

ВПЛИВ РЕЖИМІВ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА ЗМІНУ ПАРАМЕТРІВ ШВА І ЗТВ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

А.В. Завдовсєв¹, В.Д. Позняков¹, С.Л. Жданов¹, М. Rogante², Т. Baudin³

¹ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Rogante Engineering Office, 62012 Civitanova Marche, Italy. E-mail: main@roganteengineering.it

³Université Paris-Saclay, CNRS, Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay, 91405 Orsay, France.

E-mail: thierry.baudin@u-psud.fr

Імпульсно-дугове зварювання характеризується періодично змінюваною потужністю дуги та, завдяки своїм особливостям, дозволяє вирішувати складні технологічні питання при створенні унікальних конструкцій, збільшувати продуктивність процесів зварювання при збереженні на високому рівні фізико-механічних властивостей зварних з'єднань. Існує безліч виробників зварювального обладнання, які впровадили в своєму виробництві ідеї застосування імпульсного зварювання, однак дані про вплив імпульсно-дугового зварювання на параметри швів носять розрізнений характер. Для успішного застосування імпульсно-дугового зварювання у сучасному виробництві виникла необхідність в дослідженнях впливу режимів імпульсно-дугового зварювання на параметри швів і ЗТВ в порівнянні зі зварюванням стаціонарно палаючою дугою, виконаних низьколегованими зварювальними матеріалами. Бібліогр. 20, рис. 7.

Ключові слова: імпульсно-дугове зварювання, зварювання пульсуючою дугою, зона термічного впливу, низьколеговані зварювальні матеріали

Імпульсно-дугове зварювання якісно відрізняється від традиційного зварювання в захисних газах, а також від ручного дугового зварювання модульованим током [1–5]. Цей процес знаходить все більш широке використання при виготовленні зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів, титану та конструкційних сталей міцністю до 500 МПа [6, 7]. Пояснюється це тим, що при імпульсно-дуговому зварюванні розширюються можливості управління процесами плавлення і переносу електродного металу в різних просторових положеннях, поліпшується формування швів, зменшуються об'єми перемішування електродного металу з основним металом та розміри зони термічного впливу [8–16]. Саме з цим пов'язано те, що такі відомі фірми, як Fronius (Австрія), Bohler (Німеччина), ESAB (Швеція), EWM (Німеччина) та інші, значну увагу в своїй діяльності приділяють розробці та виготовленню обладнання для реалізації і розширення можливостей імпульсно-дугового процесу зварювання в захисних газах. Значно слабше в технічній літературі висвітлюються питання щодо впливу параметрів ІДЗ на термічні процеси, які відбуваються в металі ЗТВ зварних з'єднань, оскільки вони позначаються на структурі та механічних властивостях даного металу, на його опірності утворенню холодних тріщин і крихкому руйну-

ванню, тощо. Окрім того існують відмінності у керуванні режимами імпульсно-дугового зварювання у різних виробників. Саме невизначеність цих питань стримує застосування імпульсно-дугового зварювання в захисних газах при виготовленні металевих конструкцій із сталей, які чутливо реагують на термічні процеси та схильні до гартування. Тому на даному етапі в роботі проведені дослідження впливу режимів імпульсно-дугового зварювання з використанням джерела живлення *ewm Phoenix Pulse 501* на формування шву, термічні цикли зварювання та механічні властивості зварних з'єднань низьколегованих сталей.

Методика експерименту. Для вирішення поставленого в роботі завдання на першому етапі проводили наплавлення низьколегованим зварювальним дротом G3Si1 діаметром 1,2 мм, який є аналогом відомого дроту марки Св-08Г2С. Наплавлення здійснювали на пластини товщиною 10 мм зі сталі 09Г2С. Із пластин з наплавленням виготовлялися шліфи, на яких проводили вимірювання параметрів швів і ЗТВ. Геометричні параметри швів визначалися шляхом оцифрування та застосування спеціального програмного забезпечення *AxioVision 4.6*. Для виявлення ЗТВ шліфи піддавали макротравленню розчином хлорного заліза. Запис ТЦЗ ділянки перегріву ЗТВ проводився з

Завдовсєв А.В. – <https://orcid.org/0000-0003-2811-0765>, Позняков В.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-8581-3526>, Жданов С.Л. – <https://orcid.org/0000-0003-3570-895X>, Rogante M. – <https://orcid.org/0000-0002-6846-0826>, Baudin T. – <https://orcid.org/0000-0002-6765-360X>

© А.В. Завдовсєв, В.Д. Позняков, С.Л. Жданов, М. Rogante, Т. Baudin, 2020

використанням хромель-алюмелевих термопар діаметром 0,5 мм, які встановлювали на ділянки ЗТВ, що нагрівалися до температури 1200 °С.

До ключових параметрів імпульсно-дугового зварювання відносяться: струм імпульсу (I_i), струм паузи (I_n), час імпульсу (t_i), час паузи (t_n). Для спрощення характеристики імпульсного процесу прийняті усталенні допоміжні параметри: середній (I_{cp}) та ефективний струм зварювання (I_{ef}), скважність (δ) та частота (f). Для оцінки впливу режимів імпульсно-дугового зварювання на параметри шва обрано такі режими: зварювальний струм $I_{cp} = 120, 140, 160, 180, 200, 220$ А, напруга $U = 21, 22, 24, 26, 28, 30$ В, швидкість зварювання 15 м/год, захисний газ – суміш $Ag + 18\% CO_2$. В якості джерела струму використовувався випрямляч інверторного типу марки ewm Phoenix Pulse 501, який забезпечує різну частоту проходження імпульсів. Параметри імпульсно-дугового зварювання скважність та частота імпульсів для джерела живлення ewm Phoenix Pulse 501, при роботі в імпульсному режимі, запрограмовані виробником, користувач має можливість керувати лише величиною середнього струму зварювання. Тому в подальшому ми оперуємо величиною середнього струму зварювання при імпульсно-дуговому зварюванні. Слід зауважити, що зі збільшенням середнього струму зварювання зростає частота f від 89 до 153 Гц та скважність δ від 0,2 до 0,36.

Для визначення зварювально-технологічних характеристик (рис. 1) джерела струму було використано цифровий осцилограф UTD2000СЕХ-II, який дозволяє проводити фіксацію вольт-амперної характеристики в широких діапазонах. Для запису осцилограм використовували шунт 75ШСМ з опором 150 мкОм, що дозволяє реєструвати струм зварювання до 500 А.

За частотою проходження імпульсів відрізняють імпульсно-дугове зварювання ($f \geq 25$ Гц) та зварювання пульсуючою дугою ($f \leq 25$ Гц) [17–20]. З використанням пульсуючої дуги підбирали оптимальні режими пульсації. В цьому випадку режим зварювання був наступним: зварювальний струм імпульсу $I_i = 140$ А, ток паузи (базовий струм) складав 80 % від струму імпульсу $I_n = 112$ А; напруга на дузі в імпульсі $U_i = 22$ В, напруга на дузі в паузі $U_n = 18$ В, швидкість зварювання $v_{зв} = 15$ м/год, при цьому варіювали час імпульсу t_i та час паузи t_n , а також силу струму в паузі.

На другому етапі, для оцінки впливу імпульсно-дугового зварювання на механічні властивості зварних з'єднань низьковуглецевих сталей S460M та 14X2ГМР були заварені зразки. Механізоване зварювання в захисних газах ($Ag + 18\% CO_2$) з'єднань сталі S460M та 14X2ГМР товщиною 16 мм з V-подібним розкриттям кромки дротом суцільного перерізу G3Si1 та Св-10ХН2ГСМФТЮА діаметром 1,2 мм відповідно. Кореневі проходи при зварюванні цих сталей виконували на мідній підкладці. Зварювання з використанням традиційного процесу (дугою, яка горить стаціонарно), виконували на режимі: $I_{зв} = 180...200$ А, $U_d = 26$ В, $v_{зв} = 15...18$ м/год. Режим автоматизованого імпульсно-дугового зварювання був наступним: $I_{cp} = 220...240$ А, $U_d = 26...28$ В, $v_{зв} = 14...21$ м/год.

З метою проведення механічних випробувань і визначення ударної в'язкості металу ЗТВ виготовляли стандартні зразки. Для випробування на статичний (короткочасний) розтяг із сталі механічним способом виготовляли зразки типу II відповідно до ГОСТ 6996-96 (по 3 зразки на кожен швидкість охолодження). Випробування виконували по ГОСТ 6996-66 при температурі 20 °С. Ударна в'язкість визначалася при випробуванні зраз-

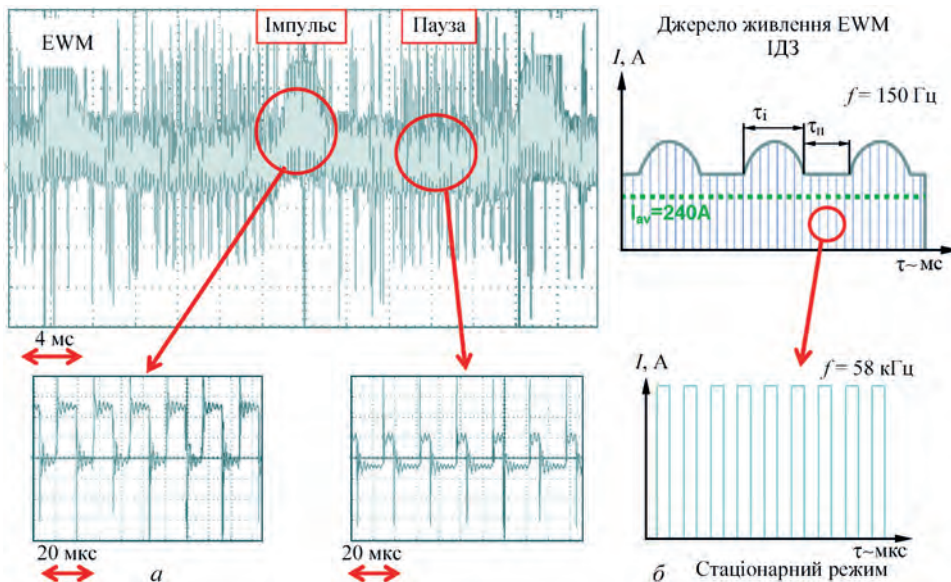


Рис. 1. Осцилограма зварювального струму для імпульсного режиму: а – осцилограма у реальному часі; б – схематичне зображення

ків Шарпі з гострим надрізом (ГОСТ 9454-78) при температурах випробування $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Опірність до утворення холодних тріщин визначали з використанням технологічних проб Теккен.

Отримані результати та їх обговорення. Імпульсно-дугове зварювання. При порівнянні стаціонарного і імпульсно-дугового режимів зварювання чітко видно, що при імпульсно-дуговому зварюванні валик шва більш однорідний і рівномірний без слідів розбризкування. Вимірювання втрат металу на розбризкування показали, що при імпульсно-дуговому зварюванні вони зменшуються на порядок, від 0,7 % при стаціонарному процесі до 0,07 % при імпульсно-дуговому зварюванні.

Аналіз поперечного перерізу наплавлень (рис. 2), виконаних на різних режимах, показав, що глибина проплавлення при імпульсно-дуговому зварюванні

збільшується в порівнянні зі стаціонарним процесом зварювання на таких же режимах. При цьому форма проплавлення шва при імпульсно-дуговому зварюванні значно відрізняється від процесу, який виконувався стаціонарно палаючою дугою.

Кількісний аналіз показав, що зі збільшенням струму зварювання ширина шва також збільшується. Характер зміни цієї величини однаковий як для зварювання стаціонарно палаючою дугою, так і для імпульсно-дугового зварювання. Аналогічна залежність спостерігається і для висоти шва. Що стосується глибини проплавлення, то в цілому із зростанням зварювального струму вона збільшується, але в разі імпульсно-дугового зварювання глибина проплавлення практично в два рази більше, ніж у випадку зварювання стаціонарно палаючою дугою (рис. 3). Також при імпульсно-дуговому

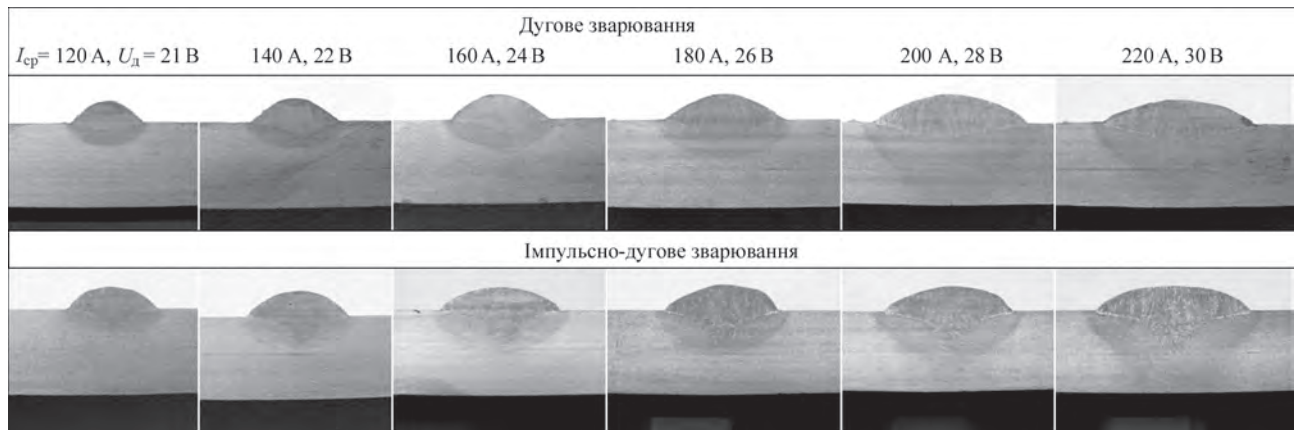


Рис. 2. Зовнішній вид макрощлифів

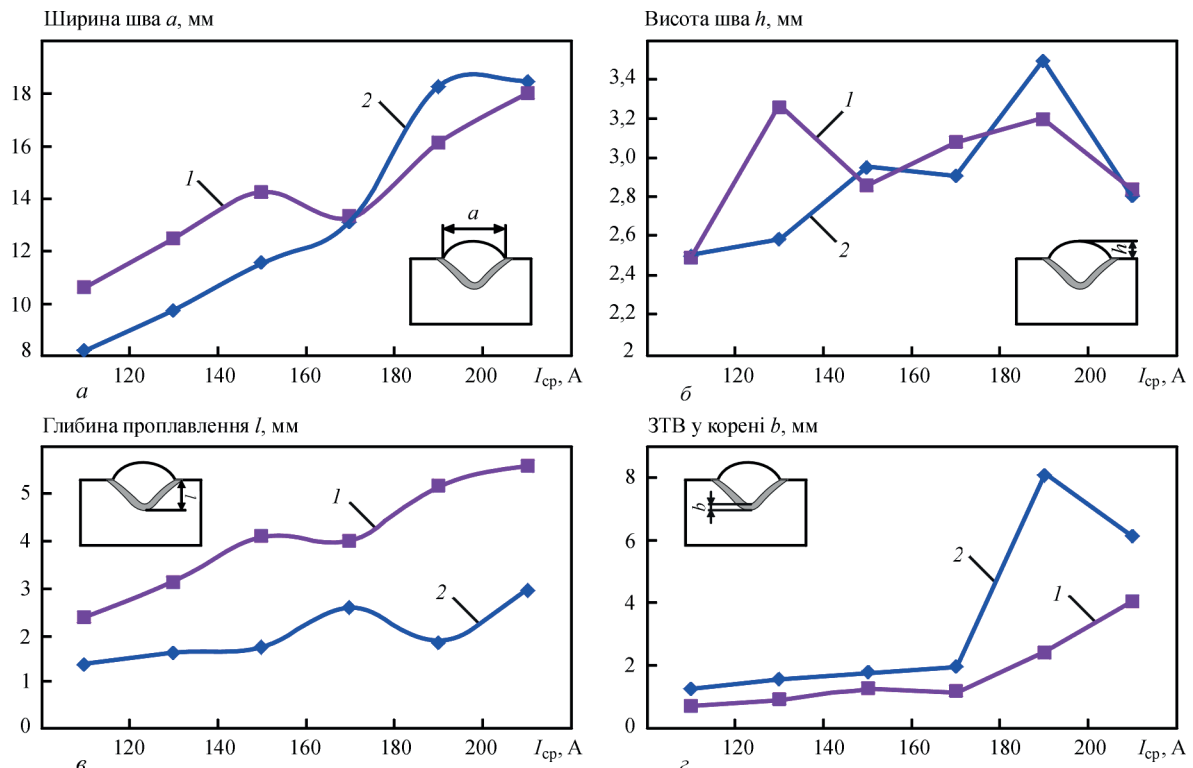


Рис. 3. Кількісні характеристики параметрів швів, виконаних імпульсно-дуговим та дуговим зварюванням: 1 – імпульсно-дугове; 2 – дугове

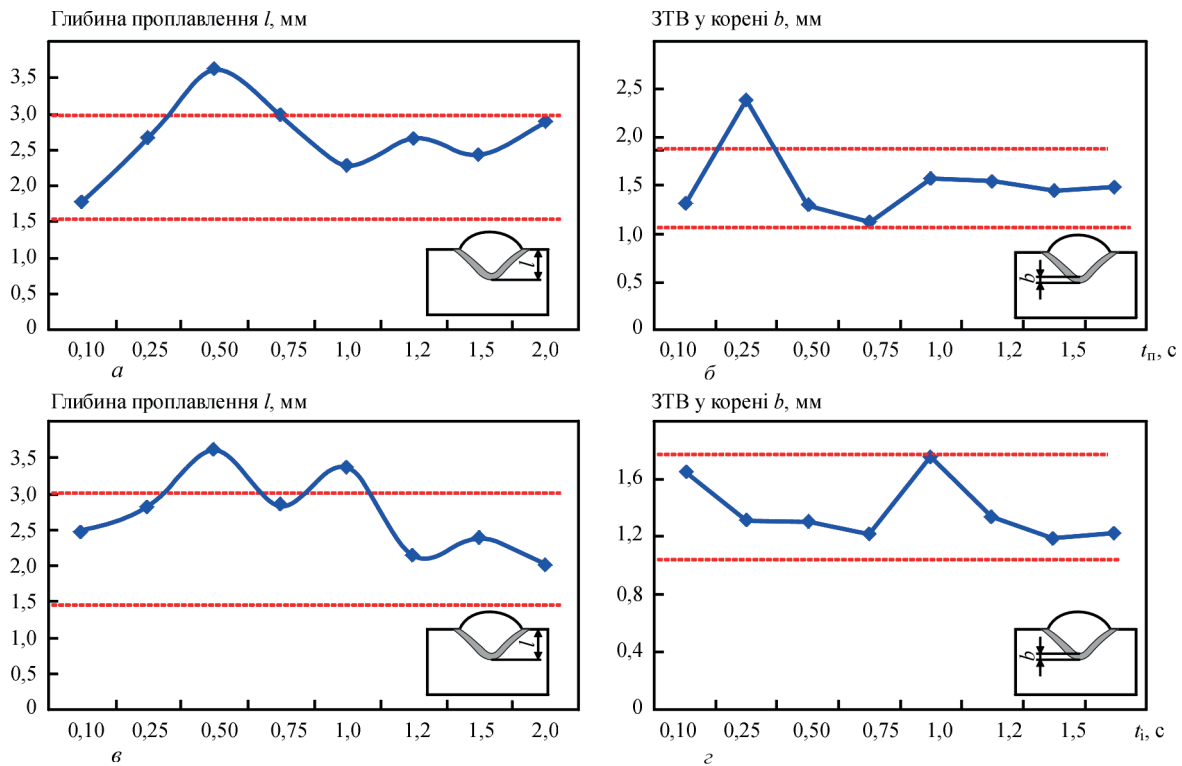


Рис. 4. Кількісні характеристики параметрів швів, виконаних зварюванням пульсуючою дугою: $a, б$ – час імпульсу фіксований $t_i = 0,5$ с; $в, з$ – час паузи фіксований $t_n = 0,5$ с

зварюванні площа поперечного перерізу шва перевершує дані показники для зварювання стаціонарно палаючої дугою. Величина ЗТВ під грибок порівняна для обох видів зварювання, а в корені шва ЗТВ при імпульсно-дуговому зварюванні – менше (рис. 3).

Пульсуюча дуга. За даними експерименту встановлено, що із зростанням струму паузи ширина шва збільшується, при цьому меншим значенням шпаруватості відповідає більші значення ширини шва (рис. 4). Висота шва рівномірно збільшується з ростом струму паузи. Зміна глибини проплавлення має подібні закономірності, тобто з ростом струму паузи збільшується. Зміна параметрів ЗТВ під грибок носить монотонний характер. Менша

шпаруватість відповідає великим значенням ширини ЗТВ. Важливо відзначити, що середні значення ЗТВ під грибок нижче, ніж при зварюванні стаціонарно палаючої дугою і імпульсно-дуговому зварюванні. Схожі закономірності спостерігаються і для ЗТВ як в корені шва (рис. 4, б), так і у поверхні шва.

При режимі зварювання зі струмом імпульсу $I_i = 140$ А і струмом паузи $I_n = 112$ А (фіксований час імпульсу 0,5 с) з ростом часу паузи, тобто зі зменшенням частоти f та скважності δ , збільшується висота шва, дещо зменшується ширина шва і зменшується ширина ЗТВ, а глибина проплавлення при $t_n = 0,5$ збільшується, а надалі практично не змінюється. У разі фіксації часу паузи (0,5 с)

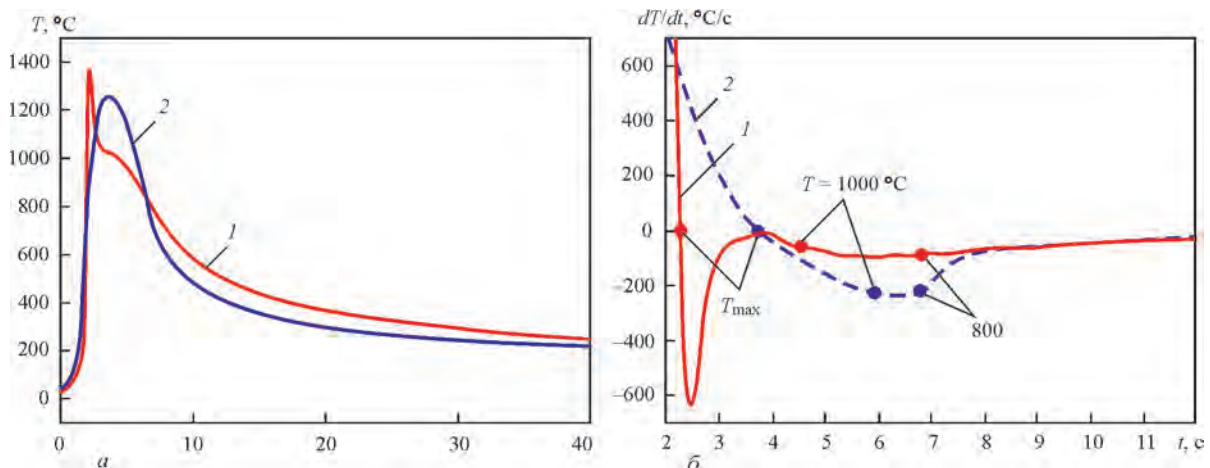


Рис. 5. Термічні цикли зварювання (а) та швидкість зміни температури (б) для імпульсно-дугового зварювання (1) та дугового зварювання (2)

і збільшення часу імпульсу, тобто зі збільшенням частоти f та скважності δ , глибина проплавлення також спочатку збільшується, а надалі стабілізу-

ється, але підтвердження цього факту потребує додаткових досліджень. Ширина ЗТВ змінюється нелінійно, та у випадку фіксованого часу імпуль-

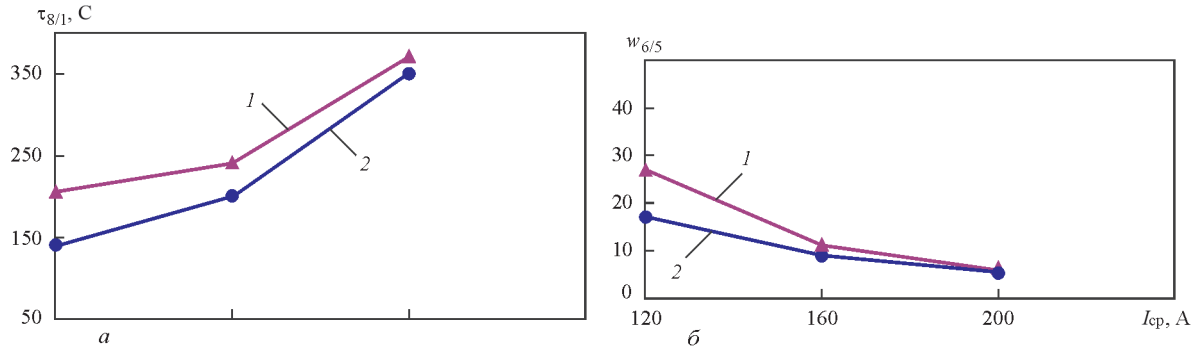


Рис. 6. Зміна часу (а) і швидкості (б) охолодження ділянки перегріву металу ЗТВ при імпульсно-дуговому зварюванні (2) і зварюванні стаціонарною дугою (1) зі швидкістю 15 м/год

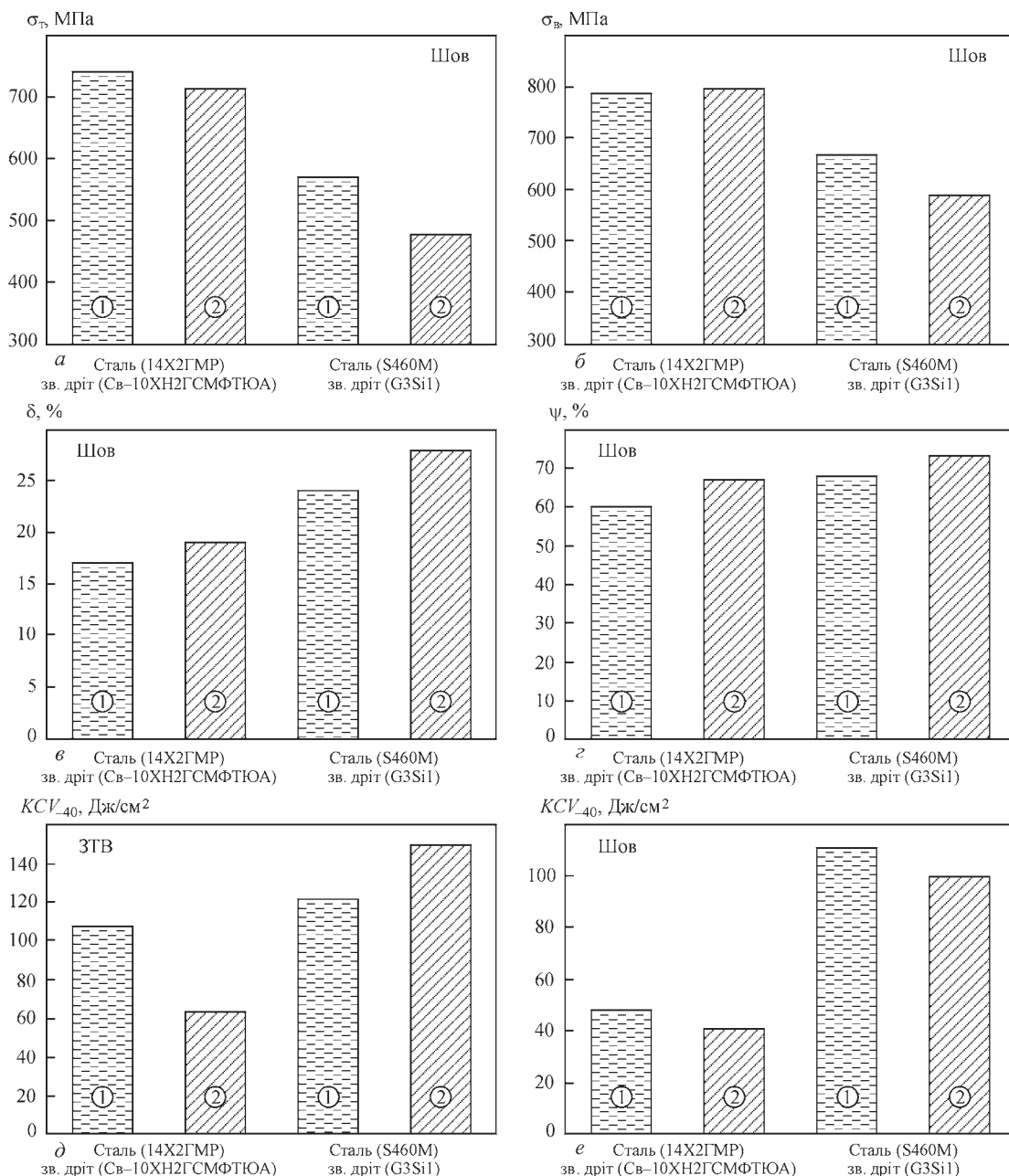


Рис. 7. Механічні властивості зварних з'єднань низьковуглецевих високоміцних сталей марки 14X2ГМР та S460М при імпульсно-дуговому зварюванні (1) та дуговому зварюванні (2)

су менша ніж у разі зварювання стаціонарно палаючою дугою. У випадку фіксації часу паузи та збільшення часу імпульсу ширина ЗТВ більша ніж для імпульсно-дугового зварювання та менша ніж для зварювання стаціонарно палаючою дугою.

Аналіз термічних циклів зварювання дозволив встановити такі особливості: при імпульсно-дуговому зварюванні швидкість зростання температури металу ділянки перегріву ЗТВ більше, ніж у разі зварювання стаціонарною дугою; у високотемпературній області від 1350 до 1000 °С охолодження металу при імпульсно-дуговому зварюванні відбувається швидше, а в області температур менше 1000 °С – повільніше (рис. 5). Більш детальний аналіз впливу режимів імпульсного зварювання на швидкість охолодження металу ЗТВ наведено на рис. 6. З наведених даних видно, що швидкість охолодження металу в інтервалі температур найменшій стійкості аустеніту 600...500 °С для імпульсно-дугового зварювання менше у 1,5 рази, ніж в разі зварювання стаціонарною дугою, а час охолодження металу в інтервалі температур 800...100 °С $\tau_{8/1}$ має близькі значення. Особливості протікання ТЦЗ при імпульсно-дуговому зварюванні, виявлені з графіку похідної (рис. 5), дозволили підтвердити, що швидкість охолодження металу на ділянках ЗТВ, які нагріваються до температур вище 1000 °С більша, ніж при зварюванні дугою, що горить стаціонарно. В ЗТВ, де метал нагрівається до температур нижче ніж 1000 °С, швидкість охолодження металу менша, ніж при зварюванні дугою, що горить стаціонарно. Це сприяє протіканню дифузійних процесів під час структурних перетворень і, як наслідок, формуванню змішаної бейнітно-мартенситної структури.

Зміна умов охолодження, що спостерігаються при переході від зварювання стаціонарно палаючою дугою до імпульсно-дугового зварювання дозволяють припустити, що при даному процесі зварювання в металі ЗТВ високоміцних сталей з $\sigma_{0,2} > 600$ МПа буде формуватися більш сприятлива структура з високою стійкістю до утворення холодних тріщин і до крихкого руйнування. Роботи з цього напрямку будуть результатом наших подальших досліджень.

Механічні властивості зварних з'єднань наведено на рис. 7. Дослідження впливу імпульсно-дугового зварювання на механічні властивості зварних з'єднань низьковуглецевих високоміцних сталей марок S460M та 14X2ГМР показали, що імпульсно-дугове зварювання дозволяє отримати більші значення статичної міцності металу шву зі збереженням високого рівня пластичності. При цьому значення ударної в'язкості KCV_{-40} при температурі випробувань -40 °С як для металу шву

так і для металу ЗТВ перевищують показники, отримані при зварюванні стаціонарно палаючою дугою. Таким чином, за умов імпульсно-дугового зварювання досягаються кращі значення експлуатаційних характеристик, а значення енергії удару перевищують вимоги EN 10025-2 $KCV_{-20} \geq 27$ Дж.

Результати випробувань зварних з'єднань, які виконувалися з використанням технологічних проб Теккен, свідчать про достатньо високий опір утворенню холодних тріщин сталі S460M як при імпульсно-дуговому зварюванні, так і при дуговому зварюванні без підігріву. Щодо більш міцних сталей, таких як 14X2ГМР, то підвищити опір уповільненому руйнуванню зварних з'єднань як при імпульсно-дуговому зварюванні, так і при зварюванні стаціонарною дугою, можливо за рахунок попереднього підігріву до температур 90...100 °С.

Висновки

Комплексними дослідженнями впливу режимів імпульсно-дугового зварювання, з використанням джерела живлення ewm Phoenix Pulse 501, на формування шва, термічні цикли зварювання та механічні властивості зварних з'єднань низьколегованих сталей встановлено:

- імпульсно-дугове зварювання у зазначених діапазонах частот та скважності дозволяє зменшити величину розбризкування металу, ширину зони термічного впливу, збільшити глибину проплавлення (практично в 2 рази) в порівнянні зі зварюванням дугою, що горить стаціонарно. Швидкість охолодження металу ЗТВ в інтервалі температур 600...500 °С при цьому зменшується практично в 1,5 рази;

- використання зварювання пульсуючою дугою дозволяє розширити можливості керування формуванням шва та збільшити ширину шва і зменшити ширину ЗТВ в порівнянні зі зварюванням стаціонарно палаючою дугою;

- показано, що метал швів та ЗТВ зварних з'єднань сталей S460M та 14X2ГМР, виконаних імпульсно-дуговим зварюванням, мають достатній опір до утворення холодних тріщин та більші показники статичної міцності зі збереженням високого рівня пластичності металу швів.

Список літератури/References

1. Poznyakov, A.A., Zhdovtsev, A.V., Gajvoronsky, A.A., Denisenko A.M. (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.
2. Palani, P.K., Murugan, N. (2006) Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding. *J. of Materials Processing Technology*, 172, 1–10.
3. Tong, H., Ueyama, T. et al. (2001) Quality and productivity improvement in aluminium alloy thin sheet welding using alternating current pulsed metal inert gas welding system. *Sci. Technol. Weld. Join.*, 6, 4, 203–208.

4. Needham, J.C., Carter, A.W. (1965) Material transfer characteristics with pulsed current. *Brit. Welding J.*, **5**, 229–241.
5. Rajasekaran, S. (1999) Weld bead characteristics in pulsed GMA welding of Al–Mg alloys. *Welding J.*, **78**, 12, 397–407.
6. Zavdoveev, A., Rogante, M., Poznyakov, V. et al. (2020) Development of the PC-GMAW welding technology for TMCP steel in accordance with welding thermal cycle, welding technique, structure and properties of welded joints. *Reports in Mechanical Engineering*, **1**, **1**, 26–33.
7. Zavdoveev, A., Poznyakov, V., Kim, H.S. et al. (2020) PCGMAW effect on the welding thermal cycle and weld metal geometry for high strength steels. *International J. of Engineering and Safety Sciences*, **1**, 5–16.
8. Murray, P.E. (2002) Selecting parameters for GMAW using dimensional analysis. *Welding J.*, **81**, **7**, 125–131.
9. Amin, M., Ahmed N. (1987) Synergic control in MIG welding 2-power current controllers for steady dc open arc operation. *Metal Construction*, June, 331–340.
10. Amin, M. (1983) Pulse current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding. *Ibid*, May, 272–377.
11. Lambert, J.A. (1989) Assessment of the pulsed GMA technique for tube attachment welding. *Welding J.*, **68**, **2**, 35–43.
12. Essers, W.G. Van Gompal (1984) Arc control with pulsed GMA welding. *Ibid*, **64**, **6**, 26–32.
13. Amin, M. (1981) Synergetic pulse MIG welding. *Metal Construction*, **6**, 349–353.
14. Dorn, L., Devakumaran, K., Hofmann, F. (2009) Pulsed current gas metal arc welding under different shielding and pulse parameters. Part 2. Behaviour of metal transfer. *ISIJ International*, **49**, **2**, 261–269.
15. Патон Б.Е., Потапьевский А.Г., Подола Н.В. (1964) Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным регулированием процесса. *Автоматическая сварка*, **1**, 2–6.
16. Paton, B.E., Potapievsky, A.G., Podola, N.V. (1964) Consumable electrode pulsed-arc welding with programmed adjustment of process. *Avtomatich. Svarka*, **1**, 2–6 [in Russian].
17. Томоюки Уеяма (2013) Trends in developments in gas shielded-arc welding equipment in Japan. *Ibid.*, **10**, 51–58.
18. Лашченко Г.И. (2006) *Способы дуговой сварки стали плавящимся электродом*. Киев, ЕкоТехнологія.
19. Lashchenko, G.I. (2006) *Methods of consumable electrode arc welding of steel*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
20. Zhuo, Y., Yang, C., Fan, C. et al. (2020) Grain refinement of wire arc additive manufactured titanium alloy by the combined method of boron addition and low frequency pulse arc. *Materials Sci. and Eng: A*, 140557. doi:10.1016/j.msea.2020.140557
21. Saraev, Y.N., Solodskiy, S.A., Ulyanova, O.V. (2016) Improving Processes of Mechanized Pulsed Arc Welding of Low-Frequency Range Variation of Mode Parameters, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **127**, 12019. https://doi.org/10.1088/1757-899x/127/1/012019.
22. Chen, C., Fan, C., Cai, X. et al. (2019) Arc characteristics and weld appearance in pulsed ultrasonic assisted GTAW process. *Results Phys.*, **15**, 102692. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102692.

INFLUENCE OF PULSED-ARC WELDING CONDITIONS ON CHANGE OF PARAMETERS OF WELD AND HAZ OF WELDED JOINTS AND MECHANICAL PROPERTIES OF LOW-ALLOY STEELS

A.V. Zavdoveev¹, V.D. Poznyakov¹, S.L. Zhdanov¹, M. Rogante², T. Baudin³

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

²Rogante Engineering Office, 62012 Civitanova Marche, Italy. E-mail: main@roganteengineering.it

³Université Paris-Saclay, CNRS, Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay, 91405 Orsay, France.
E-mail: thierry.baudin@u-psud.fr

Pulsed-arc welding is characterized by a periodical changing in arc power and, due to its features, allows solving complex technological problems while creating unique structures, increasing efficiency of welding processes while maintaining a high level of physical and mechanical properties of welded joints. There are many manufacturers of welding equipment, that introduced the idea of using pulsed welding in their production, but data on the impact of pulsed-arc welding on the parameters of the welds differ. For the successful application of pulsed-arc welding in modern production, it became necessary to study the influence of pulsed-arc welding conditions on the parameters of welds and HAZ as compared to stationary welding using burning arc, made of low-alloy welding materials. 20 Ref., 7 Fig.

Keywords: *pulsed-arc welding, pulsating arc welding, heat-affected-zone, low-alloy welding materials*

Надійшла до редакції 29.10.2020

Нова книга

Видавництво «Springer» (Швейцарія) у 2020 р. випустило нову книгу «Феросплави: теорія та практика» (англ. мовою, 530 с.) колективом авторів (Гасик М.І., Дашевській В.Я., Біжанов А.М.) під редакцією академіка НАН України, професора Михайла Івановича Гасика. У книзі систематизовано як базові аспекти теорії виробництва феросплавів (фізико-хімічні засади високотемпературних карбо-, сіліко- і алюмо-термічних процесів), так і практика технології феросплавів з кремнієм, марганцем, хромом, з молібденом, ванадієм, титаном, ніобієм, цирконієм, алюмінієм, лужноземельними і рідкоземельними металами, бором, нікелем, кобальтом, фосфором, селеном та телуrom (включаючи характеристики шихтових матеріалів і технологічні параметри процесів). Розглянуто технології виробництва електродів і пічного обладнання для феросплавної промисловості, а також питання переробки відходів і методи вирішення екологічних задач у сучасному виробництві феросплавів.

Книгу можна отримати у друкованому або електронному виді (PDF, EPUB). Книгу рекомендовано спеціалістам і науковцям працюючим у галузі міжнародного феросплавного виробництва і технологій.

