

## Условия за устойчивост на процеса на при пренасяне на метала с къси съединения.

Процеса на заваряване с пренасяне на метала с къси съединения [7] се състои от две фази:

- запалване и горене на дъгата по време на които се топи електрода и се образува капката;
- късо съединение по времето на което се пренася метала.

Неустойчивостта на процеса може да се появи и в две фази. По голямата част от изследователите обръщат внимание на първата част от процеса [8,9,10,11 и др.], но за проектиране на източниците и за подводното заваряване особено важно значение има условието за устойчивост във фазата на късо съединение.

За устойчивостта по време на късото съединение съществена роля играят следните явления.

- движението на електрода към ваната с постоянна скорост;
- натрупването на енергия в течния мост между електрода и ваната;
- намалява изпарението на шийката между електрода и капката, имаща характер на електрически взрив.

Устойчивостта на процеса в момента на късо съединение се определя от изпаряването на шийката. Устойчивостта се нарушава в момента в който неразтопения електрод се докосне до повърхността на ваната. За да се образува нова съединителна шийка е необходимо около електрода да се образува свободно пространство. Това е възможно под действието на пондеромоторните сили, но за употребяваните на практика токове на късо съединение тези сили са много малки [7]. Даже да се образуват малки шийки те се ликвидират вследствие на движението на електрода към ваната.

За да се обезпечи устойчивост на процеса на заваряване във фазата на късо съединение е необходимо съединителната шийка между капката и електрода да бъде изпарена за време  $t$ , което да бъде по-малко от времето  $t_k$  необходимо върха на неразтопения тел да се допре до повърхността на заваръчната вана:

$$t < t_k = \frac{l}{V_n}; \quad (1)$$

където:

$l$ - разстояние между неразтопения край на електрода и заваръчната вана;

$V_n$ - скорост на подаване на електрода;

$t$ - време необходимо за изпаряване на шийката.

Времето  $t$  може да се определи от уравнението за енергията определяща се в течната шийка за времето на късо съединение.

$$Q = \int_{(t)} J_{(t)}^2 \cdot R_{(t)}^2 dt \quad (2)$$

Решението на това уравнение за случая когато тока на късо съединение  $J_{к.с}$  се ограничава от омическо съпротивление  $J_{(t)} = J_{к.с} = \text{const}$ , като се отчита изменението на съпротивлението, поради непрекъснатото намаляване на сечението е дадено в работата [12]. Като отстраним члена в квадратните скоби, който е на няколко порядъка по-малък от първия член и не влияе на точността на пресмятането получаваме:

$$Q = 0,48 \cdot \frac{\rho \cdot J_{к.с}^2 \cdot l}{\pi \cdot d_0} \quad (3)$$

където:

$\rho$ - специфичното съпротивление на материала на течната шийка;

$d_0$ - диаметъра на шийката в момента на късото съединение;

Минималната енергия необходима за изпарението на шийката с определен обем:

$$V = \frac{\pi \cdot d_n^2 \cdot l}{4}$$

е равна на:

$$Q_n = \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} \cdot l \cdot q_u \cdot \gamma \quad (4)$$

където:

$d_n$ - диаметър на шийката в момента на взрива;

$q_u$ - атомната топлина на изпарение;

$\gamma$ - плътност на разтопения метал.

Минималната енергия необходима за изпаряването на шийката съответства на най- малак ток на късо съединение, които обезпечава тази енергия за времето на късото съединение  $t$ .

Шийката ще се изпари, когато  $Q = Q_n$  и като се съобразим с (1), (3) и (4) определяме:

$$t = \frac{\pi^2 \cdot d_0^2 \cdot d_n^2 \cdot q_u \cdot \gamma}{1,92 \cdot \rho \cdot J_{к.с \min}^2} \quad (5)$$

$$J_{к.с \min}^2 \phi = \frac{\pi^2 \cdot d_0^2 \cdot d_n^2 \cdot q_u \cdot \gamma}{1,92 \cdot \rho \cdot l} \cdot V_n \quad (6)$$

където:

$d_n$ - диаметър на напречното сечение на шийката в момента на взрива;

Величината  $l$  практически е равна на дължината на дъгата, тъй като размера на капките при заваряване с късо съединение се определя от напрежението и дължината на дъгата [7].

Капката нараства до момента до като се допре до ваната.

Дължината на дъгата може да се определи от следното уравнение:

$$U_d = U_{k.v.} + \varepsilon \cdot l \quad (7)$$

от където:

$$l = \frac{U_d - U_{k.v.}}{\varepsilon} = \frac{U_c}{\varepsilon} \quad (8)$$

където:

$U_d$ - напрежение на дъгата;

$U_{k.v.}$ - сумата на катодното и анодно напрежение;

$\varepsilon$  – градиента на потенциала на дъгата.

Като се има предвид че:

$$U_{k.v.} = 13 + 0,053 \cdot p^{1/3} \cdot J_w^{2/15} \quad (9)$$

където:

$p$ - налягане на околната среда;

$J_w$ -

Диаметъра на напречното сечение на шийката в момента на взрива можем да определим по формулата:

$$d_n^2 = \frac{4 \cdot J_{k.c.min}}{\pi \cdot j} \quad (10)$$

където:

$j$ - постоянна величина определена в работа[17]

Като отчетем (7, 8, 9 и 10) в формула (6)

$$\frac{q_u \cdot \gamma}{\rho \cdot j} = 2,72 \cdot 10^6 \frac{Q_{сек}}{m^2} \quad (11)$$

факта, че за нисковъглеродна стомана и диаметъра на шийката в момента на допиране на капката до повърхността на ваната е  $d_0 = d$  получаваме:

$$J_{k.c.min} \geq 1,78 \cdot 10^6 \cdot \frac{\varepsilon \cdot d}{U_d - 13 - 0,57 \cdot p^{1/3} \cdot J_w^{2/15}} \quad (12)$$

Неравенството (12) е условието за устойчивост на процеса на заваряване с къси съединения. Това условие ни дава възможност да предявим определени изисквания към източника на ток.

Градиента  $\varepsilon$  определен с помощта на снемане с камера съчетано със запис на тока и напрежението. Значенията на  $\varepsilon$  са определени в [18,19,20].

В работа [12] при извода на условието за устойчивост на процеса е сгрешено  $d$  вместо  $d^2$ , поради което има съществено разминаване в резултатите от изчисленията и експеримента.

Изследванията проведени от автора при заваряване с тънка електродна тел на сухо и под вода с използването на защита от  $CO_2$  показват, че  $U_{ак}$  твърде малко зависи от налягането на дъгата и по-добре се описва от формулата:

$$U_{ак} = U_g - \frac{k.Y_3}{U_g} - 0,57.P^{1/3} \quad (13)$$

Ако във формула (12) заменим  $U_{ак}$  със стойността му от (13) получаваме:

$$J_{k.c.min} \geq 1,78.10^6 \cdot \frac{\varepsilon.d^2.V_n.U_g}{k.Y_3 + 0,57.p^{1/3}} \quad (14)$$

По експериментален път се определят стойностите на коефициента “к” който зависи от условията на заваряване, от диаметъра на телта и от характеристиките на електрода.

За определянето на “к” се провеждат експерименти като се записват едновременно тока и напрежението на дъгата при различни диаметри на заваръчния тел. По осцелограмите се определя напрежението на стълба на дъгата, анодно-катодното напрежение и тока на късо съединение. В рамките на постоянния диаметър на телта се променя скоростта на подаване на заваръчната тел и от формула 13 се определя “к”. На фигура 1 е показана зависимостта на коефициента “к” от скоростта на подаване.

В таблица 1 са дадени данните от изчисляването на  $J_{кc min}$  при следните условия:

$\varepsilon = 3.10^{-3} \text{ В/м}$  ;  $\gamma = 7.10^3 \text{ кг/м}^3$  ;  $\rho = 1,2. 10^{-6} \text{ м}^3\text{кг сек}^{-3}\text{а}^{-2}$  ;  $j = 1,4. 10^{11} \text{ ам}^{-2}$  ;  $d = 1,2$  и  $1,6\text{mm}$

Таблица: 1

d, mm	$V_n \cdot 10^{-2}$ , М/сек	$J_{кc min}$ , А	k	
1,2	4,56	214	0,207	
1,2	6,57	249	0,238	
1,2	9,24	294	0,251	
1,6	2,40	211	0,183	
1,6	4,27	267	0,222	
1,6	5,72	338	0,234	

Фиг.2 Зависимост между  $J_{кc min}$  и скоростта на подаване на тела  $V_n$

Експерименталните изследвания на процеса за заваряване в газова среда показват, че ако  $J_{\text{кc}}$  има стойности по-малки от  $J_{\text{кc min}}$  процеса става неустойчив с прекъсвания и разпръскване на метал в околната среда. Прекомерното увеличаване на тока на късо съединение нарушава процеса на пренасяне на метала и увеличава разпръскването в околната среда. Когато тока на късо съединение е в рамките на заштрихованата област на фиг. 2 процеса е устойчив.

Получените резултати от изследването обясняват всеизвестния факт, че всички изследователи препоръчват да се използва за полуавтоматично заваряване твърда или нарастваща характеристика на източника на ток. Както е известно при заваряване с къси съединения много голямо значение за стабилното горене на процеса на заваряване има тока на късо съединение [20]. При ограничаване на тока с баластно съпротивление той достига максималното си значение в началото на късото съединение. При ограничаване на тока  $J_{\text{кc}}$  с дросел максималното му значение зависи от времето на късото съединение. Ако колебания на тока в двата случая не надхвърлят допустимите значения на тока на късо съединение процеса ще протича стабилно. В противен случай процеса може да се наруши или ще се съпровожда с повишено разпръскване на метала.

Изследванията проведени в НПЛ по ТЗП в ТУ- Варна показват посочените по горе резултати при заваряване с падаща характеристика източника на ток, но ако се спази условието за  $J_{\text{кc min}}$  има една падаща характеристика с определен наклон при която процеса се осъществява с отлично качество и стабилизация на дъгата. Необходимата характеристика зависи от средата, от диаметъра на електрода, от скоростта на подаване на телта. При зададени параметри на режима не представлява трудност да се определи наклона на волт-амперната характеристика, като се използва таб. 1 за минималния ток  $J_{\text{кc min}}$ . Например на фиг. 2 е показано как става определянето на тази характеристика при скорост на подаване на телта  $V_{\text{п}} = 6,6 \cdot 10^{-2}$  м/сек; диаметър на телта  $d = 1,2\text{mm}$ ;  $J_{\text{кc min}} = 250\text{A}$ ;  $U_{\text{пк}} = 65\text{V}$ .

Ако режима се намира в ограничената заштрихована област, той ще бъде устойчив, ако режима е извън тази област процеса ще бъде неустойчив. Ако се вземе стандартен източник на ток вероятността да попаднем на необходимата характеристика е много-малка. Това е причината във всички учебни пособия да се препоръчва при полуавтоматично заваряване в газова среда източник с твърда или нарастваща характеристика.

Експериментите проведени от автора при заваряване в подводни условия показва ефективността от използването на падаща характеристика на източника на ток. При падаща характеристика процесите на саморегулиране са по-интензивни. Беше проектиран специален източник на ток за подводно заваряване и рязане на металите за апаратура "Прометей 2М", който позволява да се променят характеристиките на източника в необходимия за използваните диаметри диапазон.

Направените изследвания на тока на късо съединение ни даде възможност да решим един съществен проблем на заваръчната техника и да обосновем възможността за работа при полуавтоматично заваряване с източник с падаща характеристика [21].

Установено е, че колкото по близо е тока на късо съединение до  $J_{\text{кc min}}$  толкова е по малко разпръскването на електродния метал. При заваряване в долно положение минималния ток на късо съединение се ограничава само от условието (14), но при вертикално и таванно положение величината на  $J_{\text{кc}}$  се подбира от условието за пренасяне на метала и формирането на шева. Колкото е по голяма стойността на  $J_{\text{кc}}$  толкова по добре се формира шева. В този случай е по добре тока да бъде ограничаван с индуктивно съпротивление, тъй като ограничаването му с баластно съпротивление увеличава размера на капките и затруднява пренасянето им във ваната. В долно положение образуването на голяма капка не се отразява на формирането на шева тъй като гравитационната сила я насочва към ваната.

За да се изследва влиянието на късото съединение върху пренасянето на метала в заваръчната вана и респективно върху устойчивостта на процеса бе разработен специален транзисторен ключ който дава възможност да се включва и изключва тока в различни моменти от заваръчния цикъл. Ключа дава възможност да се включва и изключва индуктивното или активното съпротивление.

В момента на допирание на капката до повърхността на заваръчната вана се изключва тока на късо съединение за 1-2 мсек. Това довежда до съкращаване на времето на късо съединение и увеличава честотата на пренасяне на капките в заваръчната вана. Този процес показва действието на електродинамичните сили. При непрекъснато действие на тока на късото съединение в момента на допирание на капката до повърхността на заваръчната вана площта на допирание е много по- малка от тази на шийката и електродинамичната сила е насочена от ваната към капката и противодейства на пренасянето на капката. Когато площта на допира между капката и ваната стане по голяма от площта на шийката се включва тока и капката се пренася в заваръчната вана под действието на електромагнитната сила която е насочена към ваната.

Изключването на тока в момента на късо съединение не дава положителен резултат при полуавтоматично заваряване. Едновременното заснемане на процеса със скоростна камера СК- 4 показва, че вследствие на непрекъснатото подаване на телта в дъгата по време на късото съединение не се образува шийка между тела и капката, което не променя направлението на електродинамичната сила и пречатства пренасянето на капката.

За изследване на едновременното влияние на активното и индуктивното съпротивление на  $J_{\text{кc}}$  бе изработена специална санкционирана индуктивност с 0,2; 0,4; 0,6 и 0,8мН. При използването само на индуктивност в заваръчната верига най-добри резултати се получават при 0,4мН.

При едновременно използване на индуктивно и активно съпротивление влиянието на процеса се определя от индуктивното съпротивление. В този случай интерес представлява шунтирането на индуктивното съпротивление в определен момент по време на късото съединение. В първоначалния момент индуктивното

забавя скоростта на нарастване на тока, което дава възможност на капката да увеличи повърхността на контакта със заваръчната вана. При шунтиране на индуктивното съпротивление тока на късото съединение моментално нараства и се ограничава от баластния реостат. Времето на действие на индуктивното съпротивление и неговата стойност имат решаващо значение за устойчивостта на процеса. Малката стойност на индуктивното съпротивление не ограничава достатъчно нарастването на тока и процеса става нестабилен. Най-добри резултати се получават при стойност на индуктивното съпротивление 0,6-0,8мН, като също се изключва на 1/3 до 1/2 от времето на късото съединение. Задължително трябва да се спазва условието  $J_{кc}$  да е малко по-голямо от  $J_{кc \text{ min}}$ .

Има възможност да се използва насищаща се индуктивност със стойност 0,2-0,3мН. В процеса на заваряване при нарастване на тока индуктивността намалява скоростта на нарастване на тока, а след насищането нейното действие се прекратява и параметрите на заваръчната верига се определят активното съпротивление.

В заключение може да се каже следното:

1. На базата на определяне на минималната енергия за изпаряване на шийката определяме минималния ток на късо съединение при който съществува устройство, процес на заваряване. Получена е формула, която ни дава възможност да определим  $J_{кc \text{ min}}$  като използваме параметрите на процеса на заваряване.

2. Предложена е нова формула за определяне на  $U_{ак}$  и експериментално са определени стойностите на коефициента "к".

3. Доказана е възможността за използване на падаща характеристика на източника на ток при полуавтоматично заваряване в газова среда над и под вода.

4. Изследвано е влиянието на индуктивното и активното съпротивление върху устойчивостта на дъгата и времето на прилагане и стойността на тока на късо съединение.

### Използвана литература

1. Г.И. Лесков. Электрическая сварочная дуга. Москва.1970г.
2. В.А. Ленивкин и др. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. Москва.1989г.
3. И.Г. Кесаев. Катодные процессы электрической дуги. М.1968г.244с.
4. В.А. Колмыков, Агеев П.Я. Металургия дуговой сварки.
5. О.Я.Новиков. Устойчивость электрической дуги. Энергия1978
6. Э.П. Сеидж, Дж.П. Мелса . Идентификация систем управления.М.Наука 1974г.
7. И.И.Заруба. Условия устойчивости процесса сварки с короткими замыканиями. Автоматическая сварка.№2,1971
8. И.К.Походня и др. Критерии оценки стабильности процесса дуговой сварки на постоянном токе.
9. В.М.Язовский и др. Методика стабильности горения сварочной дуги.Св.производство №4, 1997.
- 10.М.В.Пентегов. Анализ переходных процессов в сварочной дуге при комутации электрических цепей .Ав.сварка,№7,1988г.



11. М.В.Пентегов. Математическая модель столба динамической электрической дуги. Ав.сварка,№6,1976г
12. И.И.Заруба. Условие устойчивости процесса сварки с короткими замыканиями, Ав.сварка,№2,1971г.
13. Н.Я. Ников , НиковБ.Я., Ников Д.Я. Изследване на устойчивостта на източника електрическа дъга при полуавтоматично заваряване под вода. Международен конгрес , ТУ Варна2002г.
14. Ю.Л.Ищенко, Дюлгеров. О механизме периодических замыканий дугового промежутка и стабильности при сварке короткой дугой. Св.производство №9, 1963г.стр.17-20.
15. Э.П. Мелса Дж.Л. Иденфикация системем управления.М.Наука, 1974 стр.57-60
16. И.В.Пентегов, Сидорец В.Н.Энергетические параметры в математической модели динамической сварочной дуги. Ав.сварка,№11,1988г.стр13-16.
17. И.И.Заруба, Дыменко В.В. Влияния короткого замыкания дугового промежутка жидким металлом на устойчивости процесса сварки. Св.производство №8, 1983г.стр.7-9.