

СПЕЦІАЛЬНІ РОЗРОБКИ

УДК 621.791.752

А.В. Гуляєв,

кандидат технічних наук,
головний науковий співробітник ДНДІ МВС України, м. Київ,

М.П. Будзинський,

кандидат юридичних наук, завідувач лабораторії ДНДІ МВС України, м. Київ,

О.В. Диких, начальник відділу ДНДІ МВС України, м. Київ

ВИБІР СПОСОБУ КЕРУВАННЯ ПЕРЕНОСОМ ЕЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛУ ПРИ МЕХАНІЗОВАНОМУ ЗВАРЮВАННІ МОДУЛЬОВАНИМ СТРУМОМ

У статті на підставі аналізу сил, які діють на краплю рідкого металу електрода при механізованому зварюванні, показано, що сила тяжіння, а також електродинамічна сила можуть бути використані для прискорення відриву краплі рідкого металу від торця електрода, таким чином забезпечуючи перехід до дрібнокраплинного переносу рідкого металу.

За результатами аналізу визначено перспективне направлення керування переносом електродного металу в процесі механізованого зварювання модульованим струмом та можливість отримання більш якісного шару наплавленого металу, а також зменшення температурного впливу на основний метал.

Ключові слова: механізоване зварювання, електродний метал, перенесення електродного металу.

В статье на основании анализа сил, действующих на каплю жидкого металла электрода при механизированной сварке, показано, что сила тяжести, а также электродинамическая сила могут быть использованы для ускорения отрыва капли жидкого металла от торца электрода, тем самым обеспечивая переход к мелкокапельному переносу жидкого металла.

За результатами анализа определено перспективное направление управления переносом электродного металла, в процессе механизированной сварки модулированным током и возможность получения более качественного слоя наплавленного металла, а также уменьшение температурного воздействия на основной метал.

Ключевые слова: механизированная сварка, электродный метал, перенос электродного металла.

In the paper, on the basis of an analysis of the forces acting on the drop of a liquid metal electrode in mechanized welding, it is shown that gravity and electrodynamic force can be used to accelerate the separation of a drop of a liquid metal from the end of the electrode, thus ensuring the transition to the fine-grained transfer of the liquid metal.

According to the results of the analysis, the perspective direction of the transfer of electrode metal in the process of mechanized welding with modulated current and the possibility

of obtaining a better layer of the weld metal, as well as reducing the temperature influence on the base metal, was determined.

Keywords: *mechanized welding, electrode metal, electrode metal transfer.*

Низкою досліджень [1; 2; 3] встановлено, що на метал електродного дроту, який плавиться, діє комплекс сил, що визначає час відриву краплі від торця електродного дроту та характер переносу краплі в дуговому просторі. Це сила поверхневого натягу $F_{\text{пн}}$ рідкого металу, електродинамічна сила $F_{\text{ед}}$ сила реактивного тиску пару і газу F_p , що утворюється у краплі, сила тиску заряджених часток та потоків плазми дуги $F_{\text{пмп}}$ сила тяжіння F_T та сила тиску газового потоку F_g , який використовується для захисту рідкого металу від атмосфери.

Величина і напрямок дії зазначених сил залежать від безлічі факторів, причому їх величина може змінюватися в досить широких межах, а напрямок дії окремих сил може змінюватися на протилежне залежно від умов проведення електрозварювального процесу. Очевидно тому, а також через труднощі вивчення швидкоплинних процесів у технічній літературі зустрічаються суперечливі дані, а оцінка процесів, що відбуваються, часто дається на рівні гіпотези. Тому важливо встановити сили, що чинять істотний вплив, і визначити можливість керування процесом плавлення і переносу з метою досягнення необхідних показників властивостей зварювального шву.

Узагальнюючи наявну в літературі інформацію, можна дати таку характеристику силам, що діють при електродуговому процесі.

Сила поверхневого натягу $F_{\text{пн}}$ зумовлена дією міжмолекулярного притягання, прагне надати розплавленому металові на торці електродного дроту сферичну форму, а краплі – форму кулі при її переміщенні в дуговому просторі.

На початковій стадії утворення краплі, коли відсутня шийка, місцем прикладення сили поверхневого натягу може бути прийнята площина, що проходить по лінії розподілу між твердим і рідким металом. У цьому випадку силу поверхневого натягу можна розкласти на складові: осьову силу $F_{\text{пно}}$, що утримує краплю на торці електродного дроту (далі – електрода), і радіальну силу $F_{\text{пнр}}$, що прагне стиснути рідкий метал по лінії розділу і утворити шийку (рис. 1 а):

$$F_{\text{пно}} = 2 \pi \sigma R_e \cos \varphi; \quad (1)$$

$$F_{\text{пнр}} = 2 \pi \sigma R_e \sin \varphi, \quad (2)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу матеріалу електрода в рідкому стані при заданій температурі в місці прикладення сили поверхневого натягу, Н/м;

R_e – радіус електрода, м;

φ – кут між лінією розподілу твердого і рідкого металу на торці електрода і радіусом краплі, проведеним до крайньої зовнішньої точки границі розподілу, град.

З утворенням шийки на лінії розподілу твердого і рідкого металу місцем дії сили поверхневого натягу буде вже площина, що проходить через мінімальний перетин шийки рідкого металу (рис. 1 б). У випадку скривлення поверхні відповідно до закону Лапласа повний внутрішній тиск відрізняється від молекулярного на величину капілярного тиску

$$p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (3)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н\м;
 R_1, R_2 – радіуси головної кривизни, м.

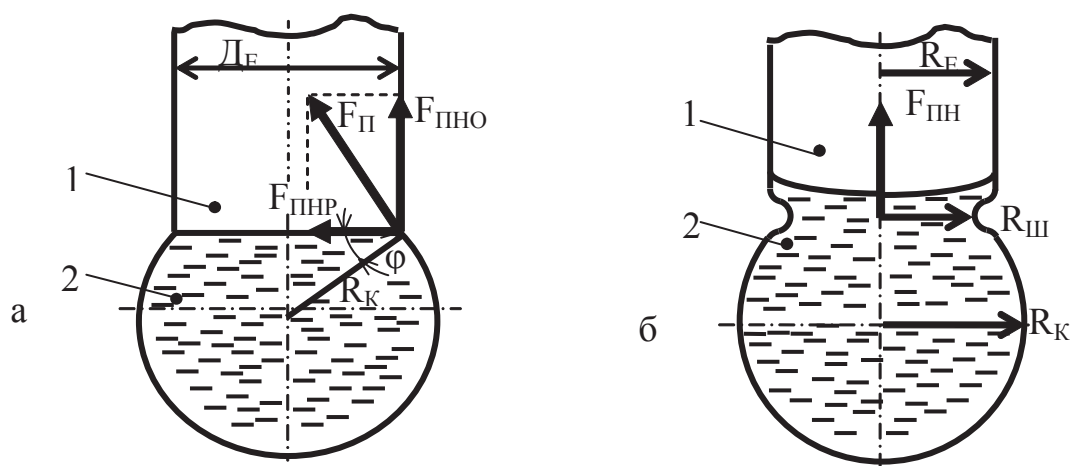


Рис. 1. Схема дії сили поверхневого натягу до утворення шийки (а) і після утворення шийки (б): 1 – електродний дріт; 2 – рідкий метал

Величина сили поверхневого натягу для рідкого металу, що створюється на торці електрода і має кульову поверхню, визначається згідно з [1; 2]:

$$F_{ПН} = \frac{2\sigma}{R_p} \pi R_e^2, \quad (4)$$

де R_e – радіус електродного дроту, м;

R_p – радіус кривизни поверхні рідкого металу, м.

Таким чином, сила поверхневого натягу на початку утворення краплі рідкого металу сприяє утворенню шийки, однак у цілому перешкоджає відривові краплі від поверхні електродного дроту. У цей час вона сприяє злиттю краплі з рідким металом зварювальної ванни після переносу краплі на поверхню деталі, але цей фактор уже не може бути використаний для керування процесом переносу.

Як видно з (4), силу поверхневого натягу можна зменшити шляхом збільшення розміру краплі і зменшення діаметра електродного дроту. Однак збільшення розміру краплі веде до небажаного великокрапельного переносу. Зменшення діаметра суцільного електродного дроту обмежується характеристикою його міцності, а саме можливістю деформації при подачі в зону горіння дуги механізмом подачі, що веде до зриву електродугового процесу.

Величина коефіцієнта поверхневого натягу σ залежить від природи рідини і температури. З урахуванням температури, коефіцієнт поверхневого натягу рідкого металу обчислюється за формулою Етвеша [3]:

$$\sigma = 2,1 \frac{T_{кр} - T_{к}}{\sqrt{(\mu / \gamma)^3}}, \quad (5)$$

де $T_{кр}$ – критична температура для цього металу, °K (за правилом Гульберга;
 $T_{кр} = 3/2 T_{кип}$, де $T_{кип}$ – температура кипіння металу, °K;
 $T_{к}$ – температура краплі в цей момент, °K;
 γ – питома вага;
 μ – молекулярна вага металу.

Отже, сила поверхневого натягу з урахуванням (4) і (5) може бути визначена як

$$F_{ни} = 4,2\pi \frac{(T_{кр} - T_{к})R_e^2}{\sqrt{(\mu / \gamma)^3} \cdot R_p}, \quad (6)$$

Як видно з формули (6), силу поверхневого натягу можна зменшити (і таким чином прискорити відрив краплі від торця електродного дроту та зменшити розмір краплі), збільшуючи температуру краплі рідкого металу. Однак для цього потрібно збільшити струм зварювання, що неприйнятно для більшості тонкостінних деталей озброєння та військової техніки. Отже, ми не можемо скористатися цим прийомом для керування процесом наплавлення.

Як відомо, для зменшення поверхневого натягу в рідину додають поверхнево-активні речовини. Це явище використовують також і при зварювальному процесі, зокрема додаються поверхнево-активні речовини в обмазку електродів, до складу флюсів і в шихту порошкового дроту. Водночас кількість цих речовин має бути збалансована стосовно інших компонентів, бо це уже закладено в існуючих зварювальних матеріалах в оптимальній пропорції і не може бути змінено. Таким чином, можливість зменшення поверхневого натягу шляхом впливу поверхнево-активними речовинами для наявних зварювальних матеріалів вичерпаній, і тому цей прийом може бути використаний для керування процесом зварювання деталей ОВТ тільки при розробці нових зварювальних матеріалів.

Електродинамічна сила $F_{ЕД}$ викликана взаємодією провідника зі струмом, яким є крапля рідкого металу і стовп дуги, з магнітним полем, який ініційований згаданим струмом. При цьому виникає сила, що спрямована радіально до осі провідника і прагне зжати провідник, у тому числі і краплю рідкого металу (рис. 2а). Ця сила сприяє утворенню шийки і таким чином, відривові краплі від електродного дроту. Вона може бути визначена за формулою [4]:

$$F_{ЕДР} = 5,1 \cdot 10^{-6} I^2, \quad (7)$$

де I – струм у провіднику (електродному дротіві), А.

Водночас, якщо перетин провідника перемінний, як у випадку наплавлення електродом, що плавиться (у цьому випадку розглядають провідник, що складається з ділянок електрод – крапля – активна пляма (зона впливу ліній електричного струму) – стовп дуги), то, крім осьової складової, виникає осьове

зусилля, спрямоване від меншого перетину до більшого. Тоді електродинамічна сила дорівнює [5]:

$$F_{ED} = AI^2 \left(1 + 4,6 \cdot \lg \frac{R_1}{R_2} \right), \quad (8)$$

де $A = 5 \cdot 10^{-8} \text{ Н/А}^2$ – коефіцієнт пропорційності;

I – струм зварювання (наплавлення), А;

R_1 – радіус більшого перетину, м;

R_2 – радіус меншого перетину, м.

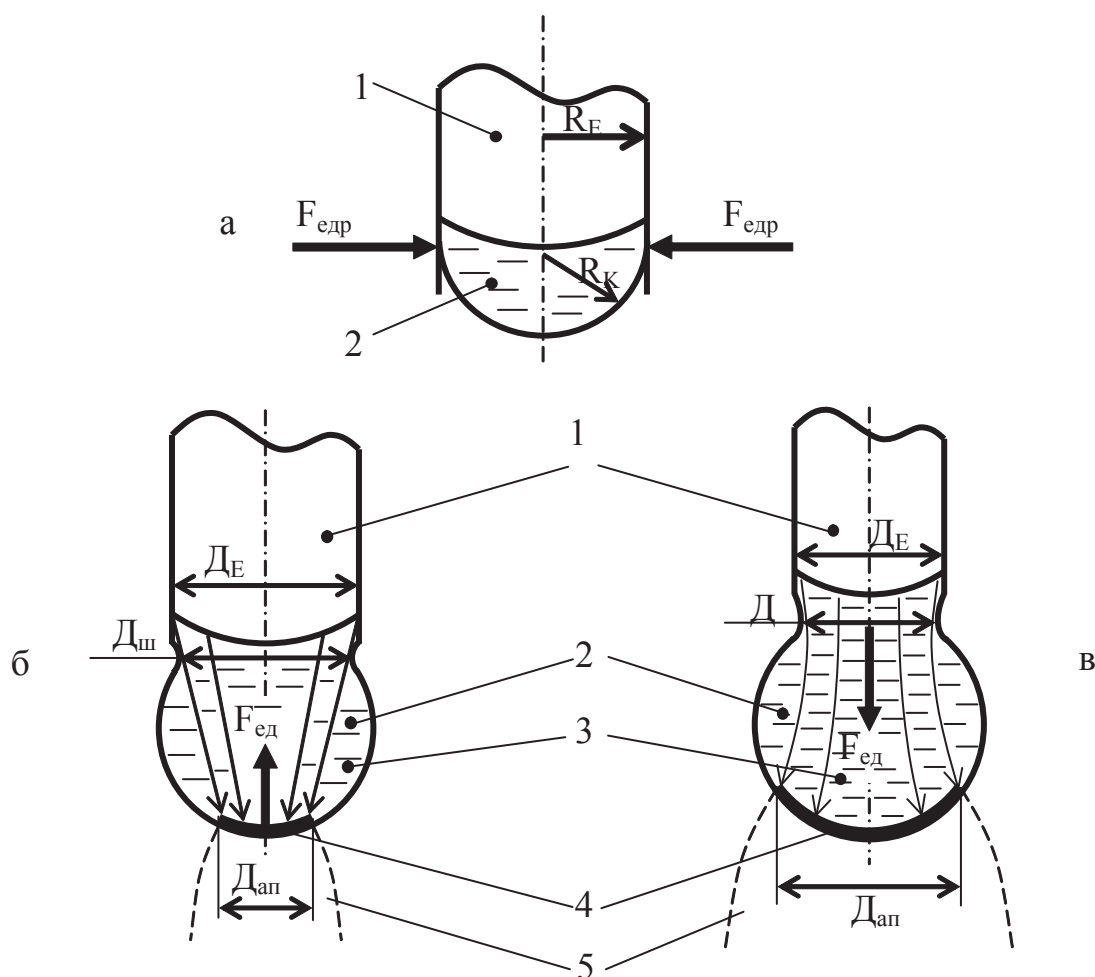


Рис. 2. Схема дії електродинамічної сили $F_{ед}$ до утворення шийки (а), після утворення шийки при $D_{ш} < D_E$ і $D_{ап} < D_{ш}$ (б), та після утворення шийки при $D_{ш} \approx D_E$ і $D_{ап} > D_{ш}$ (в): 1 – електродний дріт; 2 – рідкий метал; 3 – лінії струму; 4 – активна пляма; 5 – стовп дуги.

Як відзначають дослідники [1; 5], величина і напрямок електродинамічної сили в процесі росту краплі не залишаються постійними і залежать від діаметра стовпа дуги, зумовленого, у свою чергу, діаметром активної плями. На початку утворення краплі, коли під дією сили поверхневого натягу $F_{пн}$ і стискаючої радіальної електромагнітної сили F_{EDP} у місці розділу твердого електрода і рідкого

металу з'являється шийка, $R_{ш}$ стає менше R_e , тобто $R_1 = R_e$ і $R_2 = R_{ш}$. У цьому випадку виникає осьова сила $F_{ЕД1}$, що перешкоджає відривові краплі від торця електрода (рис. 2 б). У цей же час діаметр активної плями (стовпа дуги) менший, ніж діаметр шийки, а у місці переходу "активна пляма – стовп дуги" виникає осьова сила $F_{ЕД2}$, що також перешкоджає відриву краплі.

У міру збільшення розміру краплі збільшується діаметр шийки і діаметр активної плями. У певний момент часу діаметр шийки $d_{ш}$ стає приблизно рівним діаметрові електрода d_e , і величина осової сили $F_{ЕД1}$ стає незначною. Водночас істотно збільшується діаметр активної плями $d_{ан}$, і коли він стає більше діаметра шийки $d_{ш}$, напрямок дії осової сили $F_{ЕД}$ змінюється, і виникаюча сила $F_{ЕД3}$ сприяє відривові краплі від торця електрода (рис. 2 в). У цьому випадку можна записати

$$F_{ед} = AI^2 \left(1 + 4,6 \cdot \lg \frac{R_{cm}}{R_e} \right), \quad (9)$$

де $R_{ст}$ – радіус основи стовпа дуги.

Радіус основи стовпа дуги при зварюванні СПД можна визначити за формулою [5]:

$$R_{cm} = \frac{\sqrt{I^3}}{1,25 \sqrt{U^3}} = 0,8 \sqrt{\frac{I^3}{U^3}}, \quad (10)$$

де I – струм зварювання (наплавлення), А;

U – напруга дуги, В.

При дрібнокрапельному переносі рідкого металу можна прийняти $R_{cm} = R_p$, де R_p – радіус краплі.

Як впливає з формули (9), величина електромагнітної сили пропорційна квадратові величини струму наплавлення. Крім того, за певних умов (розмір краплі) електромагнітна сила спрямована на відрив краплі від електрода. Тому виникає питання, а чи можна використовувати цю силу для керування переносом електродного металу, зокрема, для прискорення відриву краплі від торця електрода? Наприклад, шляхом різкого підвищення сили струму зварювання на короткий період до моменту відриву краплі.

Сила реактивного тиску пару і газу F_p , що утворюється у краплі (далі – реактивна сила газу) у визначених умовах може вплинути на процеси переносу рідкого металу.

Розплавлений метал на електроді і виробі в зоні активних плям знаходиться при температурі, близькій до температури кипіння, і тому з активних плям відбувається інтенсивний випар металу. Крім того, хімічна взаємодія рідкого металу зі шлаком або газовою сферою викликає утворення і виділення газу. Усе це призводить до виникнення реактивних сил, рівнодіюча яких прикладена до центру активної плями [1].

Величина реактивних сил залежить від розмірів активних плям, щільності струму в них, теплофізичних властивостей матеріалу, а тому їх теоретичне

визначення ще не вирішене. В окремому випадку для зварювання в середовищі вуглекислого газу експериментально встановлено, що приблизно реактивну силу можна обчислити за формулою [3]:

$$F_p = k I^2, \quad (11)$$

де k – коефіцієнт, рівний 0,03 Н/А² при зварюванні дротом Св-08М2С;

I – струм наплавлення, А.

Дослідженнями [1; 2; 5] встановлено, що вплив реактивного тиску у відчутній мірі виявляється при зварюванні на прямій полярності, а при зварюванні на зворотній полярності він істотно менший сили поверхневого натягу й електродинамічної сили, і його впливом можна зневажати. Водночас відомо, що з погляду стійкості горіння дуги переважає зварювання на зворотній полярності.

Сила тиску потоків плазми електричної дуги $F_{пл}$ є найменше вивченою. Існує лише наближена оцінка тиску потоків плазми на метал електрода, а отже, і на краплю рідкого металу. Згідно з [6] потоки плазми утворюються в результаті випару металу і дії електродинамічних сил. У електричній дузі одночасно існують два потоки, спрямовані зустрічно: анодний і катодний. Величина тиску потоку залежить від енергії, що виділяється на електродах, яким є джерелом металу, що випаровується.

Експериментальні дані про величини тиску потоків плазми на електроди відсутні. Як зазначено в роботі [3], наближені розрахунки дають значення сили тиску $F_{пл}$ на один – два порядки менше електродинамічної сили і сили поверхневого натягу. Внаслідок цього розглядати силу тиску плазми як фактор цілеспрямованого керування дуговим процесом у цей час недоцільно.

Сила тиску газового потоку F_G виявляє себе при використанні в процесі зварювання і наплавлення для захисту розплавленого металу газів від атмосфери, що або подаються в зону дуги разом з подачею електродного дроту, або утворюються внаслідок плавлення покриття електрода або шихти всередині його, як у випадку застосування самозахисного порошкового дроту.

В будь-якому випадку сила тиску газового потоку F_G визначається тиском газу на частку поверхні краплі рідкого металу [7]:

$$F_G = P_G \cdot S_{pG}, \quad (12)$$

де P_G – тиск газового потоку, Па;

S_{pG} – площа поверхні краплі рідкого металу, на яку діє газовий потік, м².

Як правило, газовий потік спрямований від електрода до поверхні деталі, і тому він сприяє відривові краплі від торця електрода.

Сила тяжіння F_T , як відомо, визначається масою рідкого металу на торці електрода і силою тяжіння Землі.

Оскільки при механізованому зварюванні електрод, зазвичай, знаходиться над деталлю і напрямом сили тяжіння рідкого металу збігається з напрямком падіння краплі вниз з торця електрода на деталь, то сила F_T сприяє відривові краплі від електрода й у загальному виді визначається як [7]:

$$F_T = m_p g, \quad (13)$$

де m_p – маса рідкого металу, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Якщо прийняти, що крапля має сферичну форму, усічену шийкою, то силу тяжіння такої краплі можна виразити через її геометричний розмір:

$$F_T = \alpha \frac{4}{3} \pi R_p^3 \rho g, \quad (14)$$

де α – коефіцієнт, що враховує ступінь усікання сфери краплі;

R_p – радіус краплі, м;

ρ – щільність металу краплі при температурі його плавлення, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Таким чином, аналіз показав, що сила тяжіння, а також електродинамічна сила можуть бути використані для прискорення відриву краплі рідкого металу від торця електрода, таким чином забезпечуючи перехід до дрібнокраплинного переносу рідкого металу. Для цього необхідно забезпечити додаткове прискорення краплі рідкого металу, наприклад шляхом різкої зміни швидкості подачі електрода. При цьому також відбудеться різка зміна зварювального струму, а значить збільшиться електродинамічна сила, що впливає на відрив краплі рідкого металу.

Слід зазначити, що однією з безумовних вимог до параметрів раціонального режиму, який забезпечує необхідні значення показників зварювання (наплавлення), є можливість регулювання їх значень у визначених межах, що має забезпечуватися конструкцією обладнання для зварювання (наплавлення).

Раціональна розробка технологічних процесів зварювання дає можливість більш якісно здійснити вибір способу зварювання чи відновлення деталей наплавленням в ході експлуатації військової та спеціальної техніки Міністерства внутрішніх справ України, який забезпечить найбільшу стійкість до дії вражаючих факторів та їх довговічність при найменших витратах на їх ремонт або виготовлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением /Под ред. акад. Б.Е. Патона. Москва: Машиностроение, 1974. 768 с.
2. Металлургия дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов / Под ред. И.К. Походни. Киев: Наукова думка, 1990, 224 с.
3. Патон Б.Е., Шейко П.П. Управление переносом металла при дуговой сварке плавящимся электродом. Автоматическая сварка. 1965. № 5. С. 1–7.
4. Багрянский К.В., Добротина З.В., Хренов К.К. Теория сварочных процессов. Киев: Вища школа, 1976. 424 с.
5. Дятлов В.И. Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке. Новые проблемы сварочной техники. Киев, 1964.
6. Потаповский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Москва: Машиностроение, 1974. 240 с.
7. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. Москва: Физматгиз. 1962. 362 с.

Отримано 15.02.2018

Рецензент Марченко О.С., к.т.н.