

**132 МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

УДК 621.791.753.042

doi: 10.31498/2225-6733.45.2022.276226

© Щетинін С.В.<sup>1</sup>, Щетиніна В.І.<sup>2</sup>**РЕГУЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ**

Встановлено, що зі зменшенням довжини дуги, напруга на дузі знижується, дуга і енергія концентруються, ефективність процесу збільшується, що забезпечує підвищення пінч-ефекту, зменшення енергії і зварювальних напруг, збільшення швидкості кристалізації, здрібнення мікроструктури і підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань. Розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей складовим електродом на низькій енергії, який, за рахунок низької напруги на дузі, забезпечує концентрацію дуги і енергії, стабільність, зниження зварювальних напруг, здрібнення мікроструктури, підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань.

**Ключові слова:** енергетична характеристика дуги, низька напруга на дузі, концентрація дуги та енергії, одностороннє високошвидкісне зварювання труб на низькій енергії, пінч-ефект, зварювальні напруги, ударна в'язкість зварних з'єднань.

*S.V. Shchetinin, V.I. Shchetinina. Welding arc energy characteristic regulation. When welding pipes, due to the concentration of magnetic field lines in a ferromagnetic pipe with high magnetic permeability, the welding current magnetic field increases, magnetic blow, under. by the action of electromagnetic force, the arc length increases up to a break, the current and voltage on the arc fluctuate significantly, the seam dimensions change from a point to a large width, the process stability is disturbed, the welds formation and the welded joints impact toughness is reduced. Based on the study of the arc energy characteristics, according to which the voltage on the arc increases with increasing arc length, it was found that the arc moves along the tape end at a speed of 3.3 m/s, the electrode shape affects the welding arc. energy and voltage characteristics. In this case, the sum of near-electrode voltage drops depends on the work function of electrons from the cathode surface of the flux components and does not depend on the electrode shape, which confirms the main role of field emission in the arc and the arc concentration below. pinch-effect. To increase the welded joints impact toughness, it is necessary to reduce energy, heat input, crystal lattice microdistortions, microstresses, dislocation density, welding stresses, reduce the weld width, heat-affected zone, the deposited metal amount and refine the microstructure. An effective way to reduce energy is to increase the welding speed, which reduces the heat input, and reduce the arc length, arc voltage, which leads to an increase in the arc rotation speed, pinch effect, arc concentration and energy, heat input efficiency, reduce welding stresses, increase the crystallization rate, the microstructure refinement, the interatomic distance reduction and interatomic bonds increase. A process for one-sided high-speed welding of pipes for gas and oil pipelines with a low-energy composite electrode, which, due to low arc voltage, arc concentration, stability, energy reduction, heat input, welding stresses, microstructure refinement, interatomic distance reduction and interatomic bonds increase, provides an increase in the welded joints impact toughness 2-2.5 times has been developed. Minimum energy – maximum welded joints impact toughness.*

<sup>1</sup> д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро  
<sup>2</sup> д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро

**Key words:** *welding arc energy characteristic, one-sided high-speed welding with a low-energy composite electrode, pipes for gas and oil pipelines, pinch-effect, low arc voltage, arc and energy concentration, welding stresses, welded joints impact toughness.*

**Постановка проблеми.** Енергетична характеристика зварювальної дуги визначає процеси розплавлення основного металу та електроду, енергію, струм, магнітне поле і напругу на дузі, стабільність, саморегулювання і автоматичне регулювання, тепловкладення, якість швів, ударну в'язкість зварних з'єднань. Тому розробка процесів одностороннього високошвидкісного зварювання є важливою науково-технічною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дуга визначає розплавлення електродів і магнітогідродинамічні явища в зварювальній ванні. Магнітогідродинамічні явища визначаються фізичними процесами в дузі, які найбільш всебічно вивчені в роботах Ю.П. Раузера і І.В. Кривцуна [1, 2]. Магнітне поле зварювального струму та положення дуги в просторі визначають магнітогідродинамічні явища в зварювальній ванні та формування швів. Але закономірності регулювання енергетичної характеристики дуги, магнітогідродинамічних явищ і підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань досліджено недостатньо [1-11].

**Мета статті** – вивчення механізму регулювання енергетичної характеристики зварювальної дуги, магнітогідродинамічних явищ в зварювальній ванні і розробка процесу одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, що забезпечує відсутність магнітного дугтя, стабільність процесу і підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань.

**Виклад основного матеріалу.** При електродуговому зварюванні головною є дуга, яка створює магнітне поле, пінч-ефект, під дією якого виникає тиск дуги, визначає магнітогідродинамічні явища, рух дуги по торцю електрода і зварювальній ванні, відхилення дуги в сторону меншого магнітного поля і переміщення рідкого металу, формування швів і ударну в'язкість зварних з'єднань.

Рідкий метал зварювальної ванни не магнітний, однак магнітне поле діє на метал, як на провідник зі струмом. Магнітне дугтя і магнітогідродинамічні явища значно посилюються при зварюванні труб, так як силові лінії магнітного поля прагнуть пройти шляхом найменшого опору в феромагнітній трубі. Тому при зварюванні труб створюється магнітне поле зварювального струму в  $\pi$  раз більше, ніж при зварюванні пластин:

$$B = \mu \frac{I}{2R}, T \quad (1)$$

де  $\mu$  – магнітна проникність середовища,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  
 $I$  – величина струму, А;  
 $R$  – відстань від провідника з струмом, м.

Зростає електромагнітна сила, під дією якої дуга відхиляється в сторону меншого магнітного поля до обриву, магнітне дугтя, порушується стабільність процесу, формування швів і знижується ударна в'язкість зварних з'єднань.

Електромагнітна сила зварювального струму, що діє на дугу, прямо пропорційна величині струму  $I$ , індукції магнітного поля  $B$  і довжині дуги  $L_d$ :

$$F_{EM} = IBL_d. \quad (2)$$

Із зростанням довжини дуги електромагнітна сила посилюється, що призводить до магнітного дугтя, порушується стабільність процесу і знижується ударна в'язкість зварних з'єднань.

Для підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань необхідно зменшувати тепловкладення і енергію, яка приводить до збільшення міжатомної відстані та зниження міжатомних зв'язків.

Процеси, що протікають у зварювальній ванні, залежать від дуги, яка розплавляє електроди та флюси. При електродуговому зварюванні дуга визначає тепловкладання в основний метал, розподіл температури, магнітне поле і переміщення рідкого металу в ванні та формування швів. Тому дослідженню процесів у дузі приділяється важливе значення [3-6]. При односторонньому

зварюванні дуга занурюється в основний метал, посилюється охолодження, що призводить до порушення стабільності процесу, яка визначається енергетичною характеристикою дуги.

Енергетична характеристика дуги визначає залежність напруги на дузі від довжини дуги, зі зменшенням якої напруга на дузі зменшується (рис. 1).

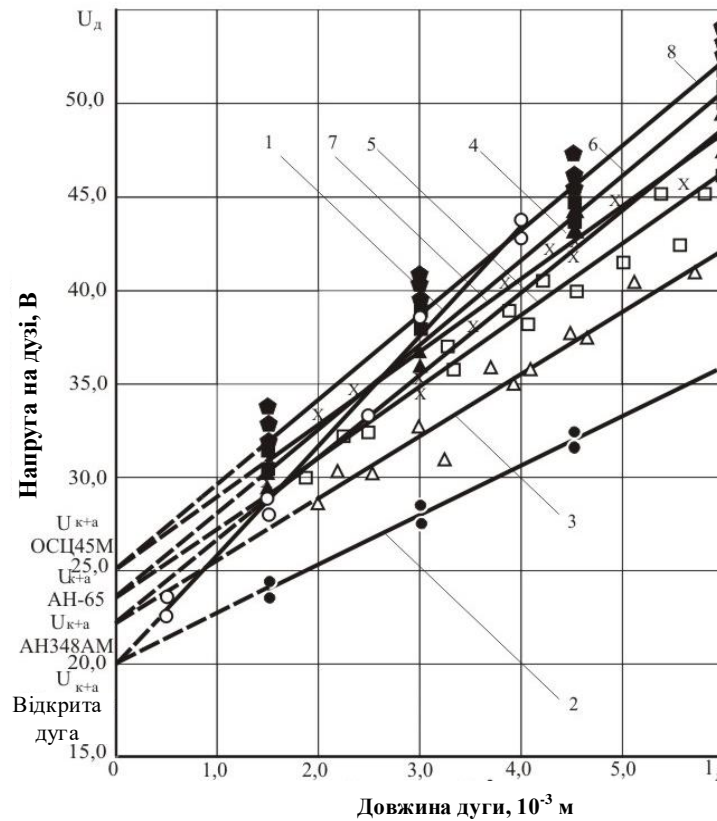


Рис. 1 – Енергетична характеристика зварювальної дуги: 1, 2 – відкрита дуга; 3-8 – дуга під флюсом; 3, 4 – флюс АН 348АМ; 5, 6 – флюс АН-60; 7, 8 – флюс ОСЦ-45М

У дузі розрізняють три області: катод, анод та стовп. Катодна пляма обертається катодом. Стовп грає роль простого газового провідника, що з'єднує катодну пляму з анодом. Головна роль належить катоду [5], що забезпечує регенерацію зарядів.

Кількість енергії, що виділяється в кожній області, визначається умовами існування дугового розряду:

$$q = IU_K + IU_A + IEL_D, \text{ Дж/с}, \quad (3)$$

де  $I$  – величина зварювального струму, А;  
 $U_K, U_A$  – катодне і анодне падіння напруги відповідно, В;  
 $E$  – градієнт потенціалу стовпа, В/м;  
 $L_D$  – довжина дуги, м.

Для вивчення механізму регулювання енергетичної характеристики дуги і розподіл потенціалу в дузі побудовано статичні характеристики залежності напруги від довжини дуги  $U_D = f(l_D)$ , при постійному струмі прямої полярності  $I = 280-300$  А, для стрічки перетином  $(45 \times 0,5) \cdot 10^{-3}$  м та дроту діаметром  $5 \cdot 10^{-3}$  м. Для підвищення стабільності малопотужних дуг застосовували два послідовно з'єднані випрямлячі, що забезпечували напругу холостого ходу  $U_{XX} = 150$  В.

Побудову енергетичних характеристик проводили шляхом виміру напруги на дузі при заданій відстані між електродами, яку регулювали гвинтом, змінюючи відстань між електродами за допомогою спеціальної установки з міцною пружиною і електромагнітом. Перед

вимірюванням електрод кріпили в нижній частині рухомого стрижня і закорочували на підставі. При натисканні кнопки «пуск» включалася протяжка стрічки осцилографа і за допомогою реле часу через час  $3 \cdot 10^{-3}$  с, достатній для розгону двигуна протяжки стрічки, замикався зварювальний ланцюг. При протіканні зварювального струму спрацьовував електромагніт, який звільняв від упору стрижень з електродом на кінці. Під дією пружини електрод піднімався на задану висоту. При цьому збуджувалася дуга, довжиною  $l_d = \delta$ , напруга та струм якої осцилографувався з швидкістю протяжки стрічки 1 м/с. Через певний проміжок часу спрацьовувало реле, розмикаючи зварювальний ланцюг та зупиняючи протяжку осцилографічної стрічки. Час горіння дуги становив 0,12-0,2 с. Для одержання на стрічці довжини дуги в межах, встановлених для дроту  $(1,5-6) \cdot 10^{-3}$  м, її піднімали на  $(0,25; 0,5; 1,0$  та  $1,25) \cdot 10^{-3}$  м від пластини.

Електрод та основний метал розплавляються енергією, виділеною на катоді та аноді, яка визначається сумою приелектродних падінь напруги. Найбільш достовірні значення суми приелектродних падінь та градієнта потенціалу у стовпі отримані за методикою Г.І. Лескова [6], шляхом вимірювання напруги при заданій відстані між електродами. Змінюючи відстань між електродами та вимірюючи напругу на дузі по осцилограмі, шляхом екстраполяції залежності  $U = f(l_d)$  до нульового значення  $l_d$  визначено суму приелектродних падінь напруги (рис. 1).

Встановлено, що сума приелектродних падінь напруги не залежить від форми електроду, обертання дуги по торцю електроду і охолодження дуги, що підтверджує автоелектронну емісію електронів з поверхні катоду. Сума приелектродних падінь залежить від флюсу, найбільше значення  $U_{K+A} = 23-25$  В досягається під флюсом ОСЦ-45М, зменшується під флюсом АН-60  $U_{K+A} = 23-24$  В, найменше під флюсом АН-348АМ  $U_{K+A} = 22-23$  В. При зварюванні в відкритій атмосфері  $U_{K+A} = 19-20$  В.

Градієнт потенціалу стовпа дуги  $E$  залежить від форми електроду, при зварюванні під флюсом менше, а в відкритій атмосфері більше, що визначається обертанням дуги торцем електроду і охолодженням стовпа дуги.

Ефективним способом зниження енергії є зменшення напруги на дузі за рахунок скорочення дуги, довжина якої має бути 1 мм. При цьому напруга на дузі:  $U_d = U_{K+A} + E$ . При зварюванні під флюсом  $U_d = 26$  В, в аргоні  $U_d = 21$  В, зі зменшенням напруги посилюється швидкість обертання дуги та саморегулювання, дуга концентрується, шви вузькі, щільні, без пор, знижується енергія та підвищується ударна в'язкість зварних з'єднань.

Зварювання скороченою дугою забезпечує стабільність процесу та якісне формування швів при односторонньому високошвидкісному зварюванні на флюсовій подушці, що встановлено при односторонньому високошвидкісному зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей складовим електродом з дроту і стрічки, при  $I = 2000-2100$  А та  $U = 27-29$  В по оплавленню торця електроду.

На підставі проведених досліджень встановлено, що зниження енергії ефективно за рахунок скорочення довжини дуги і напруги на дузі.

На основі встановлених закономірностей розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, який забезпечує зменшення довжини дуги, напруги на дузі, енергії, тепловкладення, зварювальних напруг, здрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків і ударної в'язкості зварних з'єднань.

Встановлені закономірності регулювання енергетичної характеристики дуги та розроблений процес одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей можуть бути використанні при зварюванні котлів залізничних цистерн..

Подальше дослідження в даному напрямку є перспективним, так як дозволяє розробити нові процеси, що забезпечують підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань.

### Висновки

1. При зварюванні труб, внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля в феромагнітній трубі, що володіє великою магнітною проникністю, зростає магнітне поле зварювального струму, магнітне дуття, під дією електромагнітної сили довжина дуги збільшується до обриву, струм і напруга на дузі коливаються в значних межах, розміри шва змінюються від краплі до великої ширини, порушується стабільність процесу, формування швів і знижується ударна в'язкість зварних з'єднань.

2. На підставі досліджень енергетичної характеристики дуги, згідно якої зі збільшенням довжини дуги напруга на дузі зростає, встановлено, що дуга рухається по торцю стрічкового електрода зі швидкістю 3,3 м/с, форма електрода впливає на енергетичну та вольтамперну характеристики зварювальної дуги. При цьому сума приелектродних падінь напруг залежить від роботи виходу електронів з поверхні катода, компонентів флюсу і не залежить від форми електрода, що підтверджує головну роль автоелектронної емісії в дузі і концентрацію дуги, під дією пінч-ефекта.

3. Для підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань необхідно зменшувати енергію, тепловкладення, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, щільність дислокацій, зварювальні напруги, зменшувати ширину шва, зони термічного впливу, кількість наплавленого металу і здрибнювати мікроструктуру.

4. Ефективним способом зменшення енергії є підвищення швидкості зварювання, що знижує погонну енергію, та скорочення довжини дуги і напруги на дузі, яке збільшує швидкість обертання дуги, пінч-ефект, концентрацію дуги і енергії, призводить до підвищення ефективності тепловкладення, зниження зварних напруг, зростання швидкості кристалізації, здрибнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані і зростання міжатомних зв'язків.

5. Розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей складовим електродом на низькій енергії, який за рахунок концентрації дуги, стабільності, зменшення енергії, тепловкладення, зварювальних напруг, здрибнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані та збільшення міжатомних зв'язків забезпечує підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань в 2-2,5 рази. Мінімум енергії – максимум ударної в'язкості зварних з'єднань.

#### Перелік використаних джерел:

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. – М. : Наука, 1992. – 536 с.
2. Кривцун И.В. Комбинированные лазерно-дуговые процессы обработки материалов и устройства для их реализации : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.10 / Кривцун Игорь Витальевич. – Киев, 2002. – 393 с.
3. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток / В.Л. Грановский. – М. : Наука, 1971. – 543 с.
4. Финкельбург В. Электрические дуги и термическая плазма / В.Финкельбург, Г. Меккер. – М. : Изд-во иностр. лит., 1961. – 369 с.
5. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги / И.Г. Кесаев. – М. : Наука, 1968. – 244 с.
6. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга / Г.И. Лесков. – М. : Машиностроение, 1970. – 334 с.
7. Уайт Р.М. Квантовая теория магнетизма / Р.М. Уайт. – М. : Мир, 1972. – 306 с.
8. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М. : Наука, 1969. – 824 с.
9. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В.П. Черныш, В.Д. Кузнецов, А.Н. Брисман, Г.М. Шеленков. – К. : Техника, 1983.– 127 с.
10. Рижов Р.М. Магнітне керування якістю зварних з'єднань / Р.М. Рижов, В.Д. Кузнецов. – К. : Екотехнологія, 2010. – 288 с.
11. Черныш В.П., Рыжов Р.Н. Зависимость параметров управляющего магнитного воздействия от энергозложения встык при дуговой сварке / В.П. Черныш, Р.Н. Рыжов //Автоматическая сварка. – 1998. – № 5. – С. 49-51.

#### References:

1. Raizer Iu.P. *Fizika gazovogo razriada* [Physics of a gas discharge]. Moscow, Nauka Publ., 1992. 536 p. (Rus.)
2. Krivtsun I.V. *Kombinirovannyye lazerno-dugovyye protsessy obrabotki materialov i ustroystva dlia ikh realizatsii*. Diss. dokt. techn. nauk [Combined laser-arc processes for processing materials and devices for their implementation. Cand. tech. sci. diss.]. Kyiv, 2002. 393 p. (Rus.)
3. Granovskii V.L. *Elektricheskii tok v gaze. Ustanovivshiisia tok* [Electric current in gas. Steady current]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 543 p. (Rus.)
4. Finkel'burg V., Mekker G. *Elektricheskije dugi i termicheskaja plazma* [Electric arcs and thermal plasma]. Moscow, Izd-vo inostr. lit. Publ., 1961. 369 p. (Rus.)

5. Kesaev I.G. *Katodnye protsessy elektricheskoi dugi* [Cathodic processes of an electric arc]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 244 p. (Rus.)
6. Leskov G.I. *Elektricheskaiia svarochnaia duga* [Electric welding arc]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 334 p. (Rus.)
7. Uait R.M. *Kvantovaia teoriia magnetizma* [Quantum theory of magnetism]. Moscow, Mir Publ., 1972. 306 p. (Rus.)
8. Abramovich G.N. *Prikladnaia gazovaia dinamika* [Applied gas dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 824 p. (Rus.)
9. Chernysh V.P., Kuznetsov V.D., Briskman A.N., Shelenkov G.M. *Svarka s elektromagnitnym peremeshivaniem* [Electromagnetic stir welding]. Kyiv, Tekhnika Publ., 1983. 127 p. (Rus.)
10. Rizhov R.M., Kuznetsov V.D. *Magnitne keruvannia iakistiu zvarnikh z'ednan'* [Magnetic control of the quality of welded joints]. Kyiv, Ekotekhnologiiia Publ., 2010. 288 p. (Ukr.)
11. Chernysh V.P., Ryzhov R.N. *Zavisimost' parametrov upravliaiushchego magnitnogo vozdeistviia ot energovlozheniia vstyk pri dugovoi svarke* [Dependence of the parameters of the control magnetic action on the energy input end-to-end in arc welding]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic Welding*, 1998, № 5, pp.49-51. (Rus.)

Рецензент: І.В. Захарова  
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 15.08.2022