ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1969

Seria: MECHANIKA z. 39 Nr kol. 258

JAN WĘGRZYN
Katedra Spawalnictwa

ŁUK ELEKTROD OTULONYCH (CHARAKTERYSTYCZNE WŁAŚCIWOŚCI ŁUKU)

Streszczenie: Omówiono charakterystyczne właściwości łuku elektrod kwaśnych, rutylowych, celulozowych, głębokowtapiających, zasadowych, stalowych i nieżelaznych. Zanalizowano wpływ składu otulin na emisję elektronów, napięcie łuku, katodowy spadek napięcia, sposób topienia się elektrody oraz rozprysk. Otuliny składające się z tlenków różnią się zasadniczo od otulin zawierających również fluorki lub chlorki.

1. WSTĘP

Stalowe elektrody otulone, przeznaczone do ręcznego spawania, dzieli się obecnie, zgodnie z zaleceniami Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa i Międzynarodowej Organizacji Standardyzacji, na elektrody tlenkowe, kwaśne, rutylowe, zasadowe i celulozowe. W pewnym sensie jest to podział oparty na metalurgicznych przesłankach, uwzględniających reakcje pomiędzy ciekłym żużlem i metalem. Każda grupa tych elektrod odznacza się charakterystycznymi właściwościami, które decydują o właściwościach technologiczno-spawalniczych elektrod oraz o własnościach wytrzymałościowych ich stopiwa. Również właściwości łuku i procesy dokonywujące się w nim zależą w decydującym stopniu od rodzaju elektrod.

2. WŁAŚCIWOŚCI ŁUKU ELEKTROD KWAŚNYCH

Otuliny elektrod kwaśnych i podobnych im tlenkowych zawierają największe ilości rud żelaznych i rud manganowych oraz duże ilości uwodnionych glinokrzemianów. Topiący się metal na końcu elektrody jest przeto metalurgicznie nieuspokojony i bardzo aktywny, ponieważ zawiera duże ilości tlenu i wodoru. Burzenie i wrzenie ciekłego metalu na końcu elektrody powodu-

je, że siły napięcia powierzchniowego są bardzo łatwo pokonywane. Elektroda topi się więc natryskowo, ponieważ napięcie powierzchniowe jest w tych warunkach zbyt małe do utrzymania na końcu elektrody większych kropel.

Napięcie łuku przy spawaniu tymi elektrodami zależy od ilości w otulinach związków potasu i sodu oraz od ilości gazów wydzielających się z otulin. Napięcie to może wynosić, w zależności od średnicy elektrody i gęstości prądu, od dwudziestu kilku do trzydziestu kilku woltów. Im większe jest w łuku stężenie jonów sodu, a zwłaszcza potasu lub ich związków, tym bardziej zjonizowany jest łuk i tym mniejsze jest jego całkowite napięcie. Elektrody takie przydatne są szczególnie do spawania prądem zmiennym. Ze wzrastającą ilością gazów wydzielanych z otulin zmniejsza się w atmosferze łuku procentowe stężenie zjonizowanych cząsteczek potasu, sodu i ich związków, jak również innych łatwiej jonizujących się cząsteczek.

Średni potencjał jonizacyjny atmosfery gazowej łuku wzrasta, ponieważ potencjał jonizacji gazów wydzielających się z otulin, tzn. przeważnie CO, CO_2, H_2O i ich produktów dysocjacji, jest znaczny, czasem nawet czterokrotnie większy niż potencjał jonizacji potasu czy sodu.
Ze wzrastającą ilością wydzielanych gazów z otuliny obniża się również prawdopodobnie temperatura łuku. W rezultacie zmniejszonego stopnia jonizacji oraz obniżonej temperatury w łuku utrudniona jest emisja elektronów. Katodowy spadek napięcia związany z emisją elektronów staje się wtedy większy, a przez to wzrasta i całkowite napięcie łuku. Przy bardzo dużej ilości wydzielających się gazów łuk przyjmuje tak duże napięcie, że staje się głębokowtapiający, a całkowita wartość napięcia może wtedy przekraczać 50 woltów. Zagadnienie łuku elektrod głębokowtapiających zostanie przedstawione w dalszym rozdziale.

Wpływ biegunowości elektrody na jarzenie się łuku i transport w nim materiałów nie jest bardzo istotny, jakkolwiek energia kinetyczna zjonizowanych cząsteczek i elektronów proporcjonalna jest przede wszystkim do katodowego spadku napięcia:

$$\frac{1}{2} mv^2 = e\,V, \qquad (1)$$

gdzie:

m - masa zjonizowanej cząsteczki lub elektronu,

v - szybkość,

e - ładunek elektronu lub cząsteczki,

V - katodowy spadek napięcia.

Zgodnie z tym wzorem naładowane cząsteczki powinny osiągać większą szybkość, gdy elektroda jest katodą, bowiem wtedy działanie sił natury elektrycznej i różnicy ciśnień jest zgodne. Ponieważ jednak, jak już stwierdzono w poprzedniej pracy, siły natury elektrycznej nie mają istotnego znaczenia przy spawaniu elektrodami otulonymi, zjawisko to nie jest bardzo wyraźne, choć czasem można stwierdzić, że elektrody o bardzo dużym napięciu topią się dynamiczniej po załączeniu ich do bieguna ujemnego. Z drugiej jednak strony jeśli uwzględnić, że po załączeniu elektrody do bieguna dodatniego istnieje przy tym samym natężeniu prądu wyższa temperatura, a więc i ciśnienie na elektrodzie jako anodzie, to można przyjąć, że wtedy przeciwne działania sił natury elektrycznej zostają równoważone większym ciśnieniem, dzięki czemu przy spawaniu kwaśnymi i tlenkowymi elektrodami otulonymi nie ma istotnych różnic po załączeniu ich do bieguna ujemnego lub dodatniego. Natomiast wyraźne różnice występują przy spawaniu elektrodami zasadowymi i zostaną one przedstawione w dalszym rozdziale.

Wraz ze wzrostem temperatury suszenia elektrod kwaśnych i tlenkowych zmniejsza się w otulinach tych elektrod ilość składników gazotwórczych. W atmosferze łuku wzrasta więc proporcjonalnie stężenie jonów potasu, sodu i ich związków, przez co emisja elektronów staje się łatwiejsza i odbywa się przy niższym katodowym spadku napięcia. Całkowite napięcie łuku jest więc mniejsze, a łuk staje się lepiej zjonizowany i bardziej stabilny. Równocześnie ze zmniejszającą się ilością gazów w otulinie maleją siły przenoszące metal w łuku i po prawie całkowitym usunięciu gazów, powyżej 800°C, proces spawania w pozycji sufitowej jest praktycznie niemożliwy. Zmiany napięcia łuku, natężenia prądu i przenoszenia metalu w łuku elektrod kwaśnych suszonych i prażonych przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Zmiany napięcia łuku, natężenia prądu i sposobu topienia kwaśnej elektrody EP52-28 suszonej przy różnych temp.
(średnica 4 mm, skład otuliny pod tablicą 3, część I)

Temp. suszenia elektrody	Natężenie prądu nastaw. na spawarce A	Napięcie łuku V	Natężenie prądu w łuku A	Sposób topienia	Spawanie w pozycji sufitowej
150	200	36	190	natryskowy	bardzo dobre
300	200	35	195	"	" "
450	200	34	200	drobnokropl.	dobre
600	200	32	220	kroplowy	trudne
750	200	31	230	grubokropl.	bardzo trudne

3. WŁAŚCIWOŚCI ŁUKU ELEKTROD RUTYLOWYCH

Otuliny elektrod rutylowych różnią się od otulin elektrod kwaśnych i tlenkowych przede wszystkim tym, że rudy żelaza i rudy manganu zastąpione są w otulinach elektrod rutylowych rudą tytanu, tzw. rutylem. Powoduje to, że metal topiącej się elektrody nie jest tak znacznie utleniony, a przez to bardziej metalurgicznie uspokojony. Stąd też napięcie powierzchniowe odgrywa większą rolę przy topieniu elektrod rutylowych niż kwaśnych. Topienie elektrod rutylowych nie jest więc tak natryskowe jak topienie elektrod kwaśnych czy tlenkowych. Topienie się elektrod rutylowych jest ocenione jak natryskowo-kroplowe. Innych większych różnic pomiędzy topieniem się elektrod kwaśnych i tlenkowych nie ma. Rutyl uznawany jest za minerał lepiej stabilizujący łuk niż rudy żelaza i rudy manganu. Różnice nie są bardzo istotne.

4. WŁAŚCIWOŚCI ŁUKU ELEKTROD CELULOZOWYCH

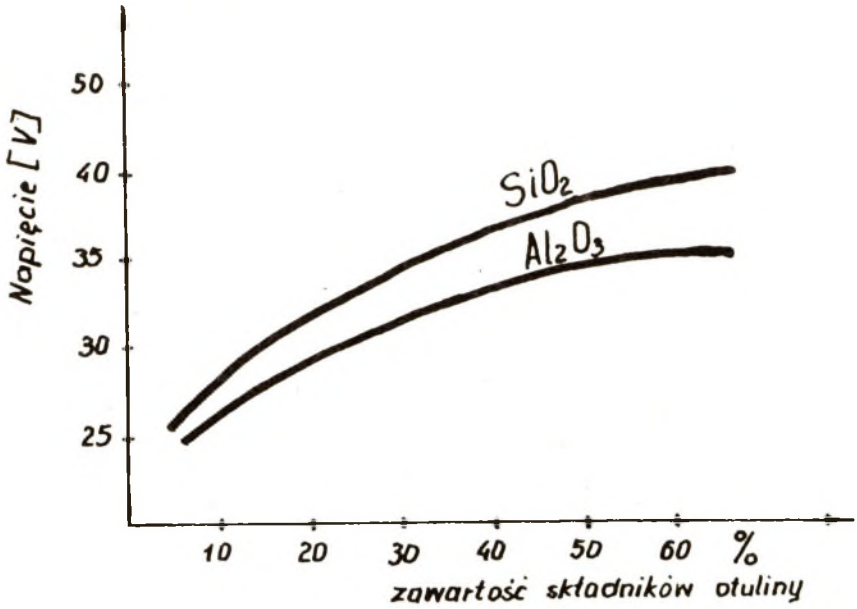
Otuliny elektrod celulozowych zawierają, w porównaniu z elektrodami kwaśnymi i rutylowymi, bardzo duże ilości składników organicznych, przeważnie celulozę, a ilość jej może stanowić nawet ok. 30% otuliny. Pozostałe składniki otulin nie różnią się znacznie od składników otulin elektrod kwaśnych i rutylowych. Często w otulinach tych elektrod występuje też krzemian cyrkonu. Elektrody celulozowe znane są jako elektrody stosunkowo głęboko przetapiające materiał rodzimy. Powoduje to stosunkowo wysokie napięcie łuku tych elektrod, wynoszące czasem nawet ok. 40 woltów, przy stosowaniu elektrod o dużych średnicach i dużych gęstościach prądów. To zwiększone napięcie łuku spowodowane jest obecnością w otulinie celulozy, wytwarzającej przy spalaniu duże ilości gazów o wysokim potencjale jonizacji i częściowo chłodzących przestrzeń katodową, wskutek czego emisja elektronów z katody jest utrudniona. Odbywa się ona przy dużym spadku napięcia katodowego, a więc w rezultacie zwiększa całkowite napięcie łuku. Zagadnienie to opisano już dokładniej w rozdziale traktującym o właściwościach łuku elektrod kwaśnych.

5. WŁAŚCIWOŚCI ŁUKU ELEKTROD GŁĘBOKOWTAPIAJĄCYCH

Łuk elektrod głębokowtapiających odznacza się bardzo dużym napięciem dużą mocą dynamiczną i cieplną. Przy spawaniu elektrodami głębokowtapiającymi napięcie łuku wynosi pow. 45 wolt i wzrasta z gęstością prądu oraz średnicą elektrody. Bardzo duże napięcie łuku powoduje, że natężenie prądu w nim jest znacznie mniejsze niż ustawione na spawarce. Ten spadek natężenia prądu w łuku jest proporcjonalny do wzrostu napięcia łuku. Otuliny elektrod głębokowtapiających charakterystyczne są tym, że zawierają duże ilości organicznych składników, spalających się i wytwarzających bardzo duże ilości gazów. Pozostałe składniki są częściowo podobne do elektrod kwaśnych, rutylowych i celulozowych. Otuliny elektrod głębokowtapiających nie mają więc zasadniczo odmiennych składników od omawianych dotychczas elektrod. Wzrost napięcia łuku przy spawaniu tymi elektrodami polega zasadniczo na tym samym zjawisku, jakie występuje przy spawaniu elektrodami otulonymi wytwarzającymi duże ilości gazów.

Zjawisko to opisano w rozdziale traktującym o właściwościach łuku elektrod kwaśnych.

Stwierdzono, że duży wzrost napięcia łuku elektrod otulonych zależy nie tylko od ilości i jakości wydzielanych z otuliny gazów, lecz również od ilości i jakości składników mineralnych otuliny. Szczególnie duży wzrost napięcia łuku powoduje obecność w otulinie dużej ilości dwutlenku krzemu SiO_2, a w nieco mniejszym stopniu również i tlenku aluminium Al_2O_3. Wzrost napięcia łuku w zależności od ilości tych składników przedstawiono na rysunku 1. Oczywiście, wzrost ten w bezwzględnej wartości zależy od ilości innych składników wpływających na wartość napięcia łuku. Ze wzrostem ilości w otulinie składników o bardzo niskim potencjale jonizacji, np. potasu, wpływ SiO_2 i Al_2O_3 na napięcie łuku jest mniejszy. Przy dość znacznej natomiast ilości gazów wydzielających się z otuliny obecność SiO_2 i Al_2O_3 dodatkowo powiększa napięcie łuku. Wpływ SiO_2 i Al_2O_3 na wzrost napięcia łuku można wytłumaczyć przy uwzględnieniu teorii jonowej żużli. Zgodnie z tą



Rys. 1. Wpływ zawartości w otulinie elektrod Al_2O_3 i SiO_2 na napięcie łuku

teorią w stopionych żużlach istnieją nie tlenki SiO_2 i Al_2O_3, lecz odpowiednio ich złożone ujemne jony, np. SiO_4^{4-}, AlO_3^{3-}.

W łuku mogą więc istnieć te związki w postaci par i to w ilości proporcjonalnej do ilości SiO_2 i Al_2O_3 w otulinie. Prawdopodobnie emisja elektronów do przestrzeni o znacznym stężeniu ujemnych jonów, a więc o tym samym ładunku jak elektrony, jest bardziej utrudniona niż w przypadku dodatnio naładowanych kationów. Natężenie pola potrzebne do katodowej emisji elektronów powinno więc być większe. Odbywa się to więc przy większym spadku napięcia katodowego, co powoduje ogólny wzrost napięcia łuku.

Jak już wspomniano w rozdziale o łuku elektrod kwaśnych dużą moc cieplną łuku elektrod głębokowtapiających osiąga się przez dużą wartość iloczynu napięcia łuku przez natężenie prądu, a dużą moc dynamiczną dzięki dużej różnicy ciśnień pomiędzy topiącą się elektrodą i materiałem spawanym, jak również w niektórych przypadkach dzięki działaniu pola magnetycznego na naładowane cząsteczki, zgodnie z wzorem (1).

6. WŁAŚCIWOŚCI ŁUKU ELEKTROD ZASADOWYCH

Łuk elektrod zasadowych różni się dość znacznie swoimi właściwościami od łuku omawianych poprzednio elektrod. Przynajmniej następujące trzy cechy łuku elektrod zasadowych można wymienić jako zasadniczo różne od łuku poprzednich elektrod, a to:

1. Kroplowe lub nawet grubokroplowe topienie się elektrod.
2. Duży wpływ biegunowości.
3. Trudności przy spawaniu prądem zmiennym.

Kroplowe topienie. Otuliny elektrod zasadowych zawierają węglany, przeważnie wapnia, fluoryt CaF_2, stosunkowo małą ilość glinokrzemianów oraz proszki metaliczne i stosunkowo skuteczne w porównaniu z innymi otulinami odtleniacze. Elektrody te są przeważnie niskowodorowe. W porównaniu z poprzednimi gatunkami elektrody te tworzą stopiwo dobrze odtlenione, uspokojone i niskowodorowe (druty rdzeniowe elektrod zasadowych są wprawdzie przeważnie z nieuspokojonej stali jak i druty rdzeniowe innych gatunków elektrod, lecz krzem przechodzi do kropli w czasie jej tworzenia się na końcu elektrody).

Ponieważ krople topiącej się elektrody zawierają już krzem, a czasem i tytan lub aluminium, a ponadto małą zawartość wodoru, są one bardzo dobrze metalurgicznie uspokojone. Jest to powodem dla którego siły napięcia powierzchniowego na końcu topiącej się elektrody nie są niszczone przez burzenie się metalu. Jak ujawnią późniejsze badania, kroplowe topienie metalu elektrody nie jest specyficzną właściwością składu otuliny, ponieważ spawanie zasadowymi elektrodami nie suszonymi produkcyjnie po ich wytworzeniu (elektrody suszone po wyprasowaniu tylko w powietrzu), a więc zawierającymi znaczne ilości potencjalnego wodoru, topią się przeważnie natryskowo. W tym przypadku wodór obecny w otulinie i rozpuszczający się w kroplach na końcu elektrody powoduje jej wrzenie, niszczenie sił napięcia powierzchniowego i topienie natryskowe elektrody.

Wpływ biegunowości. Otuliny elektrod zasadowych zawierają, w odróżnieniu od innych gatunków elektrod stalowych, związki fluoru, przeważnie fluorek wapnia CaF_2, zwany fluorytem. Minerał ten wprowadza się dla obniżenia temperatury topnienia i lepkości (wiskozy) żużla. Obecność związków fluoru wpływa bardzo wyraźnie na właściwości łuku elektrod zasadowych i przenoszenie w nim materiału. Wiadomo, że elektrody zasadowe topią się znacznie lepiej po załączeniu ich do bieguna dodatniego, a ujawniają znaczny rozprysk po załączeniu do bieguna ujemnego oraz że przeważnie nie nadają się do spawania prądem zmiennym.

Ostatnio wprawdzie opracowano już elektrody zasadowe przystosowane do spawania prądem zmiennym, ale dokonano tego przeważnie na drodze obniżenia stężenia związków fluoru w otulinie i zwiększenia związków potasu.

Związki fluoru i pokrewne im związki chloru znane są jako anty stabilizatory łuku spawalniczego. Zjawisko to polega na niszczeniu kationów przez aniony fluoru. Ze wzrostem więc stężenia w łuku kationów o bardzo małym potencjale jonizacji i przy równoczesnym zmniejszeniu się stężenia anionów fluoru, wpływ tych ostatnich staje się mniej szkodliwy, nawet przy spawaniu prądem zmiennym. Interesujący natomiast jest problem różnych właściwości łuku przy spawaniu prądem stałym elektrodami o otulinach zawierających związki fluoru, po załączeniu elektrod do bieguna dodatniego i ujemnego.

Zagadnieniu temu poświęcono wiele badań i poniżej zostaną przedstawione najważniejsze wnioski i spostrzeżenia z tych badań.

Fluorek wapnia jest bardzo trwałym związkiem i dlatego reakcja rozszczepiania fluorku wapnia:

$$CaF_2 = CaF + F \qquad (2)$$

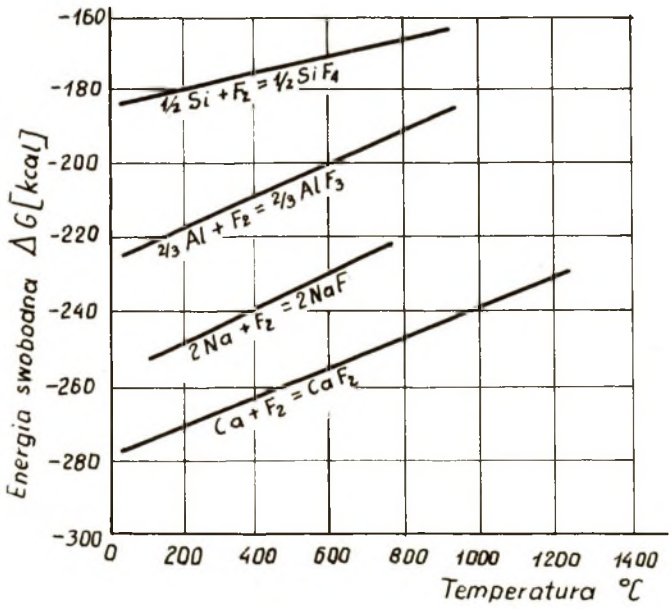
może zachodzić w łuku tylko w małym stopniu.
Prawdopodobnie stężenie fluoru z tej reakcji, a w następstwie i jego anionów, jest nieznaczne. Mniej znane jest także zachowanie się CaF_2 w stopionych żużlach, jakkolwiek uważa się, że wtedy przebiega reakcja:

$$CaF_2 = Ca^{2+} + 2F^-. \quad (3)$$

Trudno określić, czy w wyniku tej reakcji mogą pojawić się w łuku aniony fluoru.

Dla ujawnienia wpływu związków fluoru w otulinach na właściwości łuku wykonano kilkadziesiąt różnych elektrod stalowych o otulinach zawierających zmienne zawartości CaF_2, a ponadto innych związków fluoru łatwo wydzielających fluor, przede wszystkim fluorokrzemian sodu (Na_2SiF_6). Stosowano również do otulin fluorek sodu NaF, fluorek aluminium AlF_3 oraz złożony fluorek kriolit Na_3AlF_6. Trwałość tych fluorków, ocenianą ich energią swobodną, przedstawiono na rysunku 2. Najbardziej trwałym jest fluorek wapnia CaF_2, a najmniej trwałym fluorek krzemu SiF_4. Związek SiF_4 tworzy się w łuku z rozkładu

$$Na_2SiF_6 = 2NaF + SiF_4. \quad (4)$$



Rys. 2. Energia swobodna fluorków SiF_4, AlF_3, NaF i CaF_2

Oprócz elektrod stalowych badano również elektrody aluminiowe i miedziane o otulinach fluorkowo-chlorkowych oraz fluorkowo-chlorkowo-tlenkowych. Składy najbardziej charakterystycznych elektrod przedstawiono w tablicy 2.
Stwierdzono, że elektrody o otulinach zawierających fluorki, topią się stabilnie po załączeniu ich do bieguna dodatniego. W tym przypadku bowiem ujemne jony fluoru, tworzące się w pobliżu elektrody - anody są przez nią przyciągane i bombardują ją. W rejonie anody ilość kationów jest mała, bowiem przemieszczają się one w kierunku katody. Dlatego też nie zaznacza się ujemny wpływ anionów fluoru w neutralizowaniu kationów i obniżaniu przez to stopnia zjonizowania przestrzeni łuku. Emisja elektronów z katody - materiału dokonuje się więc w tym przypadku stosunkowo łatwo. Katodowy spadek napięcia jest więc stosunkowo mały, podobnie jak i całkowite napięcie łuku. Natomiast zupełnie inne zjawiska i procesy występują po załączeniu elektrody do bieguna ujemnego. Ze wzrostem ilości fluorków w otulinie, a szczególnie fluorków łatwo dysocjujących, jak Na_2SiF_6 i ALF_3 i łatwo tworzących ujemne jony, wzrasta napięcie łuku i maleje natężenie w nim prądu, wzrasta rozprysk, zmniejsza się uzysk metalu z elektrody, a topienie jej staje się bardziej natryskowe. W tablicy 3 zestawiono charakterystyczne zmiany właściwości łuku i topienia się elektrod załączonych do bieguna dodatniego i ujemnego i zawierających w otulinach różne ilości fluorków. W przypadku dużej ilości w otulinie fluorków łatwo dysocjujących (Na_2SiF_6, AlF_3, Na_3AlF_6) stwierdzono, że po załączeniu elektrod do bieguna ujemnego napięcie łuku wzrasta nawet ponad 50%, natężenie prądu spada o ok. 30%, w porównaniu ze spawaniem tymi samymi elektrodami załączonymi do bieguna dodatniego, przy tym samym nastawieniu prądu na spawarce (tablica 3).

Równocześnie uzysk stopiwa zmniejsza się prawie dwukrotnie z powodu bardzo dużego rozprysku przy spawaniu elektrodą załączoną do bieguna ujemnego (tablica 3). Elektroda topi się wtedy natryskowo. Przy spawaniu elektrodami o otulinach zawierających bardzo trwałe fluorki, jak np. CaF_2 i NaF (rys. 2), nie

Tablica 2

Składy badanych najbardziej charakterystycznych elektrod o otulinach zawierających fluorki (skład masy otulinowej suchej)

Elektrody stalowe. Oznaczenie	Ilość fluorków w otulinie	Pozostałe składniki	Uwagi
ECaF 10	10% CaF_2	Otuliny zasadowe. Kreda ($CaCO_3$) ok. 35%, żelazostopy, proszek żelaza. Do 5% składników kwaśnych	Elektrody prasowano po dodaniu do masy suchej ok. 20% sodowego szkła wodnego. Średnica drutów rdzeniowych 4 mm. Zewnętrzna średnica otuliny 6,2 mm.
ECaF 20	20% CaF_2		
ECaF 30	30% CaF_2		
ECaF 50	50% CaF_2		
ENaSiF 10	10% Na_2SiF_6		
ENaSiF 20	20% Na_2SiF_6		
ENaSiF 30	30% Na_2SiF_6		
ENaSiF 40	40% Na_2SiF_6		
EAlF 20	20% AlF_3		
EAlF 30	30% AlF_3		
EAlF 40	40% AlF_3		
EAlF 50	50% AlF_3		
ENaF 40	40% NaF		
ENaFAlF 40	40% Na_3AlF_6		
EAlFCaF	50% AlF_3, 50% CaF_2		
Elektrody aluminiowe ozn. EAl1	powyżej 90% fluorków i chlorków		
Elektrody miedziane oznaczone ECu1	powyżej 80% fluorków		

Tablica 3

Wpływ biegunowości elektrod o otulinach zawierających fluorki na parametry łuku i sposób topienia się elektrod (średnica elektrod 4 mm)

Elektrody stalowe Oznaczenia	Ilość fluorków w otulinie	Natężenie prądu spawania nastaw. na spawarce A	Biegunowość elektrod	Napięcie łuku, V 1°)	Natężenie prądu w łuku 2°) A	Sposób topienia elektrody	Uzysk stopiwa, % 3°)	Proszek Fe w otulinie %
ECaF 10	10% CaF_2	180	+	28	175	grubo-kroplowy	114	30
			−	30	170	kroplowy	112	
ECaF 20	20% CaF_2	180	+	30	175	grubo-kroplowy	113	25
			−	31	170	kroplowy	110	
ECaF 30	30% CaF_2	180	+	32	170	grubo-kroplowy	110	20
			−	33	165	drobno-kroplowy	109	
ECaF 50	50% CaF_2	190	+	31	180	grubo-kroplowy	101	10
			−	35	165	drobno-kroplowy	100	
ENaSiF 10	10% Na_2SiF_6	180	+	29	180	grubo-kroplowy	109	23
			−	33	170	drobno-kroplowy	107	
ENaSiF 20	20% Na_2SiF_6	190	+	29	195	grubo-kroplowy	104	18
			−	40	170	drobno-kroplowy	75	
ENaSiF 30	30% Na_2SiF_6	200	+	31	200	grubo-kroplowy	102	15
			−	45	165	natryskowo-kroplowy	51	
ENaSiF 40	40% Na_2SiF_6	200	+	34	220	grubo-kroplowy	88	10
			−	47	160	natryskowo-kroplowy	50	
EAlF 20	20% AlF_3	190	+	30	190	grubo-kroplowy	103	27
			−	34	175	kroplowy	100	
EAlF 30	30% AlF_3	200	+	32	195	grubo-kroplowy	102	23
			−	38	170	drobno-kroplowy	98	
EAlF 40	40% AlF_3	200	+	35	200	grubo-kroplowy	102	20
			−	43	165	natryskowo-kroplowy	42	
EAlF 50	50% AlF_3	200	+	36	215	kroplowy	96	15
			−	46	160	natryskowo-kroplowy	38	
ENaF 40	40% NaF	180	+	23	180	kroplowy	95	23
			−	23	180	kroplowy	95	
ENaFAlF 40	40% Na_3AlF_6	180	+	24	180	grubo-kroplowy	104	23
			−	27	135	natryskowo-kroplowy	91	
EAlFCaF	50% AlF_3, 50% CaF_2	200	+	36	200	kroplowy	83	0
			−	46	170	natryskowo-kroplowy	44	
Elektrody aluminiowe EAl1	pow. 90% fluorków i chlorków	200	+	32	200	grubo-kroplowy	80	
			−	38	180	natryskowo-kroplowy	15	
Elektr. miedziane ECu1	pow. 80% fluorków I	300	+	37	280	kroplowy	82	
			−	48	220	natryskowo-kroplowy	46	

1°) Napięcie łuku zależało w pewnym stopniu od rodzaju źródła prądu. Stosując prostowniki uzyskiwano niższe napięcia łuku.

2°) Przy spawaniu załączoną do bieguna dodatniego elektrodą z otuliną o dużej ilości łatwo dysocjujących fluorków prąd w łuku był większy od nastawionego na spawarce. Spowodowane to było dodatkowym prądem jonowym, prawdopodobnie głównie anionami fluoru.

3°) Przy spawaniu w pozycji sufitowej elektrodami o otulinach zawierających duże ilości fluorków łatwo dysocjujących uzyski były niższe niż podane w tablicach.

obserwuje się w procesie spawania tak znacznych zmian (tablica 3).
Przyczyny tych zjawisk mogą być wyjaśnione w sposób następujący. Przy spawaniu elektrodą załączoną do bieguna ujemnego emisja elektronów odbywa się z elektrod do materiału spawanego. Z otuliny elektrod, zawierających dużo łatwo dysocjujących fluorków, wydziela się cały czas i w dużych ilościach fluor i tworzą się jego aniony, np. reakcja 8*) lub np. reakcje typu:

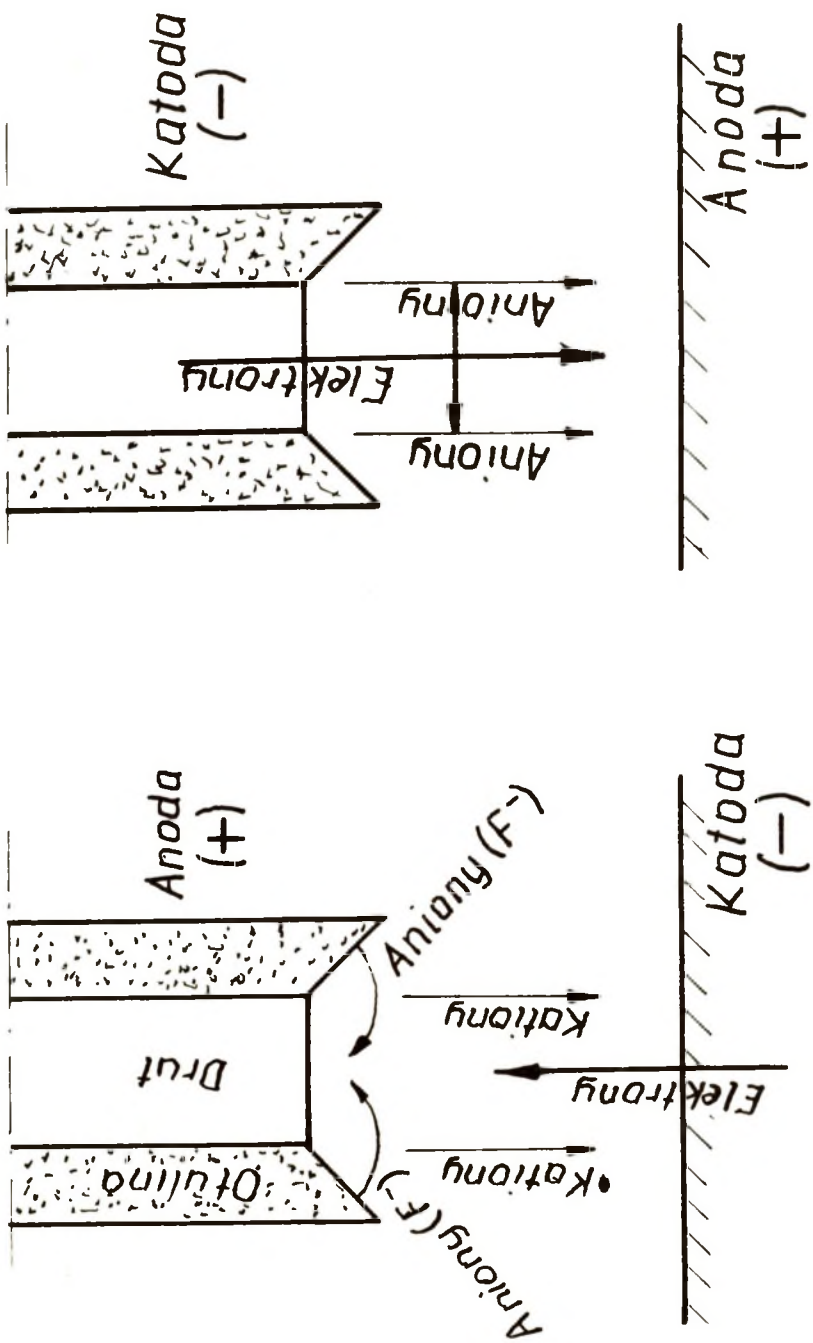
$$SiF_4 = Si^{4+} + 4F^-. \qquad (5)$$

Stężenie kationów w rejonie katody jest przeto małe w porównaniu ze stężeniem fluoru i jego anionów. Mimo, że aniony fluoru wyrzucane są w kierunku anody, stężenie ich w przestrzeni katody nie zmniejsza się, bowiem wciąż nowe ich ilości są wydzielane z otuliny topiącej się elektrody. Emisja elektronów z katody do przestrzeni zawierającej bardzo małą ilość kationów i chłodzonej może jeszcze wydzielającymi się gazami jest utrudniona. Poza tym emisja elektronów do przestrzeni wypełnionej anionami fluoru, a więc cząsteczkami o tym samym ładunku co elektrony, jest zapewne trudniejsza niż w przypadku gdyby przestrzeń ta była wypełniona zjonizowanymi cząsteczkami dodatnimi, tzn. kationami (kationy mogą też być w tych warunkach neutralizowane przez aniony fluoru, reakcja 9, część I).

W wyniku tych procesów emisja elektronów wymaga stosunkowo dużego natężenia pola. Emisja ta odbywa się więc przy dużym spadku katodowym, czyli przy dużym napięciu łuku. Sprzyja to bardziej natryskowemu topieniu, ponieważ większą energię kinetyczną mają wówczas emitowane elektrony, co zmniejsza wyraźnie wpływ sił napięcia powierzchniowego.

Rozprysk materiału topionego w łuku jest rezultatem wspólnego przemieszczania się w nim strumienia elektronów oraz materii, posiadającej też pewien ładunek ujemny (rys. 3). Przy spawaniu elektrodą załączono do bieguna ujemnego całą trasę

*) Por. część I.



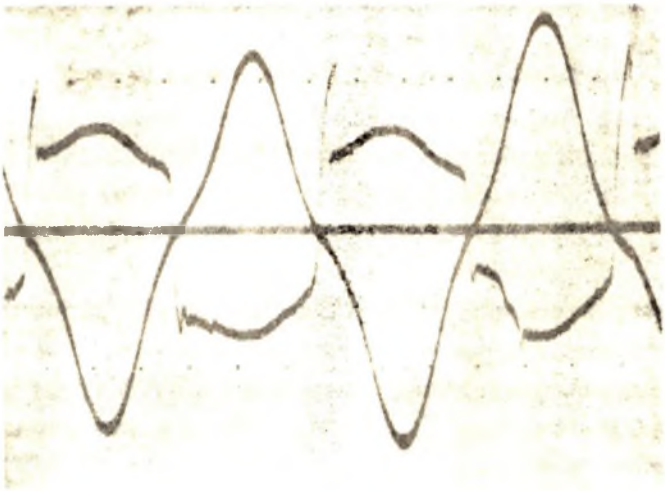
Rys. 3. Topienie się elektrod o otulinach zawierających fluorki
a) elektroda załączona do bieguna dodatniego, b) elektroda załączona do bieguna ujemnego

łuku przebywają wspólnie strumień elektronów (tworzący prawdopodobnie oś pionową łuku) oraz stopiony materiał, otaczający przeważnie strumień elektronów.

Ten materiał zawierający znaczną ilość anionów fluoru może ujawniać się elektrostatycznie ujemnie. Odpychające działanie strumienia elektronów na otaczający go materiał powoduje przeto rozprysk, który jest tym większy, im większe jest stężenie związków fluoru w otulinie oraz im łatwiej one dysocjują i tworzą aniony. W przypadku elektrod stalowych straty stopiwa z tego powodu wynosiły nawet ponad 60% ciężaru drutu rdzeniowego, a w przypadku elektrod aluminiowych straty te przekraczały nawet 90% (tablica 3). W tym ostatnim przypadku bowiem otulinę stanowiły wyłącznie fluorki i chlorki, a aluminium jako znacznie lżejsze niż żelazo, jest w większym stopniu wyrzucane z łuku.

Ogólnie można stwierdzić, że przy spawaniu załączonymi do bieguna ujemnego elektrodami o otulinach zawierających fluorki, rozprysk, wzrost napięcia łuku i spadek natężenia prądu w łuku są odwrotnie proporcjonalne do trwałości fluorków, ocenianej ich energią swobodną i wprost proporcjonalnie do ich ilości. Największe przeto zmiany ujawniają się wtedy przy spawaniu elektrodami o otulinach zawierających duże ilości SiF_4 (Na_2SiF_6(, następnie AlF_3, a najmniejsze w przypadku nawet dużych ilości CaF_2 lub NaF.

Spawanie prądem zmiennym. Oprócz dejonizacji strefy łuku przy zmianie kierunku przepływu prądu i jonów, ciekawym zjawiskiem występującym przy spawaniu prądem zmiennym elektrodami o otulinach zawierających fluorki jest trudniejsze zajarzenie łuku, gdy katodą jest materiał spawany. Zajarzenie łuku na katodzie - materiale dokonuje się z pewnym opóźnieniem i przy wyższym napięciu niż wtedy gdy katodą jest elektroda (rys. 4). Im niższe jest napięcie stanu jałowego transformatora, tym zjawiska te są wyraźniejsze. Podobne zjawisko spotyka się również przy spawaniu łukiem krytym prądem zmiennym, topnikami zawierającymi pewne ilości związków fluoru. Można sądzić, że spowodowane to jest mniejszą gęstością prądu, a przede wszystkim niższą



Rys. 4. Oscylogram łuku elektrod o otulinie zawierającej fluorki
Katoda - materiał (górna część oscylogramu): Piki napięć przy jarzeniu łuku. Katoda - elektroda (dolna część oscylogramu): Łuk zajarza się wcześniej i przy niższym napięciu

temperaturą na katodzie - materiale niż na katodzie - elektrodzie. Potwierdzać to może również tezę o niższej temperaturze na materiale rodzimym niezależnie od tego czy stanowi on katodę czy anodę.

7. WNIOSKI

Nawiązując do I części niniejszej pracy stwierdzono, że skład otulin elektrod decyduje o parametrach łuku, o przenoszeniu w nim materiałów jak również o emisji elektronów. Badając elektrody z najczęściej stosowanymi rodzajami otulin stwierdzono, że największe różnice istnieją pomiędzy elektrodami zasadowymi lub fluorkowymi i elektrodami o otulinach tlenkowych. Związki fluoru, zawarte w otulinach, szczególnie łatwo dysocjujące z wydzieleniem fluoru, mają duży wpływ na napięcie łuku, na katodowy spadek napięcia, na sposób topienie się elektrody oraz rozprysk, a przede wszystkim na procesy w strefie katody i anody i możliwość spawania prądem zmiennym. Elektrody o otulinach składających się przeważnie z tlenków stapiają się

prawie jednakowo niezależnie od rodzaju prądu i biegunowości. Otuliny te mogą mieć, w zależności od zawartości składników gazotwórczych, bardzo duży wpływ na napięcie łuku i jego właściwości głębokowtapiające.
Przedstawione wyjaśnienie zjawisk zachodzących w łuku elektrod zasadowych lub fluorkowych i pozostałych znalazło potwierdzenie w próbach spawania i w bezpośrednich pomiarach parametrów łuku.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА ПРИ СВАРКЕ ПОКРЫТЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

(Особенные свойства дуги)

Р е з ю м е

Рассмотрено характеристические свойства электрической дуги при електродах кислых, рутиловых, целлюлозных, глубокого переплава, основных, стальных и из цветных металлов. Влияние состава покрытия на электронную эмиссию, напряжение дуги, катодный перепад напряжения, способ плавления электрода и разбрызгивание.

Покрытия состоящие из окислов существенным образом отличаются от покрытий содержащих тоже фториды и хлориды.

COVERED-ELECTRODE ARC

(Specific properties of arc)

S u m m a r y

Characteristics of arcs for acid, rutile, cellulosic, basic, deep-penetration, both ferrous and non-ferrous electrodes. The effect of covering composition on the emission of electrons, arc voltage, cathode drop, melting mode of electrode and spatter. The coverings composed of oxides differ atrongly from those containing also fluorides or chlorides.