy przy spawaniu szczególnie w pozycjach sufitowych i podobnych. Im większa jest zawartość wody krystalizacyjnej w otulinach elektrod oraz im trwalej jest ona związana, tym intensywniej burzy się tworzący się z niej żużel.

Badano elektrody o różnych otulinach standardowych i eksperymentalnych dla określenia wpływu zawartości w nich wody krystalizacyjnej i wilgoci na transport metalu w łuku oraz sposób topienia się elektrod. Orientacyjne składy otulin podano w tablicy 3.

Tablica 3

Składy otulin eksperymentalnych i standardowych
(średnica elektrod ϕ 4 mm)

A. Otuliny elektrod eksperymentalnych (masa sucha bez szkła wodnego)

Skład otuliny	1	2	3	4	5	6	7
Tlenek glinu	45	45		45	45		
Dwutlenek krzemu, SiO_2	45		45	45	45	40	
Dwutlenek tytanu TiO_2		45	45			40	30
Kreda, $CaCO_3$				10			
Magnezyt, $MgCO_3$							40
Kaolin						20	
Talk					10		
Fluoryt	10	10	10				30

B. Otuliny elektrod standardowych (masa sucha bez szkła wodnego)

Elektroda kwaśna EP52-28: rudy Fe ok. 15%, rutyl ok. 20%, glinokrzemiany ok. 30%, węglany Ca+Mg ok. 20%, Fe-Mn ok. 15%.

Elektroda rutylowa EP47-28: rutyl ok. 40%, glinokrzemiany ok. 20%, węglany Ca+Mg ok. 15%, Fe-Mn ok. 15%, reszta inne.

Elektroda zasadowa EP49-29: węglany wapnia 35%, fluoryt ok. 20%, proszek Fe i żelazostopy ok. 40%, reszta inne.

Stwierdzono, że ze wzrostem zawartości wody krystalizacyjnej w otulinach transport materii ciekłej w pozycji sufitowej jest łatwiejszy, a topienie elektrod bardziej natryskowe.

Elektrody zasadowe, suszone po wyprasowaniu tylko przy temperaturze otoczenia, topią się natryskowo jak elektrody kwaśne, a po suszeniu w temperaturze pow. 300°C elektrody te topią się kroplowo. Po wyprażeniu elektrod zasadowych powyżej 700°C spawanie w pozycji sufitowej jest niemożliwe.

Otuliny elektrod kwaśnych, rutylowych i podobnych zawierają większe ilości wody krystalizacyjnej i trwalej związanej, niż elektrod zasadowych, ponieważ otuliny kwaśne są bardziej zbliżone swoimi właściwościami do cementów. Żużel z tych otulin bardziej też burzy się przy topieniu. Przy prażeniu otuliny elektrod kwaśnych i rutylowych zatrzymują pewne ilości wody krystalizacyjnej, przez co nawet po wyprażeniu w 700°C możliwy jest czasem jeszcze transport materii ciekłej w pozycji sufitowej.

Elektrody te prażone w 700°C bezpośrednio po wyprasowaniu tracą jednak zdolność do spawania w pozycji sufitowej, ponieważ woda ze szkła wodnego dodawanego do masy przy prasowaniu elektrod nie zdążyła przemienić się w krystalizacyjną i została całkowicie wydzielona przez prażenie.

Przez zanurzenie wyprażonych elektrod do wody otuliny ich nasycają się wodą i elektrody stają się ponownie zdatne do spawania w pozycji sufitowej. Fakt ten bardzo wyraźnie świadczy o wpływie reakcji gazowych na transport fazy ciekłej przy spawaniu w pozycji sufitowej. Oprócz reakcji gazowych w samym żużlu mogą również przebiegać reakcje gazowe na granicy faz, tzn. ciekłego metalu i ciekłego żużla, np. reakcje redukcji niektórych tlenków składników żużla węglem rozpuszczonym w ciekłym metalu.

Reakcja gazów w pobliżu topiącej się elektrody. Reakcja gazów nad powierzchnią topiącej się elektrody jest mało znana. Jak wspomniano, dotychczas określano przeważnie siły występujące w łuku pomiędzy elektrodami z tego samego materiału i o tym samym kształcie. W łuku takim nie ma transportu materii. Badania właśnie takiego łuku ujawniły, że na anodzie jest znacznie większa temperatura niż na katodzie. Związane to jest oczywiście z bombardowaniem anody przez elektrony i ujemne jony oraz

oddawanie anodzie przez te elektrony i aniony energii kinetycznej, zamienianej na anodzie w energię cieplną. Uważa się, że również w łuku spawalniczym temperatura anody jest większa, niezależnie od tego czy znajduje się ona na elektrodzie, czy na materiale spawanym. Proste doświadczenie może ujawnić, że nie jest to prawdą. Spawając łukowo w powietrzu miedź o stosunkowo nieznacznej nawet grubości gołym drutem miedzianym można zaobserwować, że materiał rodzimy nie topi się niezależnie od tego, czy jest on połączony do bieguna dodatniego czy ujemnego. Drut elektrodowy topi się natomiast zawsze, ale krople z niego przyklejają się tylko do materiału rodzimego. Można nawet stwierdzić, że w przypadku gdy materiał rodzimy jest anodą krople są słabiej przyklejone, bowiem wtedy drut jest katodą, a więc temperatura kropel jest niższa, a przez to słabsze przyklejenie.

Przeważnie te same współczynniki szybkości topienia elektrod otulonych załączonych do bieguna dodatniego i ujemnego również nie świadczą o wyższej temperaturze na anodzie. Z przykładu spawania miedzi gołym drutem miedzianym niezbyt dużym natężeniem prądu wynika, że na anodzie temperatura może być niższa niż na katodzie, jeżeli anodę stanowi metal o znacznym przewodnictwie ciepła i jest objętościowo duży. Taka sytuacja jest przeważnie przy łukowym spawaniu gdy materiał rodzimy jest anodą. Dlatego też niezależnie od tego czy elektroda otulona połączona jest z biegunem dodatnim czy ujemnym, może istnieć przy niej wyższa temperatura niż na metalu rodzimym. Spowodowane to może być większą gęstością prądu na elektrodzie niż na materiale rodzimym, a przede wszystkim małą objętością i powierzchnią elektrody w porównaniu z materiałem rodzimym, co przy znacznym przewodnictwie cieplnym metali decyduje o różnicy temperatur na elektrodzie i materiale spawanym. Jeżeli więc przyjmie się, że na elektrodzie jest większa temperatura, to równocześnie większe jest tam ciśnienie gazów i par i bliższy wrzenia metal, co w sumie niezależnie od pozycji spawania i biegunowości elektrody powoduje, że transport kropli i przepływ gazów dokonuje się tylko w jednym kierunku to znaczy do materiału, który niejako zasysa produkty topiącej się elektrody.

Reakcje gazowe w topiącym się metalu i żużlu oraz wymienione powyżej siły współdziałają przeto w transporcie fazy ciekłej i zawsze w tym samym kierunku. Różnica ciśnień przy elektrodzie i materiale rodzimym wyjaśnia też, dlaczego łuk rozchyla się stożkowo w kierunku materiału rodzimego w sposób podobny do wypływu pod ciśnieniem np. gazów lub substancji z nimi zmieszanych, z przewodów rurowych.

4. WNIOSKI

Łuk elektrod otulonych różni się znacznie od innych łuków spawalniczych, a szczególnie od łuku fizycznego, jarzącego się pomiędzy katodą i anodą z tego samego metalu i o podobnych kształtach. Stosunkowo małe gęstości prądu w łuku elektrod otulonych powodują, że transport fazy ciekłej w nim zależy zasadniczo od reakcji gazowych w topiącym się metalu i żużlu. Reakcje te decydują o transporcie metalu w pozycjach przymusowych, jak również o sposobie topienia się metalu oraz parametrach elektrycznych łuku, tzn. jego napięcia i natężenia.

Pinch efekt, siła Lorentza, ciśnienie magnetyczne, działanie plazmy nie mają istotnego znaczenia na transport materii w łuku elektrod otulonych.

Przy spawaniu dużymi gęstościami prądu, tzn. przy spawaniu takimi metodami jak MIG lub w CO_2, również nie wydaje się, ażeby powyższe siły miały decydujący wpływ na transport materii w łuku, jakkolwiek nie badano ich szczegółowo i nie są one zasadniczo przedmiotem tego artykułu. Wydaje się, że w tym przypadku transport materii ciekłej spowodowany jest przez większe ciśnienie i temperaturę w pobliżu elektrody (w porównaniu z temperaturą i ciśnieniem na materiale rodzimym) niezależnie od tego czy elektroda jest katodą czy anodą. Temperatura topiącej się elektrody może być wtedy bliska temperatury wrzenia, a ciśnienie gazów nad nią jest większe niż przy materiale rodzimym. Czynniki te decydują o tym, że transport kropli odbywa się zawsze w kierunku materiału rodzimego. Różnica ciśnienia i temperatury pomiędzy materiałem rodzimym i elektrodą jest szczególnie duża, gdy elektroda jest anodą. Dlatego też przy spawa-

niu metodą MIG lub w CO_2 znacznie mniejszy krytyczny prąd jest potrzebny dla uzyskania natryskowego topienia gdy elektroda jest anodą. Przy spawaniu natomiast elektrodami otulonymi, czyli łukiem o małej gęstości prądu, różnice temperatur i ciśnień przy elektrodzie i materiale odgrywają prawdopodobnie mniejszą rolę.

Sumując wnioski można stwierdzić, że przy spawaniu małymi gęstościami prądu, np. przy spawaniu elektrodami otulonymi lub gołym drutem w powietrzu, o transporcie metalu w pozycjach przymusowych decydują reakcje gazowe w metalu lub w metalu i w żużlu topiącej się elektrody. W tym przypadku bowiem różnice pomiędzy temperaturą i ciśnieniem przy elektrodzie i na materiale spawanym są zbyt małe, chociaż na pewno współdziałają w przenoszeniu materiału w łuku. Natomiast przy spawaniu dużymi gęstościami prądu, np. w metodzie MIG lub w CO_2, o kierunku transportu ciekłego metalu i jego sposobie topienia decyduje prawdopodobnie różnica temperatury i ciśnienia pomiędzy elektrodą i materiałem spawanym, a więc zjawisko w większym stopniu natury czysto fizycznej niż elektrycznej.

LITERATURA

[1] Almar-Naess M.: Soud. et. Tech. Conn. 1965, nr 1-2.
[2] Amson J.C.: Brit. J. Appl. Phys., 1965, vol. 16.
[3] Lancaster J.F.: Doc. IIW. WG 212-48-65.
[4] Study Group 212 IIW, Doc. 221-146-68.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА ПРИ СВАРКЕ ПОКРЫТЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Р е з ю м е

Анализ сил и факторов влияющих на электронную эмиссию и перенос металла в дуге полученной при сварке покрытым электродом. Было установлено, что газовые металлургические реакции в плавящимся металле электрода и газовые процессы в плавящейся обмазке оказывают решающее влияние на способ плавления электрода, транспортирование материи в дуге и электронную эмиссию.

Температура и давление вблизи основного металла ниже чем вблизи плавящегося электрода независимо от рода сварочного тока и от полярности и это тоже может решать о переносе материи в дуге.

Это явление повидимому более важно для других электросварочных дуг, в особенности при большой плотности тока как например при сварке в среде аргона и углекислого газа металлическим электродом.

COVERED-ELECTRODE ARC

S u m m a r y

Analysis of forces and factors influencing the emission of electrons and metal transfer in the covered-electrode arc. Metallurgical gas reactions in the melting electrode metal and gaseous processes in the melting covering have been found to have a decisive effect on the melting mode of the electrode, transfer of substance in the arc and the emission of electrons. Temperature and pressure near the melting electrode are higher than those near the parent metal, regardless of the type of current and polarity; this may also decide about the metal transfer in the covered-electrode arc. This effect is hiwever more likely to be significant for other welding arcs, of high current density in particular, as in e.g. MIG or CO_2 welding.