

- ja prokatnih valkiv* [A method of manufacturing rolling rolls]. Patent UA, no. 92559, 2014. (Ukr.)
7. Ivanov V.P., Leshhins'kij L.K., Shherbakov S.V. Modeljuvannja tehnologii naplavlennja znosostijkogo sharu zminnogo himichnogo skladu [Modeling the technology of deposition of a layer of variable chemical composition]. *Avtomatichne zvarjuvannja – Automatic Welding*, 2019, no. 11, pp. 40-45. doi: 10.15407/as2019.11.06. (Ukr.)
  8. Leshhinskij L.K., Lavrik P.F., Tarasov V.V., Macuka V.H. O himicheskoi neodnorodnosti metalla, naplavlennogo jelektrodnoj lentoi [About the chemical inhomogeneity of the metal deposited with the electrode strip]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, 1971, no. 1, pp. 28-29. (Rus.)
  9. Trajno A.I., Veter V.V., Jusupova E.V., Belianskii A.D., Karenyi Z.P. *Sposob jekspluatacii prokatnogo valka* [Method of operating the rolling roll]. Certificate of authorship USSR, no. 1371727, 1988. (Rus.)
  10. Gulakov S.V., Nosovskij B.I. *Naplavka rabocheho sloja s reglamentirovannym raspredeleniem svojstv* [Surfacing of a working layer with a regulated distribution of properties]. Mariupol', PGTU Publ., 2005. 170 p. (Rus.)
  11. Shevchenko O.I. Zakonomernosti izmenenija svojstv i struktury pokrytij sistemy Ni-Cr-B-C-Si pri naplavke i termicheskoi obrabotke [Regularities of changes in the properties and structure of coatings of the Ni-Cr-B-C-Si system during surfacing and heat treatment]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, 2002, no. 9, pp. 19-23. (Rus.)
  12. Pis'mennyi A.S., Prokof'ev A.S., Gubatiuk R.S., Pis'mennyi A.A., Polukhin V.V., Iukhimenko R.F., Gavrik A.R. Povyshenie prochnostnyh harakteristik spiral'nozhovnyh trub konstrukcionnogo naznachenija [Increase of strength characteristics of spirally-welded pipes for construction purposes]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic Welding*, 2012, no. 3, pp. 40-44. (Rus.)

Рецензент: С.В. Щетинін  
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 18.10.2020

УДК 621.791.753.042

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226128

© Щетинін С.В.<sup>1</sup>, Щетиніна В.І.<sup>2</sup>, Никитенко П.В.<sup>3</sup>,  
Елсаєд Халед<sup>4</sup>, Коваль О.В.<sup>5</sup>

### УДАРНА В'ЯЗКІСТЬ ПРИ ОДНОСТОРОННЬОМУ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ЗВАРЮВАННІ ТРУБ ДЛЯ ГАЗО- І НАФТОПРОВІДНИХ МАГІСТРАЛЕЙ

*Встановлені закономірності регулювання енергетичної характеристики зварювальної дуги, суми приелектродних падінь напруги і градієнта потенціалу в стовпі при різних способах зварювання. Розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, який забезпечує за рахунок аргону зниження суми приелектродних падінь напруги, градієнта потенціалу і напруги дуги, зменшення погонної енергії, тепловкладення, зварювальних напруг, подрібнення мікроструктури, саморегулювання дуги, стабільність процесу, підвищення якості і ударної в'язкості зварних з'єднань.*

**Ключові слова:** ударна в'язкість зварних з'єднань, енергетична характеристика зварювальної дуги, погонна енергія, зварювальні напруги, здрібнення мікроструктури, одностороннє високошвидкісне зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей.

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

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

<sup>3</sup> аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

<sup>4</sup> аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

<sup>5</sup> аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

*S.V. Shchetinin, V.I. Shchetinina, P.V. Nikitenko, Elsaed Khaled, O.V. Koval. Impact toughness in one-sided high-speed welding of the pipes for gas and oil pipelines. One-sided high-speed pipes welding for gas and oil pipelines, which are made of 10G2S1, 09G2S high-strength steels and are operated at high pressures and low temperatures, is limited with the difficulties to ensure the process stability, the welded joints and impact toughness. Therefore, the process development of one-sided high-speed pipes welding for gas and oil pipelines, which provides increase in the arc self-regulation, in the process stability, in the welded joints quality and in the impact toughness, is an important scientific and technical problem. An effective way to increase the welded joints impact toughness is high-speed welding at low heat input, which secures decrease in heat input into the base metal and in welding stresses, increase in the crystallization rate of the weld pool liquid metal and interatomic bonds, the microstructure refinement, the interatomic distance reduction. Energy minimum ensures process stability and welded joints impact toughness maximum. It has been found that at argon-arc welding, the static and the arc energy characteristics change, the near-electrode voltage drops sum decreases, as well as the arc column potential gradient, arc voltage, heat input, welding stresses, the interatomic distance; while interatomic bonds, arc self-regulation, stability process and welded joints impact toughness increase; the microstructure is refined. Argon-arc one-sided high-speed pipes welding for gas and oil pipelines process has been developed, which due to argon use, provides decrease in near-electrode voltage drops sum, in potential gradient and arc voltage, in heat input and heat energy, ensures welding stresses reduction, and welding baths liquid metal crystallization rate increase, microstructure grinding, increase in arc self-regulation, process stability, the quality increase as well as increase in welded joints impact toughness by 2-2,5 times.*

**Keywords:** welded joints impact toughness, welding arc energy characteristics, heat input, welding stresses, microstructure grinding, argon-arc one-sided high-speed pipes welding for gas and oil pipelines.

**Постановка проблеми.** Одностороннє високошвидкісне зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, які виготовляються з високоміцних сталей типу 10Г2С1, 09Г2С, експлуатуються в умовах високих тисків і низьких температур, обмежено труднощами забезпечення стабільності процесу, формування і ударної в'язкості зварних з'єднань, особливо при низьких температурах. Тому розробка процесу одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, який забезпечує підвищення саморегулювання дуги, стабільності процесу, якості та ударної в'язкості зварних з'єднань, є важливою науково-технічною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Формування швів при односторонньому високошвидкісному зварюванні визначається стабільністю процесу, тому для попередження витікання рідкого металу з ванни і утворення підрізів необхідно посилити процес саморегулювання дуги, особливо при зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей, коли зростає магнітне дуття [1-11]. Стабільність процесу порушується внаслідок відхилення дуги під дією поперечного магнітного поля зварювального струму, що протікає по трубі. Під дією електромагнітної сили дуга відхиляється в сторону меншого магнітного поля до природного обриву так, що дугу неможливо закрити флюсом. При цьому напруга зростає, струм падає. Електрод подається, закорочується на виріб і знову збуджується дуга. При закороченні на виріб струм зростає, напруга зменшується. Процес періодично повторюється. В результаті зміни режиму порушується формування швів, які стають нерівномірними по ширині і глибині проплавлення. Порушення стабільності процесу при зварюванні труб загальновідомо, проте процеси у дузі досліджено недостатньо [1-11].

**Мета статті** – вивчення природи регулювання енергетичної характеристики і розробка процесу одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, що забезпечує стабільність процесу, підвищення якості та ударної в'язкості зварних з'єднань.

**Виклад основного матеріалу.** Процеси, які відбуваються в зварювальній ванні, залежать від дуги, яка розплавляє електроди і флюс. При зварюванні дуга визначає тепловкладен-

ня в основний метал, розподіл температури, магнітне поле, рух рідкого металу в ванні і формування швів. Тому дослідженням процесів в дузі приділяється велика увага [3]. При односторонньому зварюванні дуга занурюється в основний метал, посилюється охолодження, яке призводить до порушення стабільності процесу, яке визначається енергетичною характеристикою дуги.

Дуга – це електричний потужнострумний розряд в газах, який характеризується низькою напругою, високою щільністю струму у поверхні катода і високою концентрацією часток в катодній області [6]. У дузі розрізняють три області: катодну, анодну і стовп. Катодне падіння рухається по катоду. Стовп грає роль простого газового провідника, що з'єднує катодну пляму з анодом. Головна роль належить катоду [6], який забезпечує регенерацію зарядів. Допоміжна роль стовпа дуги підтверджується тим, що при зменшенні відстані між електродами ці частини розряду зникають, тоді як катодна пляма залишається поки існує дуговий розряд.

Під дією власного магнітного поля катодна пляма рухається по катоду [6]. При зварюванні плавленням переважає автоелектронна емісія, що підтверджується відсутністю зниження температури катода при підвищенні його емісійної здатності і отриманими І.Г. Кесаєвим високими значеннями щільності струму  $10^{11} \text{ А/м}^2$  [6].

Кількість енергії, що виділяється в кожній з областей, визначається умовами існування дугового розряда:

$$q = IU_K + IU_A + IEL_D, \text{ Дж/с}, \quad (1)$$

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.

Розподіл енергії в дузі визначає стабільність процесу, формування швів і ударну в'язкість зварних з'єднань. Електрод і основний метал розплавляються енергією, що виділена на катоді і аноді, яка визначається сумою приелектродних падінь напруги. Градієнт потенціалу стовпа дуги залежить від радіусу стовпа і питомої електричної провідності [3]:

$$E = \frac{I}{\pi R^2 \gamma}, \text{ В/м}, \quad (2)$$

де  $R$  – радіус стовпа, м;  $\gamma$  – питома електрична провідність,  $\text{Ом}^{-1}$ .

Найбільш повно енергетичні характеристики дуг, які впливають на розплавлення, перенесення електродного металу і формування швів, вивчені під час зварювання під флюсом Г.І. Лєсковим [7], за методикою якого визначали статичну характеристику дуги.

Дослідження впливу способу зварювання на статичну характеристику  $U = f(ld)$  (рис.) проводили на спеціальній установці, яка забезпечує підйом електроду на задану відстань за допомогою потужної пружини. При цьому знімали на осцилограмі величину струму і напругу на дузі. Величина струму була 280-300 А, діаметр електрода  $2 \cdot 10^{-3}$  м. Електрод закорочували на пластину, включали електросхему, осцилограф і високошвидкісну кінозйомку кінокамерою СКС-1М, яка фіксувала збудження дуги, підйом електрода на задану відстань за допомогою установки. Дослідження проводили під флюсом АН-348АМ, в аргоні, в середовищі вуглекислого газу, гелії на постійному струмі прямої полярності. В якості джерела живлення для підвищення стабільності малопотужних дуг застосовували два послідовно з'єднаних випрямляча, що забезпечують напругу холостого ходу  $U_{xx} = 150 \text{ В}$ .

Побудову статичних характеристик  $U = f(ld)$  (рис.) виробляли шляхом вимірювання напруги по осцилограмі при заданій відстані між електродами. Зі збільшенням довжини дуги напруга зростає. Суму приелектродних падінь напруги і градієнта потенціалу в стовпі визначали шляхом вимірювання напруги при заданій відстані між електродами. Змінюючи відстань між електродами і вимірюючи напругу на дузі, шляхом екстраполяції залежності  $U = f(ld)$  до нульового значення  $ld = 0$  визначали суму приелектродних падінь напруги. Перехідні процеси в дузі протікають швидко  $< 10^{-4}$  с, тому атмосфера дуги стає рівноважною до розплавлення електродів і зміни відстані між ними. Тому цей метод застосовано для вимірювання енергетичної характеристики дуги.

Встановлено (рис.), що при зварюванні під флюсом АН-348АМ сума приелектродних падінь напруги максимальна  $U_{K+A} = 21$  В, в середовищі вуглекислого газу  $U_{K+A} = 19$  В, в аргоні  $U_{K+A} = 17$  В, в гелії  $U_{K+A} = 11,5$  В. Градієнт потенціалу в стовпі дуги також максимальний при зварюванні під флюсом  $E = 4,3$  В/мм, в середовищі вуглекислого газу  $E = 2,8$  В/мм, в аргоні  $E = 2,5$  В/мм, в гелії  $E = 2,4$  В/мм. З підвищенням суми приелектродних падінь напруги та градієнту потенціалу стабільність процесу знижується. Тому для підвищення стабільності процесу, якості та ударної в'язкості зварних з'єднань найбільш доцільно використовувати зварювання в аргоні та гелії. З урахуванням високої ціни гелію для підвищення стабільності процесу необхідно проводити зварювання в аргоні, ціна якого значно нижче.

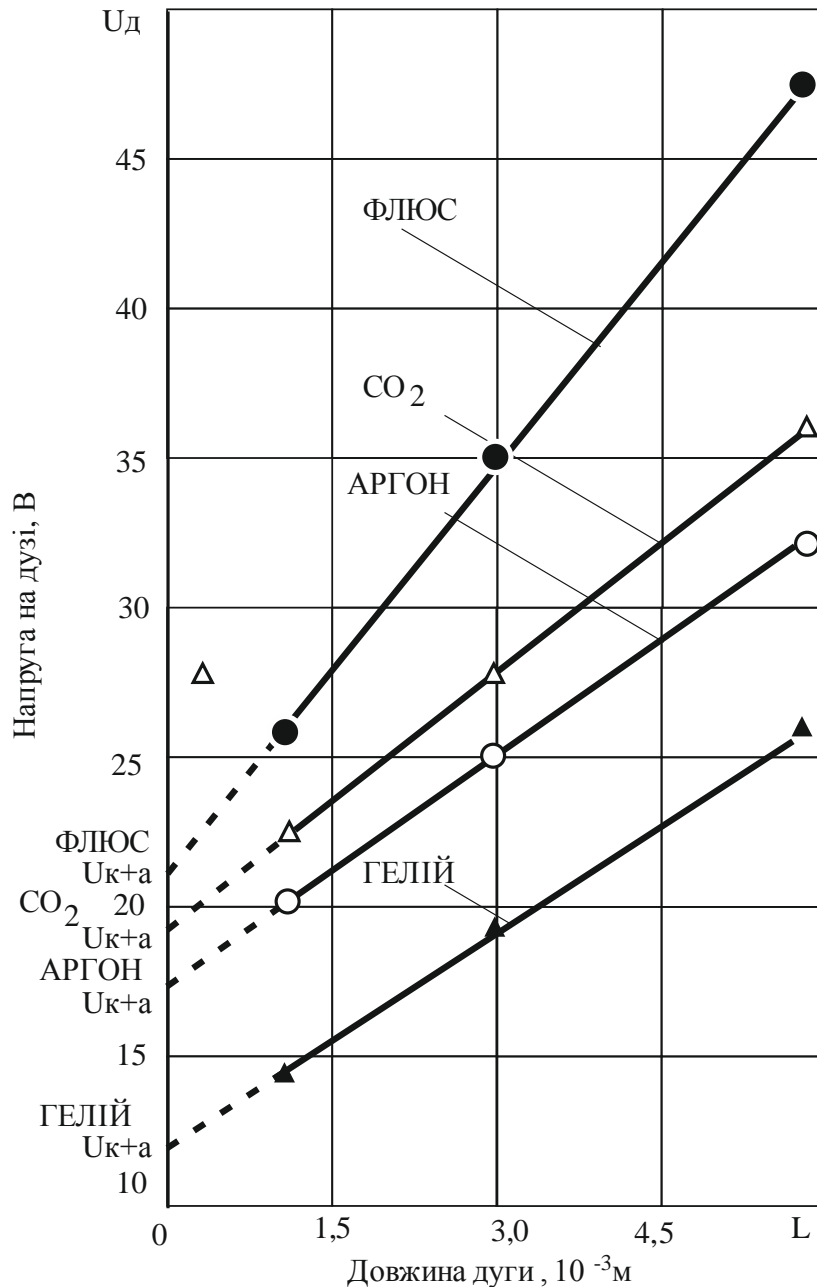


Рисунок – Енергетична характеристика зварювальної дуги

Процес зварювання в аргоні характеризується високою щільністю струму 100-120 А/мм<sup>2</sup>, так як використовується електрод малих діаметрів, низьким значенням суми приелектродних падінь і градієнта потенціалу в дузі. Аргон – нейтральний газ, що попереджує вигорання легуючих елементів. Аргон знижує поверхневий натяг, забезпечує струменевий переніс крапель і

стабільність процесу, значно знижує розбрикування. Для попередження утворення водневих пор використовують суміш аргону 88% з вуглекислим газом 12%. Ціна аргону нижче, ніж вуглекислого газу.

Ефективним способом підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань є одностороннє високошвидкісне зварювання на низькій погонній енергії, що забезпечує зниження тепловкладення і зварювальних напруг, мінімальне порушення рівноваги в металі, здрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані та підвищення міжатомних зв'язків.

При аргонодуговому односторонньому високошвидкісному зварюванні зниження погонної енергії забезпечується за рахунок зниження суми приелектродних падінь напруги, градієнта потенціалу стовпа, напруги на дузі, зменшення діаметра електрода, підвищення щільності струму і ефективності тепловкладення. Зниження погонної енергії забезпечує зменшення зварювальних напруг, зростання швидкості кристалізації рідкого металу зварювальної ванни, здрібнення мікроструктури, підвищення міжатомних зв'язків і ударної в'язкості зварних з'єднань.

На основі встановлених закономірностей регулювання енергетичної характеристики дуги розроблено процес аргонодугового одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, який забезпечує стабільність процесу, якісне формування швів і підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань в 2-2,5 рази.

Розроблений процес аргонодугового одностороннього високошвидкісного зварювання і встановлені закономірності регулювання енергетичної характеристики дуги можуть бути використані при односторонньому високошвидкісному зварюванні котлів залізничних цистерн.

Подальші дослідження в даному напрямку є перспективними, так як дозволять розробити нові процеси одностороннього високошвидкісного зварювання, що забезпечують підвищення якості та ударної в'язкості зварних з'єднань.

### Висновки

1. Одностороннє зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, які виготовляються з високоміцних сталей типу 10Г2С1, 09Г2С і експлуатуються в умовах високих тисків і низьких температур, обмежено труднощами забезпечення стабільності процесу, якості і ударної в'язкості зварних з'єднань.

2. Ефективним способом підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань є зниження погонної енергії, що забезпечує зменшення тепловкладення, зварювальних напруг, подрібнення мікроструктури, зниження міжатомної відстані та зростання міжатомних зв'язків. Мінімум енергії – максимум ударної в'язкості зварних з'єднань.

3. Встановлено, що при аргонодуговому зварюванні змінюється енергетична характеристика дуги, знижується сума приелектродних падінь напруги, градієнт потенціалу в стовпі дуги, напруга на дузі, знижується погонна енергія, зварювальні напруги, зростає швидкість кристалізації рідкого металу зварювальної ванни, здрібнюється мікроструктура, підвищуються міжатомні зв'язки, саморегулювання дуги, стабільність процесу та ударна в'язкість зварних з'єднань.

4. Розроблено процес аргонодугового одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, який забезпечує за рахунок аргону зниження суми приелектродних падінь напруги, градієнта потенціалу і напруги дуги, зменшення погонної енергії, тепловкладення, зварювальних напруг, зростання швидкості кристалізації рідкого металу зварювальної ванни, подрібнення мікроструктури, саморегулювання дуги, стабільність процесу, підвищення якості і ударної в'язкості зварних з'єднань в 2-2,5 рази.

### 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; НАН Украины; Институт электросварки им. Е.О.Патона. – К., 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. : Иностранная литература, 1961. – 369 с.
5. Кривцун И.В. Особенности токопереноса в анодной области дугового разряда / И.В. Кривцун, И.М. Парнета // Автоматическая сварка. – 1993. – № 3. – С. 28-30.
6. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги / И.Г. Кесаев. – М. : Наука, 1968. – 244 с.
7. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга / Г.И. Лесков. – М. : Машиностроение, 1970. – 334 с.
8. Потапьевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом / А.Г. Потапьевский. – М. : Машиностроение, 1974. – 239 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. Зависимость параметров управляющего магнитного воздействия от энерговложения встык при дуговой сварке / В.П. Черныш, Р.Н. Рыжов //Автоматическая сварка. – 1998. – № 5. – С. 49-51.

#### References:

1. Raizer Yu.P. *Fizika gazovogo razriada* [Gas discharge physics]. Moscow, Nauka Publ., 1992. 536 p. (Rus.)
2. Krivtsun I.V. *Kombinirovannye lazerno-dugovye protsessy obrabotki materialov i ustroistva dlia ikh realizatsii*. Diss. dokt. Techn. nauk [Combined laser-arc processes for processing materials and attachments for their implementation. Doct. tech. sci. diss.]. Kiev, 2002, 393 p. (Rus.)
3. Granovskiy V.L. *Elektricheskii tok v gaze. Ustanovivshiisia tok* [Electric current in gas. Steady-state current]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 543 p.
4. Finkelburg V., Mekker G. *Elektricheskije dugi i termicheskaja plazma* [Electric arcs and thermal plasma]. Moscow, Inostrannaia literature Publ., 1961. 369 p. (Rus.)
5. Krivtsun I.V., Parneta I.M. Osobennosti tokoperenosa v anodnoi oblasti dugovogo razriada [Features of current transfer in the anodic area of the arc discharge]. *Avtomaticheskaja svarka – Automatic welding*, 1993, no. 3, pp. 28-30. (Rus.)
6. Kesaev I.G. *Katodnye protsessy elektricheskoi dugi* [Cathodic processes of electric arc]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 244 p. (Rus.)
7. Leskov G.I. *Elektricheskaja svarochnaia duga* [Electric welding arc]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 334 p. (Rus.)
8. Potapievsky A.G. *Svarka v zashchitnikh gazakh plaviashchimsia elektrodom* [Welding in protective gases with a consumable electrode]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 239 p. (Rus.)
9. Chernysh V.P., Kuznetsov V.D., Briskman A.N., Shelenkov G.M. *Svarka s elektromagnitnym peremeshivaniem* [Welding with electromagnetic stirring]. Kiev, Tekhnika Publ., 1983. 127 p. (Rus.)
10. Rzhov R.M., Kuznetsov V.D. *Magnitne keruvannia yakistiu zvarnikh z'ednan'* [Magnetic quality control of welded joints]. Kiev, Ekotekhnologija Publ., 2010. 288 p. (Ukr.)
11. Chernysh V.P., Rzhov R.N. Zavisimost' parametrov upravliaiushchego magnitnogo vozdeistviia ot energovlozheniia vстыk pri dugovoi svarke [Dependence of the parameters of the controlling magnetic effect on the butt-in energy input during arc welding]. *Avtomaticheskaja svarka – Automatic welding*, 1998, no. 5, pp. 49-51. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самотугін  
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 23.09.2020