

PACS numbers: 47.55.D-, 61.20.Mv, 61.25.Mv, 62.20.-x, 81.20.Vj, 89.20.Bb

## Дослідження управління якістю з'єднання сталевих деталей через керування процесами електродугового зварювання

А. В. Гуляєв, І. П. Даценко\*, Д. В. Смерницький,  
М. П. Будзинський, О. В. Диких

*Державний науково-дослідний інститут  
Міністерства внутрішніх справ України,  
пров. Євгена Гуцала, 4а,  
01011 Київ, Україна*

*\*Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського,  
просп. Повітрофлотський, 28,  
03049 Київ, Україна*

У статті на підставі аналізу сил, що діють на краплю рідкого металу електроду під час механізованого зварювання, показано, що сила тяжіння, а також електродинамічна сила можуть бути використані для прискорення відриву краплі від торця електрода, тим самим забезпечуючи перехід до дрібнокрапельного переносу рідкого металу. За результатами аналізу визначено перспективний напрям керування переносом електродного металу в процесі механізованого зварювання модульованим струмом та наведено результати експериментальних досліджень, які підтвердили можливість і доцільність зварювання самозахисним порошковим дротом з його переривчастою подачею та отримання якісного шару наплавленого металу, а також зменшення температурного впливу на основний метал.

**Ключові слова:** механізовані зварювання та наплавлення, електродний метал, перенесення електродного металу, електродугові процеси.

Corresponding author: Andriy Volodymyrovych Hulyayev  
E-mail: [dusik71@i.ua](mailto:dusik71@i.ua)

*State Research Institute of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine,  
4a Yevhen Hutsalo Lane, UA-01011 Kyiv, Ukraine*

*\*The National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskyy,  
28 Povitroflotskyy Ave., UA-03049 Kyiv, Ukraine*

Citation: A. V. Hulyayev, I. P. Datsenko, D. V. Smernyts'kyy, M. P. Budzyns'kyy, and O. V. Dykykh, Investigation of the Quality Management of Steel Details Connection due to Control of Arc Welding Processes, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 4: 549–564 (2019), DOI: [10.15407/mfint.41.04.0549](https://doi.org/10.15407/mfint.41.04.0549).

Based on the analysis of the forces acting on the drop of a liquid metal of an electrode during mechanized welding, this article shows that gravity and electrodynamic forces can be used to accelerate the drop detachment from the tip of electrode. This provides a transition to the transfer of micron scale liquid metal droplets. According to the results of analysis, the perspective direction of the electrode metal transfer management during the process of mechanized welding with modulated current is determined. The results of experimental studies are presented. They confirm the possibility and suitability of the facing by self-protecting powder wire with its intermittent feed and the obtainment of a high-quality layer of weld metal as well as the decrease of the temperature influence on a base metal.

**Key words:** mechanized welding and facing, electrode metal, electrode metal transfer, electric arc processes.

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 от торца электрода, тем самым обеспечивая переход к мелкокапельному переносу жидкого металла. По результатам анализа определено перспективное направление управления переносом электродного металла в процессе механизированной сварки модулированным током и приведены результаты экспериментальных исследований, которые подтвердили возможность и целесообразность наплавки самозащитной порошковой проволокой с её прерывистой подачей и получения качественного слоя наплавленного металла, а также уменьшения температурного воздействия на основной металл.

**Ключевые слова:** механизированная сварка и наплавка, электродный металл, перенос электродного металла, электродуговые процессы.

*(Отримано 9 серпня 2018 р.; остаточн. варіант — 13 лютого 2019 р.)*

Одним із перспективних напрямів удосконалення механізованого зварювання є управління потужністю дуги, а отже, і процесом перенесення електродного металу, що має істотний вплив як на стійкість горіння дуги, так і на формування наплавленого металу.

Останнім часом все більше уваги приділяється дуговому механізованому зварюванню з імпульсним впливом на процес за рахунок імпульсів струму від спеціальних джерел (імпульсно-дуговий процес [1]) або застосування імпульсної чи переривчастої подачі електродного дроту. Ці впливи дають певні переваги порівняно зі стаціонарними (незмінними) процесами.

Як показав аналіз літературних джерел [1–8], серед способів управління потужністю дуги перспективним є управління шляхом зміни швидкості подачі електродного дроту за певним законом. Цей спосіб є різновидом механізованого електродугового зварювання модульованим струмом.

У технічній літературі існує ряд джерел, в яких розглядаються питання, пов'язані з особливостями використання імпульсної подачі електродного дроту [2] і технічними засобами реалізації такого процесу (руху) [3, 5]. Однак недостатню увагу приділено дослідженням, що пов'язані із впливом змінної швидкості подачі на параметри дугового процесу, стосовно такої важливої характеристики, як зв'язок між режимами механізованого електродугового зварювання з модуляцією подачі дроту та властивостями зварних з'єднань. Тому в статті розглядаються процеси, які проходять за схемою електродний дріт–дуга–зварне з'єднання, з метою розкриття механізму формування зварного з'єднання.

Знання цих закономірностей необхідне як для визначення параметрів руху електродного дроту до зони горіння дуги і елементів керування переносом електродного металу до зварювальної ванни, так і для оцінки впливу змін в системі подачі на формування зварного шва і характеристики процесу зварювання загалом.

Ці дослідження проводилися на прикладі зварювання, в якому як присадний матеріал використовувався самозахисний порошковий дріт (СПД). Це було обумовлено тим, що впродовж останніх років відбувається постійне збільшення обсягів використання таких матеріалів у промисловому виробництві.

Низкою досліджень [9–16] встановлено, що на метал електродного дроту, який плавиться, діє комплекс сил, який визначає час відриву краплі від торця електродного дроту та характер переносу краплі у дуговому просторі. Це сила поверхневого натягу  $F_{\text{пн}}$  рідкого металу, електродинамічна сила  $F_{\text{ед}}$ , сила реактивного тиску пару і газу  $F_{\text{р}}$ , що утворюється у краплі, сила тиску заряджених часток та потоків плазми дуги  $F_{\text{пп}}$ , сила тяжіння  $F_{\text{т}}$  та сила тиску газового потоку  $F_{\text{г}}$ , який використовується для захисту рідкого металу від атмосфери.

Величини і напрями дії зазначених сил залежать від багатьох факторів, причому їх величина може змінюватися в досить широких межах, а напрям дії окремих сил може змінюватися на протилежний залежно від умов проведення електрозварювального процесу. Очевидно, з цих причин, а також через труднощі вивчення швидкоплинних процесів, у технічній літературі трапляються суперечливі дані, а оцінка процесів, що відбуваються, часто дається на рівні гіпотези. Тому важливо встановити сили, що мають істотний вплив і визначити можливість керування процесом плавлення і переносу з метою досягнення необхідних показників властивостей зварного з'єднання.

Узагальнюючи наявну в літературі інформацію, можна дати наступну характеристику силам, що діють під час електродугового процесу. Сила поверхневого натягу  $F_{\text{пн}}$  зумовлена дією міжмолекулярного притягання і визначає сферичну форму розплавленого ме-

тала на торці електродного дроту, а для краплі — форму кулі під час її переміщення в дуговому просторі.

На початковій стадії утворення краплі, коли відсутня шийка, місцем докладання сили поверхневого натягу може бути обрана площина, що проходить по лінії розділу 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 (електроду), і радіальну силу  $F_{\text{ПНР}}$ , що прагне стиснути рідкий метал по лінії розділу і утворити шийку (рис. 1, а):

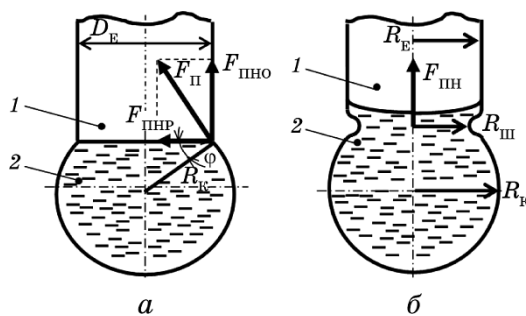
$$F_{\text{ПНО}} = 2\pi\sigma R_e \cos \varphi, \quad (1)$$

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

де  $\sigma$  — коефіцієнт поверхневого натягу матеріалу електроду в рідкому стані при заданій температурі в місці прикладення сили поверхневого натягу (Н/м),  $R_e$  — радіус електроду (м),  $\varphi$  — кут між лінією розділу твердого і рідкого металу на торці електроду і радіусом краплі, проведеним до крайньої зовнішньої точки границі розділу (град).

З утворенням шийки на лінії розділу 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:

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



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

**Fig. 1.** Diagram of action of the surface tension force before the formation of neck (а) and after that (б): 1—electrode wire, 2—liquid metal.

де  $R_1, R_2$  — радіуси головної кривизни (м).

Величина сили поверхневого натягу для рідкого металу, що створюється на торці електроду і має сферичну поверхню, визначається згідно з [9, 10]:

$$F_{\text{ПН}} = \frac{2\sigma}{R_{\text{к}}} \pi R_{\text{е}}^2, \quad (4)$$

де  $R_{\text{е}}$  — радіус електродного дроту (м),  $R_{\text{к}}$  — радіус кривизни поверхні рідкого металу (м).

Таким чином, сила поверхневого натягу на початку утворення краплі рідкого металу сприяє утворенню шийки, однак загалом перешкоджає відриву 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 формули (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 під час подачі в зону горіння дуги механізмом подачі, що веде до зриву електродугового процесу.

Величина коефіцієнта поверхневого натягу  $\sigma$  залежить від природи рідини і температури. З урахуванням температури коефіцієнт поверхневого натягу рідкого металу обчислюється за формулою Етвеша [11]:

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

де  $T_{\text{кр}}$  — критична температура для цього металу (К) (за правилом Гульберга  $T_{\text{кр}} = (3/2)T_{\text{кип}}$ , де  $T_{\text{кип}}$  — температура кипіння металу, К),  $T_{\text{к}}$  — температура краплі в конкретний момент часу (К),  $\gamma$  — питома вага,  $\mu$  — молекулярна вага металу.

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

$$F_{\text{ПН}} = 4,2\pi \frac{(T_{\text{кр}} - T_{\text{к}})R_{\text{е}}^2}{\sqrt{(\mu / \gamma)^3} R_{\text{к}}}, \quad (6)$$

Відповідно до формули (6), силу поверхневого натягу можна зменшити (і тим самим прискорити відрив краплі від торця електродного дроту та зменшити розмір краплі), збільшуючи температуру

краплі рідкого металу. Однак для цього потрібно збільшити силу струму зварювання, що неприйнятно для більшості тонкостінних деталей, які зварюються. Отже, ми не можемо скористатися цим прийомом для керування процесом зварювання.

Як відомо, для зменшення поверхневого натягу в рідину додають поверхнево-активні речовини. Це явище використовують також і при зварювальному процесі, зокрема додають поверхнево-активні речовини в обмазку електродів, до складу флюсів і в шихту порошкового дроту. Водночас кількість цих речовин має бути збалансованою відносно 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 вичерпано, але цей прийом може бути використаний під час розробки нових зварювальних матеріалів.

Електродинамічна сила  $F_{\text{ЕД}}$  виникає в результаті взаємодії провідника зі струмом, який складається з краплі рідкого металу і стовпа дуги, з магнітним полем, ініційованим згаданим струмом. При цьому виникає сила, спрямована радіально до осі провідника, що прагне стиснути провідник, у тому числі і краплю рідкого металу (рис. 2, а). Ця сила сприяє утворенню шийки і, тим самим, відриву краплі від електродного дроту. Вона може бути визначена за формулою [12]:

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

де  $I$  — струм у провіднику (електродному дроті) (А).

У той же час, якщо перетин провідника є змінним, як у випадку зварювання 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. У цьому випадку електродинамічна сила дорівнює [13]:

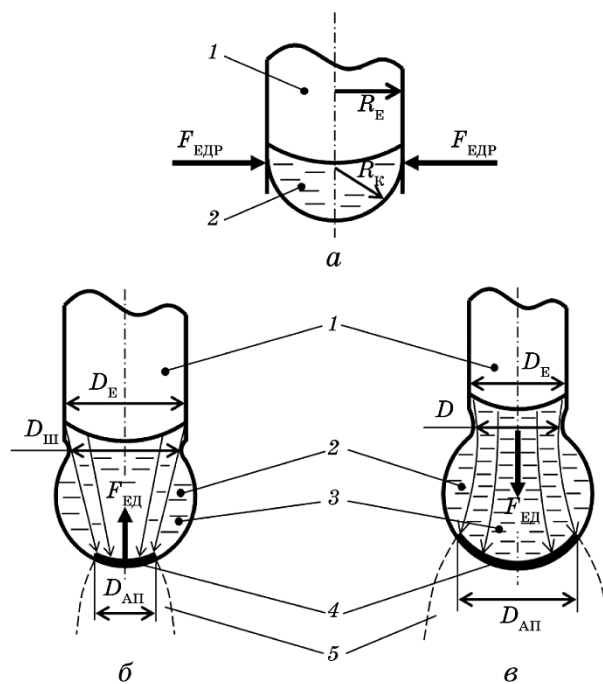
$$F_{\text{ЕД}} = AI^2(1 + 4,6 \lg(R_1/R_2)), \quad (8)$$

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).

Як зазначають дослідники [9, 13], величина і напрям електродинамічної сили в процесі росту краплі не залишаються постійними і залежать від діаметра стовпа дуги, що залежить, у свою чергу, від діаметра активної плями. На початку утворення краплі, коли під дією сили поверхневого натягу  $F_{\text{ПН}}$  і стискаючої радіальної елект-

ромагнітної сили  $F_{\text{ЕДР}}$  у місці розділу твердого електроду і рідкого металу з'являється шийка,  $R_{\text{Ш}}$  стає менше  $R_{\text{е}}$ , тобто  $R_1 = R_{\text{е}}$  і  $R_2 = R_{\text{Ш}}$ . У цьому випадку виникає осьова сила  $F_{\text{ЕД1}}$ , що перешкоджає відриву краплі від торця електроду (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  $F_{\text{ЕД2}}$ , що також перешкоджає відриву краплі.

Зі збільшенням розміру краплі збільшується діаметр шийки і діаметр активної плями. У певний момент часу діаметр шийки  $D_{\text{Ш}}$  стає приблизно рівним діаметрові електроду  $D_{\text{Е}}$ , і величина осьової сили  $F_{\text{ЕД1}}$  стає незначною. У той же час істотно збільшується діаметр активної плями  $D_{\text{АП}}$  і, коли він стає більшим за діаметр шийки  $D_{\text{Ш}}$ , напрям дії осьової сили  $F_{\text{ЕД}}$  змінюється і виникаюча сила  $F_{\text{ЕД3}}$



**Рис. 2.** Схема дії електродинамічної сили  $F_{\text{ЕД}}$  до утворення шийки (а), після утворення шийки при  $D_{\text{Ш}} < D_{\text{Е}}$  і  $D_{\text{АП}} < D_{\text{Ш}}$  (б) та після утворення шийки при  $D_{\text{Ш}} \approx D_{\text{Е}}$  і  $D_{\text{АП}} > D_{\text{Ш}}$  (в): 1 — електродний дріт, 2 — рідкий метал, 3 — лінії струму, 4 — активна пляма, 5 — стовп дуги.

**Fig. 2.** Scheme of the action of the electrodynamic force  $F_{\text{ЕД}}$  before the neck formation (a), after the neck formation in the case of  $D_{\text{Ш}} < D_{\text{Е}}$  and  $D_{\text{АП}} < D_{\text{Ш}}$  (б), and after the neck formation in the case of  $D_{\text{Ш}} \approx D_{\text{Е}}$  and  $D_{\text{АП}} > D_{\text{Ш}}$  (в): 1— electrode wire, 2— liquid metal, 3— current lines, 4— active spot, 5— arc column.

сприяє відриву краплі від торця електроду (рис. 2, в). У цьому випадку можна записати:

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

де  $R_{\text{ст}}$  — радіус основи стовпа дуги.

Радіус основи стовпа дуги під час зварювання СПД можна визначити за формулою [13]:

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

де  $I$  — струм зварювання (наплавлення) (А),  $U$  — напруга дуги (В).

При дрібнокрапельному переносі рідкого металу можна прийняти  $R_{\text{ст}} = R_{\text{к}}$ , де  $R_{\text{к}}$  — радіус краплі.

Відповідно до формули (9) величина електромагнітної сили пропорційна квадратові величини струму наплавлення. Крім того, за певних умов (розмір краплі) електромагнітна сила спрямована на відрив краплі від електроду. Тому виникає питання щодо використання цієї сили для керування переносом електродного металу, зокрема для прискорення відриву краплі від торця електроду. Наприклад, шляхом різкого підвищення сили струму зварювання на короткий період до моменту відриву краплі.

Сила реактивного тиску пару і газу  $F_{\text{р}}$ , що утворюються у краплі (далі — реактивна сила газу), за певних умов може вплинути на процеси переносу рідкого металу.

Розплавлений метал на електроді і виробі в зоні активних плям має температуру, близьку до температури кипіння, і тому з активних плям відбувається інтенсивне випаровування металу. Крім того, хімічна взаємодія рідкого металу зі шлаком або газовою атмосферою приводить до утворення і виділення газу. Усе це обумовлює виникнення реактивних сил, рівнодіюча яких прикладена до центру активної плями [9].

Величина реактивних сил залежить від розмірів активних плям, густини струму в них, теплофізичних властивостей матеріалу, а тому їхнє теоретичне визначення досі відсутнє. В окремому випадку для зварювання в середовищі вуглекислого газу експериментально встановлено, що реактивну силу можна приблизно обчислити за формулою [11]:

$$F_{\text{р}} = kI^2, \quad (11)$$

де при зварюванні дротом Св-08М2С коефіцієнт  $k = 0,03 \text{ Н/А}^2$ .

Дослідженнями [9, 10, 13] встановлено, що вплив реактивного ти-



ску у відчутній мірі виявляється під час зварювання на прямій полярності, а при зварюванні на зворотній полярності він істотно менший, ніж сила поверхневого натягу й електродинамічна сила, і його впливом можна знехтувати. Водночас відомо, що з погляду стійкості горіння дуги переважає зварювання на зворотній полярності.

Сила тиску потоків плазми електричної дуги  $F_{\text{пл}}$  найменш вивчена. Є лише наближена оцінка тиску потоків плазми на метал електроду, а отже і на краплю рідкого металу. Як зазначає А. Г. Потап'євський [15], потоки плазми утворюються в результаті випару металу і дії електродинамічних сил. В електричній дузі одночасно існують два потоки — анодний і катодний, спрямовані назустріч один одному. Величина тиску потоку залежить від енергії, що виділяється на електродах, які є джерелом металу, що випаровується.

Експериментальні дані про величини тиску потоків плазми на електроди відсутні. Як стверджують фахівці [11], наближені розрахунки дають значення сили тиску  $F_{\text{пл}}$  на один-два порядки менші за електродинамічну силу і силу поверхневого натягу. Внаслідок цього розглядати силу тиску плазми, як фактор цілеспрямованого керування дуговим процесом, сьогодні недоцільно.

Сила тиску газового потоку  $F_{\text{г}}$  виявляє себе під час використання в процесі зварювання і наплавлення для захисту розплавленого металу від атмосферних газів. Газу або подаються в зону дуги разом з подачею електродного дроту, або утворюються внаслідок плавлення покриття електроду або шихти всередині нього, як у випадку застосування самозахисного порошкового дроту.

У будь-якому разі сила тиску газового потоку  $F_{\text{г}}$  визначається силою тиску газу на частку поверхні краплі рідкого металу [16]:

$$F_{\text{г}} = P_{\text{г}} S_{\text{рг}}, \quad (12)$$

де  $P_{\text{г}}$  — тиск газового потоку (Па),  $S_{\text{рг}}$  — площа поверхні краплі рідкого металу, на яку діє газовий потік ( $\text{м}^2$ ).

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

Сила тяжіння  $F_{\text{т}}$ , як відомо, визначається масою рідкого металу на торці електроду і силою тяжіння Землі.

Оскільки при механізованому зварюванні електрод, як правило, знаходиться над деталлю і напрям сили тяжіння рідкого металу збігається з напрямом падіння краплі вниз з торця електроду на деталь, то сила  $F_{\text{т}}$  сприяє відриву краплі від електроду й у загальному виді визначається як [16]:

$$F_{\text{т}} = m_{\text{р}} g, \quad (13)$$

де  $m_{\text{р}}$  — маса рідкого металу (кг),  $g$  — прискорення вільного падін-

ня ( $\text{м/с}^2$ ).

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

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

де  $\alpha$  — коефіцієнт, що враховує ступінь усікання сфери краплі,  $R_k$  — радіус краплі ( $\text{м}$ ),  $\rho$  — густина металу краплі при температурі його плавлення ( $\text{кг/м}^3$ ),  $g$  — прискорення вільного падіння ( $\text{м/с}^2$ ).

Таким чином, аналіз показав, що сила тяжіння, а також електродинамічна сила можуть бути використані для прискорення відриву краплі рідкого металу від торця електрода, тим самим 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  $i$ , відповідно, 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, є можливість регулювання їх значень у певних межах, що має забезпечуватися конструкцією обладнання для зварювання.

Як зазначають дослідники [11, 14, 18], при різних частотах імпульсної подачі і перехідного процесу їх результуюча дія залежить від достатньо великої кількості параметрів, а також особливостей плавлення електродного матеріалу під час дугового процесу, характеристик джерела живлення зварювального струму та параметрів схеми зварювання. Важливим є те, що зміна (коливання) зварювального струму, яка зумовлена імпульсним характером руху дроту і перехідним процесом системи дуга–дуговий стовп, що коливається, відбувається не синхронно зі зміною швидкості подачі електродного дроту, а з певним зсувом від них на час, що залежить від характеристик вказаної системи. Також мають місце суттєві перевищення величини зварювального струму в початковий момент дії імпульсу подачі над амплітудою його коливань у режимі, що встановився.

Для підтвердження вищезазначеного були проведені експериментальні дослідження, під час яких було встановлено, яким чином впливають режими механізованого електродугового зварювання з модуляцією подачі дроту на процес переносу присадного матеріалу та на якісні властивості зварного з'єднання.

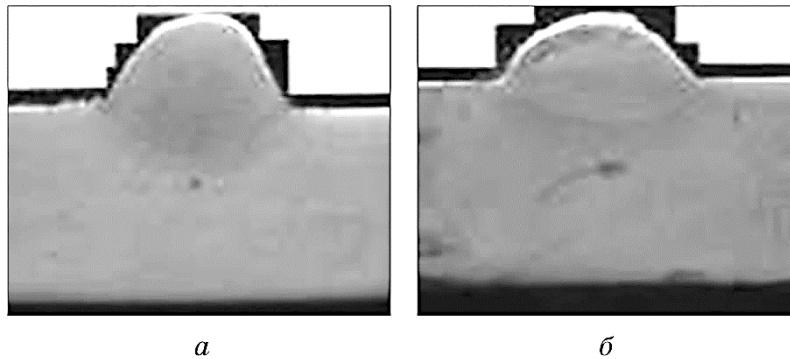
Дослідження виконувалися в два етапи. На першому етапі на основі однофакторного експерименту була визначена область параметрів

режиму (табл. 1), при яких є стійкими горіння дуги та рівень якості зварного з'єднання, а також забезпечується менша глибина проплавлення, що призводить до зменшення зони термічного впливу (рис. 3).

**ТАБЛИЦЯ 1.** Параметри режимів зварювання.

**TABLE 1.** Parameters of welding modes.

Назва	Позначка	Область визначення	Одиниці вимірювання
Напруга джерела зварювального струму	$U_{XX}$	25–50	В
Швидкість подачі зварювального дроту	$V_{ПР}$	20–90	мм/с
Погонна швидкість зварювання	$V_{СВ}$	5–20	мм/с
Частота модуляції швидкості подачі зварювального дроту	$f$	10–20	с <sup>-1</sup>
Амплітуда модуляції швидкості подачі зварювального дроту	$\delta$	2–10	мм/с

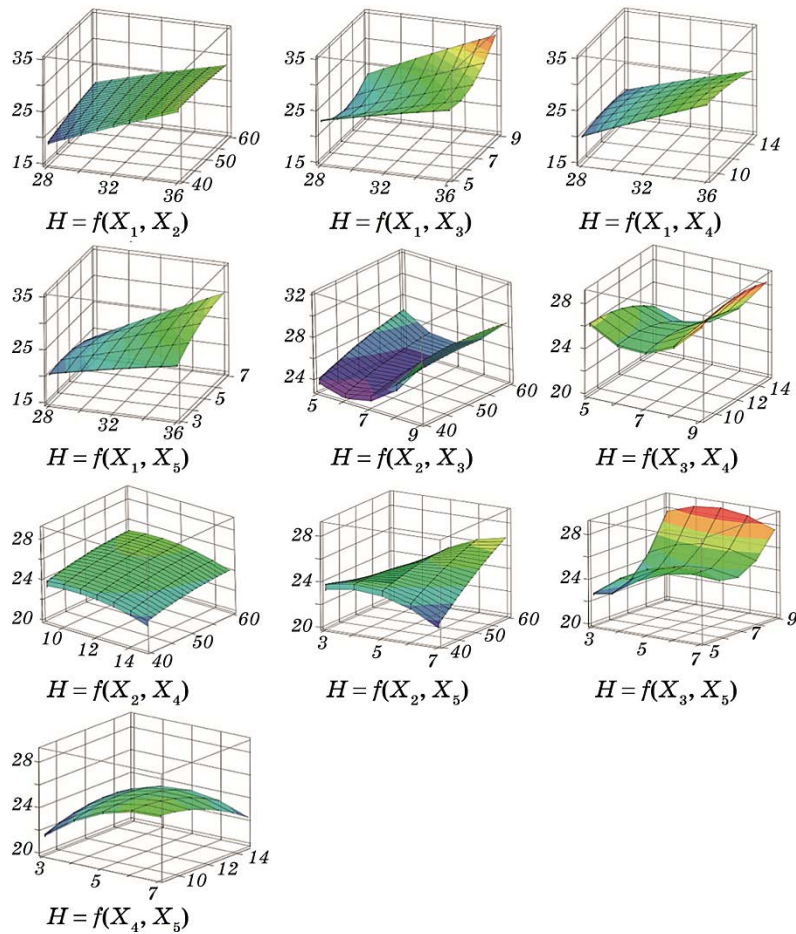


**Рис. 3.** Макрошліфи наплавлених валиків після однофакторного експерименту з визначення області параметрів режиму, при яких є стійке горіння дуги та забезпечується відповідний рівень якості зварного з'єднання.

**Fig. 3.** Macrosections of faced banks after one-factorial experiment aimed at determining the set of the regime parameters that provide a stable arc burning and an appropriate quality of welded connection.

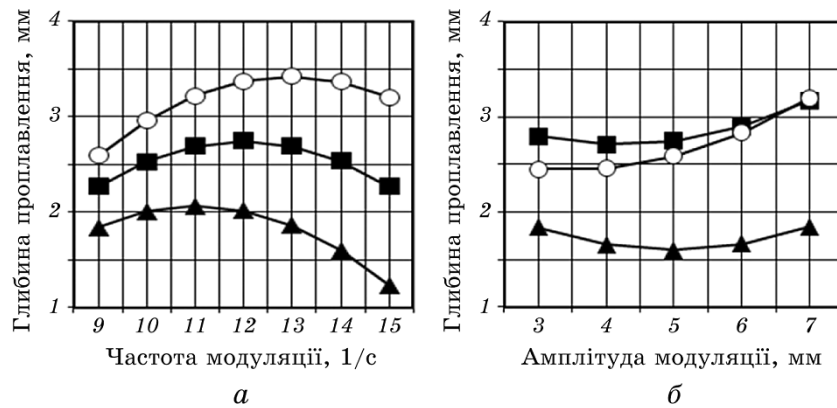
На другому етапі під час експерименту було підтверджено, що, змінюючи режими подачі дроту за певним алгоритмом, можна управляти електродуговими процесами і, відповідно, формуванням зварного з'єднання (рис. 4–6), а також встановлено як впливають режими механізованого електродугового зварювання модульованим струмом на фактори, що характеризують якісні властивості зварного з'єднання, і особливо, рівень ударної стійкості в зоні термічного впливу (рис. 7).

Як видно із вищезазначених графічних залежностей, експериментальні дослідження підтвердили зв'язок між режимами механізо-



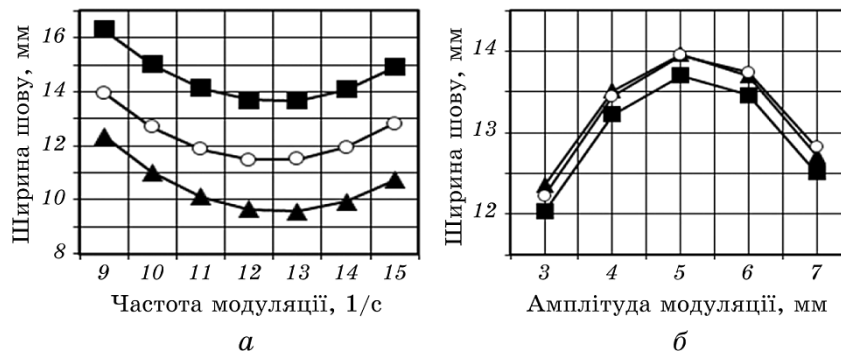
**Рис. 4.** Вплив режиму механізованого зварювання модульованим струмом на твердість зварювального з'єднання.

**Fig. 4.** Influence of the mode of mechanized welding with use a modulated current on the hardness of the welding connection.



**Рис. 5.** Вплив частоти та амплітуди модуляції швидкості подачі зварювального дроту на глибину проплавлення.

**Fig. 5.** Influence of the frequency and amplitude of the speed modulation of welding wire supply on the sintering depth.



**Рис. 6.** Вплив частоти та амплітуди модуляції швидкості подачі зварювального дроту на ширину зварного шва.

**Fig. 6.** Influence of the frequency and amplitude of the speed modulation of welding wire supply on the width of the weld.

ваного електродугового зварювання з модуляцією подачі дроту та властивостями зварних з'єднань.

## ВИСНОВКИ

1. Під час електродугового механізованого зварювання на метал електродного дроту, який плавиться, діє комплекс сил, що визначає час відриву краплі від торця електродного дроту та характер переносу краплі у дуговому просторі.

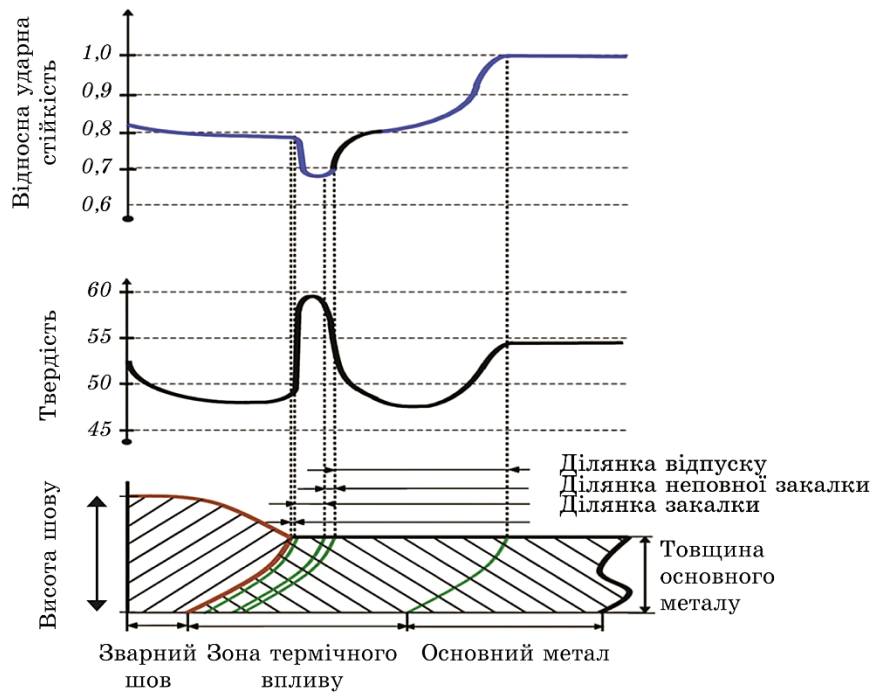


Рис. 7. Фактори, що характеризують якісні властивості зварного з'єднання.

Fig. 7. Factors characterizing the qualitative properties of welded joint.

2. Теоретично доведено, що можливо управляти електродуговими процесами через режими зварювання.
3. Експериментально підтверджено теоретичні викладки.
4. Експериментально доведено, що якісними властивостями зварних з'єднань можливо управляти через модуляцію подачі дроту.
5. Підтверджено доцільність використання механізованого дугового зварювання з модуляцією подачі дроту в промисловості.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. В. Т. Федько, О. Г. Брунов, П. Д. Соколов, *Сварочное производство*, № 7: 6 (2006).
2. Н. М. Воропай, *Автоматическая сварка*, № 10: 3 (1996).
3. Б. Е. Патон, В. А. Лебедев, *Сварочное производство*, № 2: 24 (2002).
4. В. А. Лебедев, *Автоматическая сварка*, № 4: 19 (2007).
5. В. А. Лебедев, В. Г. Пичак, *Автоматическая сварка*, № 5: 31 (2001).
6. В. А. Лебедев, *Автоматическая сварка*, № 10: 45 (2010).
7. В. А. Лебедев, И. С. Кузьмин, *Сварочное производство*, № 5: 6 (2002).
8. В. М. Мозок, В. А. Лебедев, *Сварочное производство*, № 2: 34 (2010).

9. Б. Е. Патон, *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением* (Москва: Машиностроение: 1974).
10. *Металлургия дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов* (Ред. И. К. Походня) (Киев: Наукова думка: 1990).
11. Б. Е. Патон, П. П. Шейко, *Автоматическая сварка*, № 5: 1 (1965).
12. К. В. Багрянский, З. В. Добротина, К. К. Хренов, *Теория сварочных процессов* (Киев: Вища Школа: 1976).
13. В. И. Дятлов, *Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке* (Киев: Техника: 1964).
14. Е. В. Лаврова, *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, **204**, № 1: 32 (2014).
15. А. Г. Потапьевский, *Сварка в защитных газах плавящимся электродом* (Москва: Машиностроение: 1974).
16. С. Э. Фриш, А. В. Тиморева, *Курс общей физики* (Москва: Физматгиз: 1962).
17. Н. Г. Дюргеров, Д. Х. Сагиров, *Сварочное производство*, № 4: 14 (2004).
18. А. В. Крюков, Н. В. Павлов, А. А. Зеленковский, *Сварочное производство*, № 5: 37 (2013).

## REFERENCES

1. V. T. Fed'ko, O. G. Brunov, and P. D. Sokolov, *Svarochnoe Proizvodstvo*, No. 7: 6 (2006) (in Russian).
2. N. M. Voropay, *Avtomaticheskaya Svarka*, No. 10: 3 (1996) (in Russian).
3. B. E. Paton and V. A. Lebedev, *Svarochnoe Proizvodstvo*, No. 2: 24 (2002) (in Russian).
4. V. A. Lebedev, *Avtomaticheskaya Svarka*, No. 4: 19 (2007) (in Russian).
5. V. A. Lebedev and V. G. Pichak, *Avtomaticheskaya Svarka*, No. 5: 31 (2001) (in Russian).
6. V. A. Lebedev, *Avtomaticheskaya Svarka*, No. 10: 45 (2010) (in Russian).
7. V. A. Lebedev and I. S. Kuz'min, *Svarochnoe Proizvodstvo*, No. 5: 6 (2002) (in Russian).
8. V. M. Mozok and V. A. Lebedev, *Svarochnoe Proizvodstvo*, No. 2: 34 (2010) (in Russian).
9. B. E. Paton, *Tekhnologiya Elektricheskoy Svarki Metallov i Splavov Plavleniem* [The Technology of Electric Welding of Metals and Alloys by Melting] (Moscow: Mashinostroenie: 1974) (in Russian).
10. *Metallurgiya Dugovoy Svarki: Protsessy v Duge i Plavlenie Elektrodov* [Arc Welding Metallurgy: Arc Processes and Electrode Melting] (Ed. I. K. Pokhodnya) (Kyiv: Naukova Dumka: 1990) (in Russian).
11. B. E. Paton and P. P. Sheyko, *Avtomaticheskaya Svarka*, No. 5: 1 (1965) (in Russian).
12. K. V. Bagryanskiy, Z. V. Dobrotina, and K. K. Khrenov, *Teoriya Svarochnykh Protsessov* [Theory of Welding Processes] (Kyiv: Vyscha Shkola: 1976) (in Russian).
13. V. I. Dyatlov, *Elementy Teorii Perenosa Elektrodnogo Metalla pri Elektrodugovoy Svarke* [Elements of the Theory of Electrode Metal Transfer during Arc Welding] (Kyiv: Tekhnika: 1964) (in Russian).
14. E. V. Lavrova, *Visnyk Donbas'koyi Derzhavnoyi Mashynobudivnoyi Akademiyi*,

- 204, No. 1: 32 (2014) (in Ukrainian).
15. A. G. Potap'evskiy, *Svarka v Zashchitnykh Gazakh Plavyashchimsya Elektrodom* [Welding in Shielded Gas with a Consumable Electrode] (Moscow: Mashinostroenie: 1974) (in Russian).
  16. S. E. Frish and A. V. Timoreva, *Kurs Obshchey Fiziki* [Course of General Physics] (Moscow: Fizmatgiz: 1962) (in Russian).
  17. N. G. Dyurgerov and D. X. Sagirov, *Svarochnoe Proizvodstvo*, No. 4: 14 (2004) (in Russian).
  18. A. V. Kryukov, N. V. Pavlov, and A. A. Zelenkovskiy, *Svarochnoe Proizvodstvo*, No. 5: 37 (2013) (in Russian).