

**Анатолій Жерносеков<sup>1</sup>, Валерій Костін<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, старший науковий співробітник,  
завідувач відділу імпульсних процесів і технологій дугового зварювання  
Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України (Київ, Україна)  
E-mail: [zhernosekov@paton.kiev.ua](mailto:zhernosekov@paton.kiev.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>. Scopus AuthorID: 6506774085

<sup>2</sup>доктор технічних наук, старший науковий співробітник,  
провідний науковий співробітник відділу фізико-хімічних досліджень матеріалів  
Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України (Київ, Україна)  
E-mail: [valerykkos@gmail.com](mailto:valerykkos@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>. Scopus AuthorID: 7006517066

**ВПЛИВ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ  
В ЗАХИСНИХ ГАЗАХ НА РОЗПОДІЛ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ  
У МЕТАЛІ ШВІВ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ**

Значне місце серед перспективних дугових способів зварювання посідає імпульсно-дугове зварювання плавким електродом. У теперішній час воно одержало подальший розвиток і широко застосовується в багатьох галузях промисловості: аерокосмічній, суднобудівній, хімічній, транспортній. Сучасне устаткування для цього способу є досить уніфікованим та не завжди може використовуватись для вирішення завдань автоматизації процесу.

Дослідження щодо розподілення неметалевих включень проводились із застосуванням розробленого імпульсного джерела живлення із багаторівневою формою імпульсу струму та систем автоматичної стабілізації параметрів процесу зварювання. Збільшення вольтоуту електродного дроту, що є характерним збуренням, наприклад, при механізованому імпульсно-дуговому зварюванні, може призвести до збільшення розмірів неметалевих включень. Застосування систем автоматичної стабілізації середніх значень напруги на дузі та зварювального струму дозволяє суттєво знизити об'ємну частку неметалевих включень. Найкращі результати щодо зменшення об'ємної частки та розмірів включень досягаються за рахунок застосування одночасно двох систем автоматичної стабілізації параметрів процесу імпульсно-дугового зварювання плавким електродом.

**Ключові слова:** неметалеві включення; вуглецеві сталі; імпульсно-дугове зварювання; виліт електрода; системи автоматичної стабілізації; параметри імпульсу.

Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 10.

**Актуальність теми дослідження.** У теперішній час імпульсно-дугове зварювання плавким електродом у захисних газах (ІДЗ) одержало подальший розвиток і широко застосовується в багатьох галузях промисловості: транспортній, суднобудівній, хімічній, аерокосмічній.

На низьколегованих сталях у міру збільшення тепловкладення або зменшення швидкості охолодження шва, мікроструктура змінюється від мартенситної до структури нижнього бейніту, верхнього бейніту, а потім і ферито-перлітної суміші. У деяких випадках мікроструктура металу швів складається з верхнього бейніту з жорсткою мартенсито-аустенітною складовою, що призводить до погіршення в'язкості таких швів. Одним із методів запобігання цього є використання ІДЗ, що дозволяє значно зменшити тепловкладення при відповідному збереженні пластичної мікроструктури низьколегованої сталі за рахунок її подрібнення. Відомий метод подрібнення мікроструктури металу швів, у якому зростання  $\gamma$ -зерен гальмується дрібними неметалевими включеннями, наприклад частинками TiN або TiO, які рівномірно розпорошені у металі швів. Частинки TiO, що утворюються всередині  $\gamma$ -зерен, служать місцями зародження фериту (IGF). Ферит росте радіально від TiO частинок, і, як наслідок, грубі  $\gamma$ -зерна поділяються на дрібніші фрагменти, тим самим формуючи дрібнозернисту структуру, яка забезпечує високу міцність та в'язкість металу швів.

Тому актуальною задачею є дослідження впливу параметрів ІДЗ при дії виробничих збурень на розподіл неметалевих включень, мікроструктуру металу швів низьколегованих сталей.

**Постановка проблеми.** Неметалеві включення в металі швів значно впливають на структуру та властивості металу швів. Від їхніх розмірів залежать багато механічних властивостей зварних конструкцій. Ступінь впливу неметалевих включень на властивості металу швів залежить від їхньої форми, розмірів та розташування. Розподіл неметалевих

включень залежить також від способу зварювання. Наприклад, при ручному дуговому зварюванні хромистої сталі мартенситного класу СА-6NM електродами FOXCN 13/4 (BOHLER), неметалеві включення представляють оксиди та силікати розміром 1,3...2,3 мкм, а при зварюванні плавким електродом на постійному струмі в суміші 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> їхній розмір зменшується до 0,5...0,9 мкм [1]. Достатньо мала кількість публікацій присвячена впливу форми імпульсного струму на неметалеві включення, а також визначення розподілення кількості неметалевих включень за розмірами залежно від дії виробничих збурень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Імпульсно-дугове зварювання – це контрольований метод перенесення металу плавкого електрода в захисному газі. Параметри імпульсів струму помітно впливають на характеристики зварювання, а саме стабільність дуги, якість зварного шва, зовнішній вигляд і геометрію шва. Неправильний вибір параметрів імпульсу може призвести до дефектів зварного шва, включаючи нерівномірне формування поверхні валика, несплавлення, підрізи та інші [2]. Тому важливо підібрати правильне поєднання параметрів імпульсного струму для зварювання матеріалів із різними теплофізичними властивостями в умовах дії збурень.

Електрозварювальне обладнання для дугового зварювання плавким електродом у захисних газах реалізує основні типи перенесення металу електрода, набувають розвитку перехідні типи перенесення металу електрода. Керований імпульсно-дуговий процес ефективно застосовується при зварюванні великого спектра металів, а також у багатьох комбінованих технологіях. Розробка сучасного електрозварювального обладнання, що реалізує різні типи перенесення металу електрода, має відбуватися з урахуванням керованого імпульсно-дугового процесу зварювання [3; 4]. Імпульсно-дугове зварювання дозволяє зменшити величину розбризкування металу, ширину зони термічного впливу, збільшити глибину проплавлення порівняно зі стаціонарним зварюванням [5; 6]. Так, у роботі [7] досліджується вплив режимів імпульсно-дугового зварювання на зміну параметрів шва, зону термічного впливу зварних з'єднань та механічні властивості низьколегованих сталей. Також актуальними залишаються роботи щодо оптимізації режимів імпульсно-дугового зварювання з використанням різних дротів, включаючи високолеговані зварювальні матеріали [8]. Перспективним є використання імпульсних режимів при зварюванні низьколегованих сталей трубопроводів [9].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Серійні джерела живлення для імпульсно-дугового зварювання плавким електродом переважно реалізують прямокутну форму імпульсу струму (рис. 1). Така форма не є оптимальною з точки зору управління процесами плавлення та перенесення крапель електродного металу. Аналіз публікацій показує, що також недостатньо розглянуті дослідження стосовно принципів управління процесом ІДЗ при дії різних збурень.

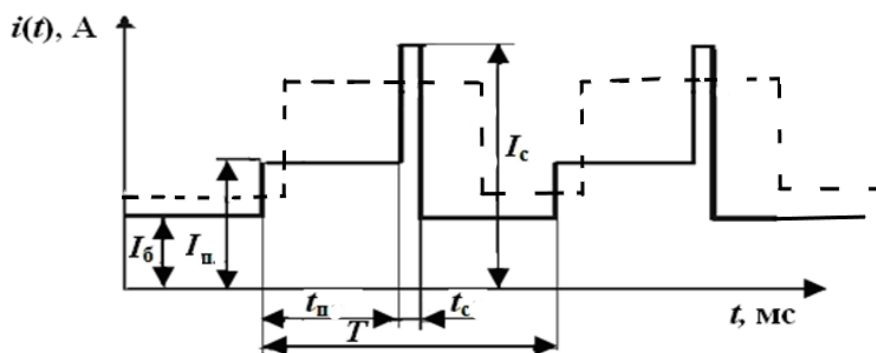


Рис. 1. Імпульси зварювального струму серійних джерел живлення (перервана лінія) та джерела живлення розробленого в ІЕЗ ім. Є. О. Патона (суцільна лінія)

В Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України була розроблена концепція багаторівневого імпульсного струму, у якому розділені процеси плавлення та перенесення металу (рис. 1). Базовий струм  $I_b$  використовується тільки для підтримання горіння дуги, імпульс плавлення з рівнем  $I_n$  та тривалістю  $t_n$  управляє плавленням краплі мінімізуючи її випаровування, а імпульс скидання з рівнем  $I_c$  та тривалістю  $t_c$  відповідає за перенесення краплі у всіх просторових положеннях. Також розроблені різні види систем автоматичної стабілізації процесу імпульсно-дугового зварювання (рис. 2) [10].

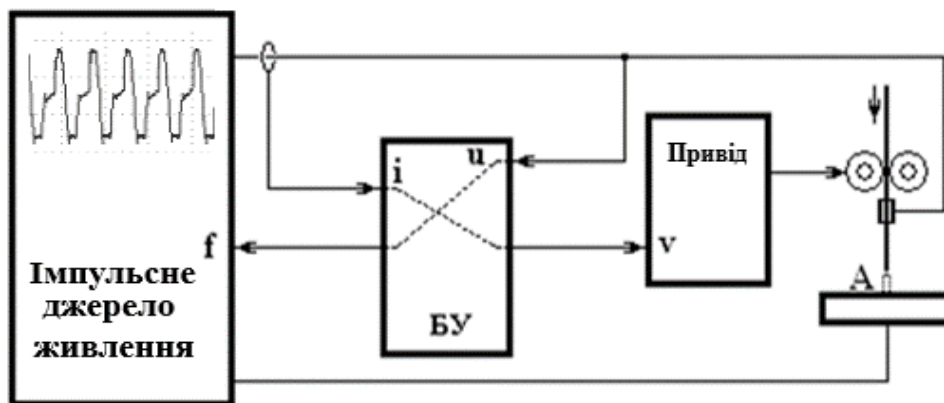


Рис. 2. Структурна схема імпульсного джерела живлення із системами автоматичної стабілізації параметрів процесу

Вирішенню задачі щодо розподілення неметалевих включень при імпульсно-дуговому зварюванні при зміні вильоту електрода присвячені дослідження, які наведені в цій статті.

**Метою статті** є підвищення якості металу швів при імпульсно-дуговому зварюванні на низьколегованих сталях шляхом зменшення неметалевих включень шляхом управління формою зварювального струму.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження щодо розподілення неметалевих включень проводились з застосуванням розробленого устаткування: імпульсного джерела живлення із багаторівневою формою імпульсу струму та систем автоматичної стабілізації параметрів процесу зварювання (S). Система автоматичної стабілізації середнього значення напруги на дузі (SU) була виконана з керуючим діянням на частоту імпульсів джерела живлення, а система стабілізації середнього значення струму (SI) з керуючим діянням на швидкість подавання зварювального дроту. Дослідження виконувались при імпульсно-дуговому зварюванні (наплавлення) на низьколегованій сталі 14Г2 дротом Св-08Г2С діаметром 1,2 мм у суміші газів 82 %Ar + 18 % CO<sub>2</sub> при: а) номінальному вильоті електрода; б) підвищеному вильоті без систем автоматичної стабілізації; в) підвищеному вильоті з SU; г) підвищеному вильоті із застосування обох систем SI + SU.

Методами оптичної металографії було визначено мікроструктурний стан металу швів при різних режимах ІДЗ. На рис. 3 наведено мікроструктуру металу в центрі шва при автоматичній ІДЗ без збурень по вильоту та зі зміною вильоту електрода. Основний метал сталі 14Г2 характеризується структурою, що складається із суміші верхнього та нижнього бейніту. При збільшенні вильоту спостерігається верхній та нижній бейніт, а також велика кількість мартенситної складової (рис. 3, б). Феритна складова практично відсутня. Застосування SU при підвищеному вильоті покращує структурні складові наплавленого металу швів. З'являються тонкі феритні прошарки, а також невеликі ділянки структурно-вільного фериту, деякі ділянки фериту орієнтовані по Відманштету. Також

спостерігаються більше дрібнодисперсна, порівняно зі структурою без S, суміш верхнього і нижнього бейніту (рис. 3, в). При застосуванні обох систем SI + SU у мікроструктурі металу швів, крім верхнього та нижнього бейніту, у структурі спостерігаються ділянки голчастого фериту (рис. 3, з).

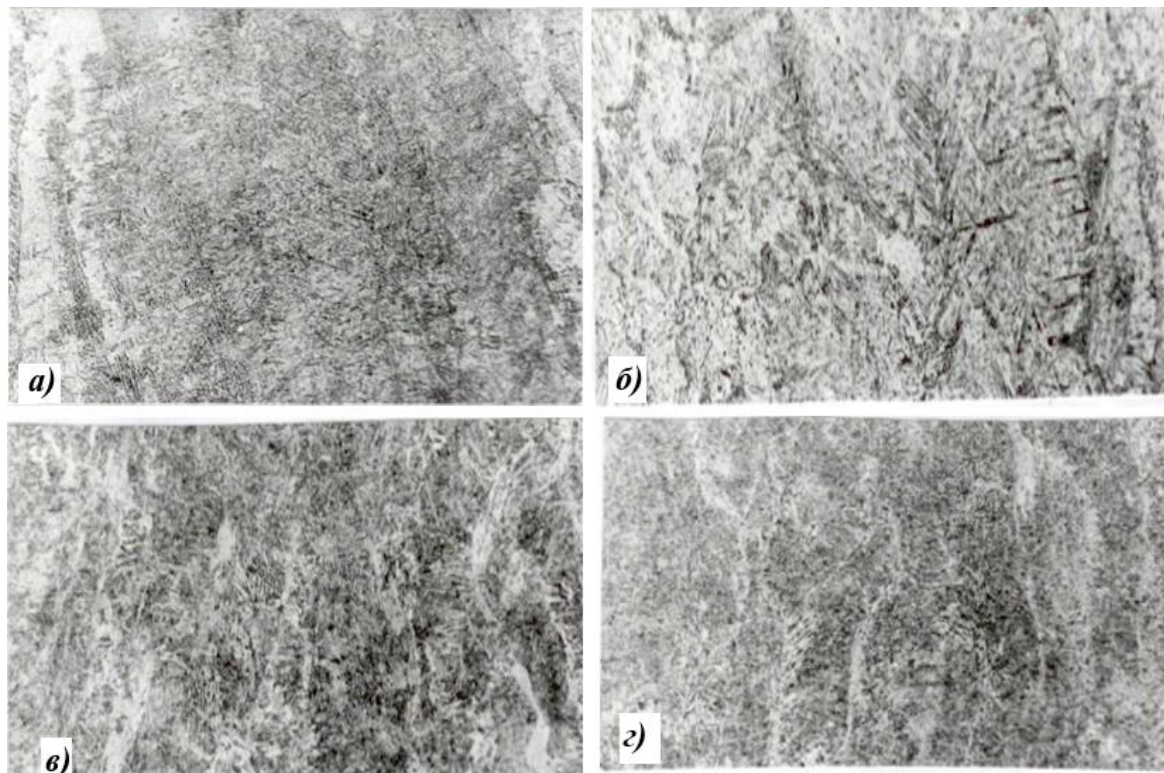


Рис. 3. Мікроструктура металу швів (збільшення  $X200$ ) при автоматичній ІДЗ сталі 14Г2 дротом Св-08Г2С діаметром 1,2 мм у суміші газів 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>;

$V_{зв} = 23$  м/год,  $U_{д.сер} = 25$  В,  $I_{зв.сер} = 250$  А при:

- а – номінальному вильоті електрода  $l_w = 13$  мм; б – підвищеному вильоті  $l_w = 25$  мм (без систем автоматичної стабілізації); в – підвищеному вильоті  $l_w = 25$  мм з SU; з – підвищеному вильоті  $l_w = 25$  мм із застосування обох систем SI + SU

Дослідження розподілу неметалевих включень за кількістю та розмірами в металі швів на середньому струмі  $I = 250$  А при зміні довжини вильоту ( $l_w$ ) наведено на (рис. 4). Об'ємні частки неметалевих включень (див. табл.).

Таблиця – Об'ємна частка неметалевих включень при дії збурень по вильоту електрода

Режим	Значення $l_w$ , мм	Об'ємна частка неметалевих включень, %
Без S	13	0,139
Без S	25	0,472
SU	25	0,261
SU + SI	25	0,201

Без застосування систем автоматичної стабілізації процесу імпульсно-дугового зварювання плавким електродом при дії збурень по вильоту об'ємна частка неметалевих включень у металі шва сталі 14Г2 збільшується. Зниження об'ємної частки неметалевих включень спостерігається при застосуванні обох систем стабілізації SU та SI (рис. 4 та табл.).

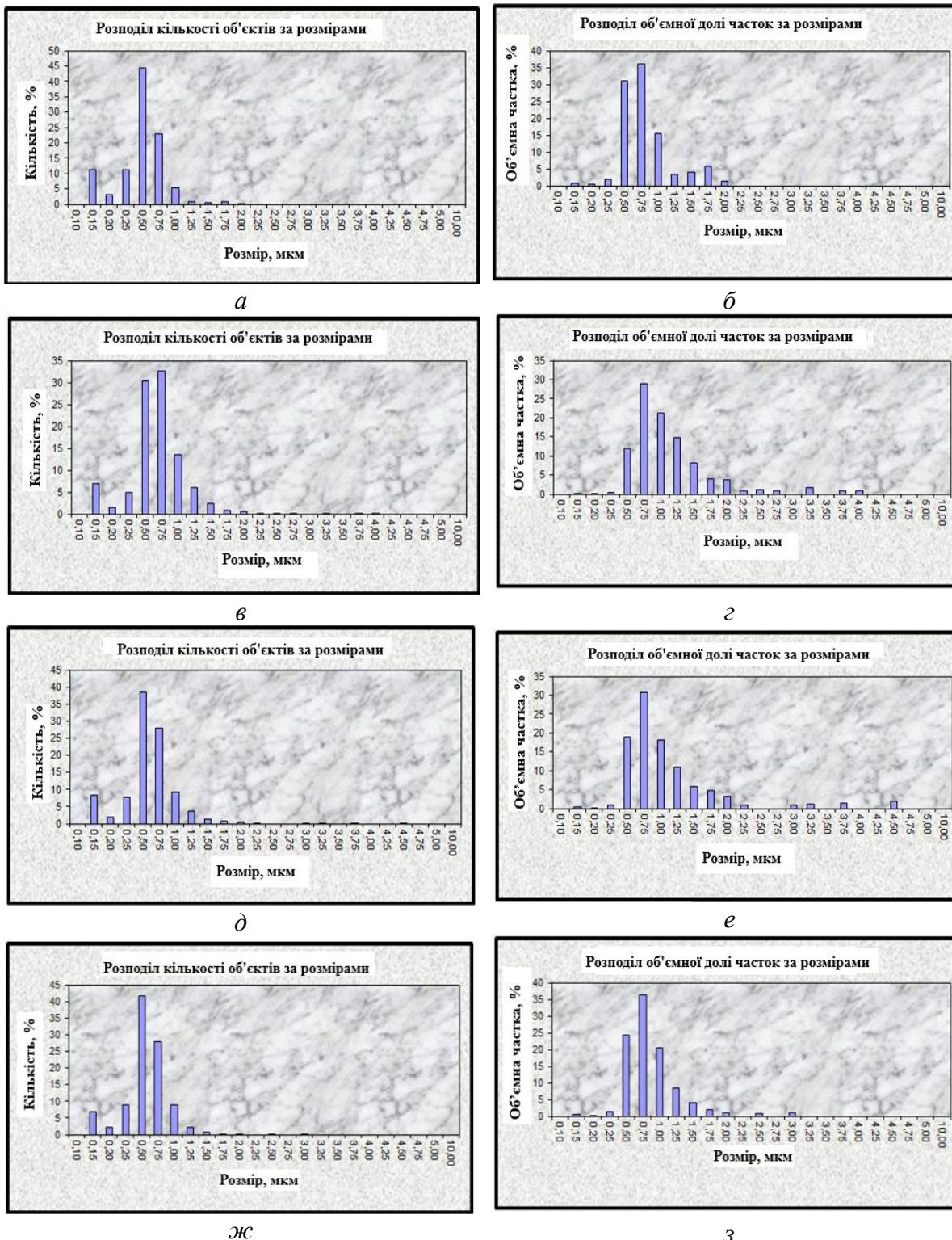


Рис. 4. Розподіл неметалевих включень по кількості (а, в, д, ж) та об'ємної частки (б, г, е, з) у металі швів при ІДЗ сталі 14Г2:

а, б –  $I = 250 \text{ A}$ ,  $lw = 13 \text{ мм}$ , без S; в, г –  $I = 250 \text{ A}$ ,  $lw = 25 \text{ мм}$ , без S;  
 д, е –  $I = 250 \text{ A}$ ,  $lw = 25 \text{ мм}$ , SU; ж, з –  $I = 250 \text{ A}$ ,  $lw = 25 \text{ мм}$ , SU та SI

Аналіз отриманих результатів показує, що найбільша об'ємна частка неметалевих включень формується при ІДЗ без використання систем автоматичної стабілізації параметрів процесу зварювання (S) та довжини вильоту ( $lw = 25$  мм) та становить 0,472 %. Найменша об'ємна частка неметалевих включень формується при ІДЗ при номінальній довжині вильоту ( $lw = 13$  мм) та становить 0,139 %. При використанні системи автоматичної стабілізації середнього значення напруги на дузі (SU) або використанні обох систем SI + SU об'ємна частка неметалевих включень у металі швів низьколегованих сталей становить відповідно 0,261 % (тільки SU) та 0,201 % (сумісно SU + SI). У зв'язку з тим, що оптимальна частка неметалевих включень, що утворює голчастий ферит, становить 0,25 %, то саме ці режими забезпечують необхідний структурний стан металу швів та необхідний рівень механічних властивостей.

**Висновки.** Збільшення вильоту електродного дроту, що є характерним збуренням, наприклад, при механізованому імпульсно-дуговому зварюванні, може призвести до збільшення розмірів неметалевих включень до 4,0 мкм. Застосування систем автоматичної стабілізації середніх значень напруги на дузі та зварювального струму дозволяє суттєво знизити об'ємну частку неметалевих включень. Найкращі результати щодо зменшення об'ємної частки та розмірів включень досягаються за рахунок застосування одночасно двох систем автоматичної стабілізації параметрів процесу імпульсно-дугового зварювання плавким електродом.

#### Список використаних джерел

1. Технологія МІГ зварювання хромистої сталі мартенситного класу SA-6NM / А. Р. Гаврик, А. К. Царюк, І. Г. Осипенко, О. В. Линник, О. В. Вавілов, О. Г. Кантор // Автоматичне зварювання. – 2023. – № 4. – С. 28-34. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.04.05>.
2. Palani, P. K. Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding / P. K. Palani, N. Murugan // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – № 172. – P. 1-10.
3. Жерносеков, А. М. Тенденции развития управления процессами переноса металла в защитных газах (Обзор) / А. М. Жерносеков // Автоматическая сварка. – 2012. – № 1. – С. 33-38.
4. Tomoyuki, U. Trends in developments in gas shield ed arc welding equipment in Japan / U. Tomoyuki // The Paton Welding J. – 2013. – № 10-11. – С. 53-60.
5. Effect of pulsed-arc welding modes on the change of weld metal and HAZ parameters of welded joints produced with Sv-08Kh20N9G7T wire / V. D. Poznyakov, A. V. Zavdoveev, A. A. Gajvoronsky et al. // The Paton Welding J. – 2018. – № 9. – С. 7-12.
6. Devakumaran, K. Thermal Characteristics of Weld and HAZ during Pulse Current Gas Metal Arc Weld Bead Deposition on HSLA Steel Plate / K. Devakumaran, P. K. Ghosh // Materials and Manufacturing Processes. – 2010. – № 7. – P. 616-630. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426910903229347>.
7. Вплив режимів імпульсно-дугового зварювання на зміну параметрів шва і ЗТВ зварних з'єднань та механічні властивості низьколегованих сталей / А. В. Завдовеев, В. Д. Позняков, С. Л. Жданов, М. Rogante, Т. Baudin // Автоматичне зварювання. – 2020. – № 12. – С. 23-29. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.12.03>.
8. Оптимізація за розрахунковим методом режимів імпульсно-дугового зварювання з використанням високолегованого зварювального матеріалу / А. В. Завдовеев, В. Д. Позняков, О. А. Гайворонський, А. М. Денисенко, Т. Baudin // Автоматичне зварювання. – 2021. – № 4. – С. 10-15. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.04.02>.
9. Вплив параметрів імпульсно-дугового зварювання на формування металу зварного шва та мікроструктуру зони термічного впливу сталі 09Г2С / С. Ю. Максимов, Д. М. Кражановський, Ю. А. Шепелюк, С. В. Осинська // Автоматичне зварювання. – 2022. – № 3. – С. 11-18. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.03.01>.
10. Жерносеков, А. М. Системы стабилизации процесса механизированной импульсно-дуговой сварки сталей / А. М. Жерносеков // Технологические системы. – 2008. – № 1. – С. 17-19.

### References

1. Havryk, A.R., Tsariuk, A.K., Osypenko, I.H., Lynnyk, O.V., Vavilov, O.V., & Kantor, O.H. (2023). Tekhnolohiia MIH zvariuvannia khromystoi stali martensytneho klasu SA-6NM [Technology of MIG welding of chromium steel of martensitic grade CA-6NM]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding*, 4, 28-34. <https://doi.org/10.37434/as2023.04.05>.
2. Palani, P. K., & Murugan, N. (2006). Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 172, 1–10.
3. Zhernosekov, A.M. (2012). Tendentsii razvittia upravleniia protsessami perenosa metalla v zashchitnykh gazakh (Obzor) [Trends in the development of control of metal transfer processes in protective gases (Review)]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 1, 33-38.
4. Tomoyuki, U. (2013). Trends in developments in gas shield ed arc welding equipment in Japan. *The Paton Welding J.*, 10-11, 53–60.
5. Poznyakov, V.D., Zavdoveev, A.V., Gajvoronsky, A.A. et al.(2018). Effect of pulsed-arc welding modes on the change of weld metal and HAZ parameters of welded joints produced with Sv-08Kh20N9G7T wire. *The Paton Welding J.*, 9, 7-12.
6. Devakumaran, K., & Ghosh, P.K. (2010). Thermal Characteristics of Weld and HAZ during Pulse Current Gas Metal Arc Weld Bead Deposition on HSLA Steel Plate. *Materials and Manufacturing Processes*, 7, 616–630. <https://doi.org/10.1080/10426910903229347>.
7. Zavdoveev, A.V., Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L., Rogante, M., & Baudin, T. (2020). Vplyv rezhymiv impulsno-duhovoho zvariuvannia na zminu parametriv shva i ZTV zvarnykh ziednan ta mekhanichni vlastyvoli nyzkolehovanykh stali [Influence of pulsed-arc welding conditions on change of parameters of weld and haz of welded joints and mechanical properties of lowalloy steels]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding*, 12, 23-29. <https://doi.org/10.37434/as2020.12.03>.
8. Zavdoveev, A.V., Poznyakov, V.D., Gaivoronsky, O.A., Denysenko, A.M., & Baudin, T. (2021). Optymizatsiia za rozrakhunkovym metodom rezhymiv impulsno-duhovoho zvariuvannia z vykorystanniam vysokolehovanoho zvariuvannia materialu [Use of calculation method for optimization of pulse-arc welding modes using highly alloy welding material]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding*, 4, 10-15. <https://doi.org/10.37434/as2021.04.02>.
9. Maksymov, S.Yu., Krazhanovsky, D.M., Shepelyuk, Yu.A., & Osynska, S. V. (2022). Vplyv parametriv impulsno-duhovoho zvariuvannia na formuvannia metalu zvarnogo shva ta mikrostrukturu zony termichnogo vplyvu stali 09H2S [Effect of parameters of pulse-arc welding on the formation of weld metal and microstructure of heat-affected-zone of 09G2S steel]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding*, 3, 11-18. <https://doi.org/10.37434/as2022.03.01>.
10. Zhernosekov, A.M. (2008). Zhernosekov, A. M. Sistemy stabilizatsii protsessu mekhanizyrovannoi ympulsno-duhovoivoi svarky stali [Systems for stabilizing the process of mechanized pulsed-arc welding of steels]. *Tekhnologicheskie sistemy – Technological systems*, 1, 17-19.

Отримано 16.11.2023

UDC 621.791.754

*Anatolii Zhernosekov<sup>1</sup>, Valery Kostin<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Department of Pulsed Processes and Technology of Arc Welding  
Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [zhernosekov@paton.kiev.ua](mailto:zhernosekov@paton.kiev.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>. **Scopus Author ID:** [6506774085](https://orcid.org/0000-0002-6404-2221)

<sup>2</sup>Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher,

Leading Researcher of the Department of Physical and Chemical Research of Materials  
Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [valerykkos@gmail.com](mailto:valerykkos@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>. **Scopus Author ID:** [7006517066](https://orcid.org/0000-0002-2677-4667)

### INFLUENCE OF PULSE ARC WELDING IN SHIELDING GASES ON THE DISTRIBUTION OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN WELD METAL OF LOW-ALLOY STEEL

*A significant place among promising arc welding methods is occupied by pulsed arc welding with a fusible electrode. Nowadays, it has received further development and is widely used in many branches of industry: aerospace, shipbuilding, chemical, transport. The existing equipment for this method is quite unified and cannot always be used to solve the tasks of process automation.*

*Non-metallic inclusions in the weld metal significantly affect the structure and properties of the weld metal. Many mechanical properties of welded structures depend on their size. The degree of influence of non-metallic inclusions on the properties of the weld metal depends on their shape, size and location. The distribution of non-metallic inclusions also depends on the welding method. The purpose of the article is to improve the quality of weld metal during pulse-arc welding on low-alloy steels by reducing non-metallic inclusions by controlling the shape of the welding current.*

*Research on the distribution of non-metallic inclusions was carried out using such developed equipment as a pulse power source with a multi-level current pulse shape and systems for automatic stabilization of welding process parameters. The system of automatic stabilization of the average value of the voltage on the arc was made with the control action on the frequency of pulses of the power source, and the system of stabilization of the average value of the current with the control action on the speed of the welding wire.*

*An increase in the departure of the electrode wire, which is a characteristic disturbance, for example, in mechanized pulse-arc welding, can lead to an increase in the size of non-metallic inclusions. The use of systems of automatic stabilization of the average values of arc voltage and welding current allows to significantly reduce the volume fraction of non-metallic inclusions. The best results in reducing the volume fraction and the size of inclusions are achieved by simultaneously using two systems of automatic stabilization of the parameters of the pulse-arc welding process with a fusible electrode.*

**Key words:** *non-metallic inclusions; carbon steels; pulse-arc welding; electrode voltage; automatic stabilization systems; pulse parameters.*

*Fig.: 4. Table: 1. References: 10.*