



**HAL**  
open science

# Influence of pulsed-arc welding conditions on change of parameters of weld and HAZ of welded joints and mechanical properties of low alloy steels

Anatoliy Zavdoveev, Valeriy Poznyakov, S. Zhdanov, Massimo Rogante,  
Thierry Baudin

## ► To cite this version:

Anatoliy Zavdoveev, Valeriy Poznyakov, S. Zhdanov, Massimo Rogante, Thierry Baudin. Influence of pulsed-arc welding conditions on change of parameters of weld and HAZ of welded joints and mechanical properties of low alloy steels. =The Paton Welding Journal, 2020, 10.37434/tpwj2020.12.03 . hal-03287056v1

**HAL Id: hal-03287056**

**<https://hal.science/hal-03287056v1>**

Submitted on 20 Nov 2020 (v1), last revised 26 Oct 2021 (v2)

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Вплив режимів імпульсно-дугового зварювання на зміну параметрів шву і ЗТВ зварних з'єднань та механічні властивості низьколегованих сталей.**

А.В. Завдовєєв (ORCID: 0000-0003-2811-0765), В.Д. Позняков (ORCID: 0000-0001-8581-3526), С.Л. Жданов (ORCID: 0000-0003-3570-895X), М. Rogante\* (ORCID: 0000-0002-6846-0826), Т. Baudin\*\* (ORCID: 0000-0002-6765-360X)

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, Україна

\*Rogante Engineering Office, 62012 Civitanova Marche, Italy,

main@roganteengineering.it

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

Імпульсно-дугове зварювання (ІДЗ) 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 ІДЗ на параметри швів носять розрізнений характер. Для успішного застосування ІДЗ у сучасному виробництві виникла необхідність в порівняльних дослідженнях впливу режимів імпульсно-дугового зварювання на параметри швів і ЗТВ в порівнянні зі зварюванням стаціонарно палаючою дугою, виконаних низьколегованими зварювальними матеріалами.

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

## **Вступ**

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. 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 [5-14]. Саме з цим пов'язано те, що такі відомі фірми, як Fronius (Австрія), Bohler (Германія), ESAB (Швеція) 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 імпульсно-дугового зварювання на термічні процеси, які відбуваються в металі ЗТВ зварних з'єднань, та як вони позначаються на структурі та механічних властивостях даного металу, на його опірності утворенню холодних тріщин і крихкому руйнуванню, тощо. 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 на формування шву, термічні цикли зварювання та механічні властивості зварних з'єднань низьколегованих сталей.

## **Методика експерименту**

Для вирішення поставленого в роботі завдання 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 з 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 ТЦС ділянки перегріву ЗТВ проводився з використанням хромель-алюмелевих термопар  $\varnothing 0.5$ мм, які встановлювали на ділянки ЗТВ, що нагрівалися до температури 1200 °С.

До ключових параметрів ІДЗ відносяться: струм імпульсу ( $I_i$ ), струм паузи ( $I_p$ ), час імпульсу ( $t_i$ ), час паузи ( $t_p$ ). Для спрощення характеристики імпульсного процесу, прийняті усталенні допоміжні параметри: середній ( $I_{cp}$ ) та ефективний струм зварювання ( $I_{ef}$ ), скважність ( $\delta$ ) та частота ( $f$ ). Для оцінки впливу режимів імпульсно-дугового зварювання на параметри шва було 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 = 15м/год, захисний газ - суміш  $Ar + 18\% CO_2$ . В якості джерела струму використовувався випрямляч інверторного типу марки ewm Phoenix Pulse 501, який забезпечує різну частоту проходження імпульсів. Параметри ІДЗ 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 ІДЗ. Для визначення зварювально-технологічних характеристик (рис.1) джерела струму було використано цифровий осцилограф UTD2000СЕХ-П, 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 500А.

За частотою проходження імпульсів відрізняють імпульсно-дугове зварювання ( $f \geq 25$  Гц) та зварювання пульсуючою дугою ( $f \leq 25$  Гц) [15]. З

використанням пульсуючої дуги підбирали оптимальні режими пульсації. В цьому випадку режим зварювання був наступним: зварювальний струм імпульсу -  $I_{та} = 140A$ , ток паузи (базовий струм) складав 80% від струму імпульсу  $I_{п} = 112A$ ; напруга на дузі в імпульсі  $U_i = 22B$ , напруга на дузі в паузі  $U_{п} = 18B$ , швидкість зварювання = 15м/год, при цьому варіювали час імпульсу -  $t_i$  та час паузи -  $t_{п}$ , а також силу струму в паузі.

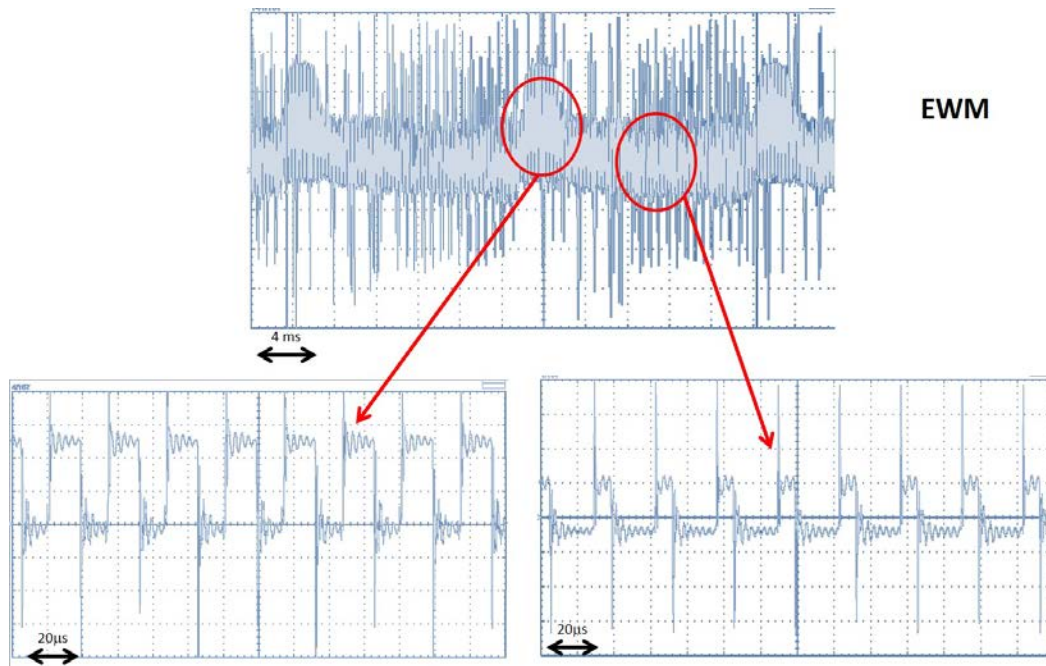


Рис.1 Осцилограма зварювального струму для імпульсного режиму.

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 ( $Ar+18\% CO_2$ ) з'єднань сталі S460M та 14X2ГМР товщиною 16мм з V-подібним розкриттям кромки дротом суцільного перерізу G3Si1 та Св-10ХН2ГСМФТЮА  $\varnothing 1,2mm$  відповідно. Кореневі проходи при зварюванні цих сталей виконували на мідній підкладці. Зварювання з використанням традиційного процесу (дугою, яка горить стаціонарно), виконували на режимі:  $I_{зв}=180-200A$ ,  $U_d=26B$ ,  $V_{зв}=15-18m/год$ . Режим автоматизованого імпульсно-дугового зварювання був наступним:  $I_{сп}=220-240A$ ,  $U_d=26-28B$ ,  $V_{зв}=14-21m/год$ .

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 кожну швидкість охолодження). Випробування виконували по ГОСТ 6996-66 при температурі плюс 20<sup>0</sup>С. Ударна в'язкість визначалася при випробуванні зразків Шарпі з гострим надрізом (ГОСТ 9454-78) при температурах випробування мінус 40 <sup>0</sup>С. 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.

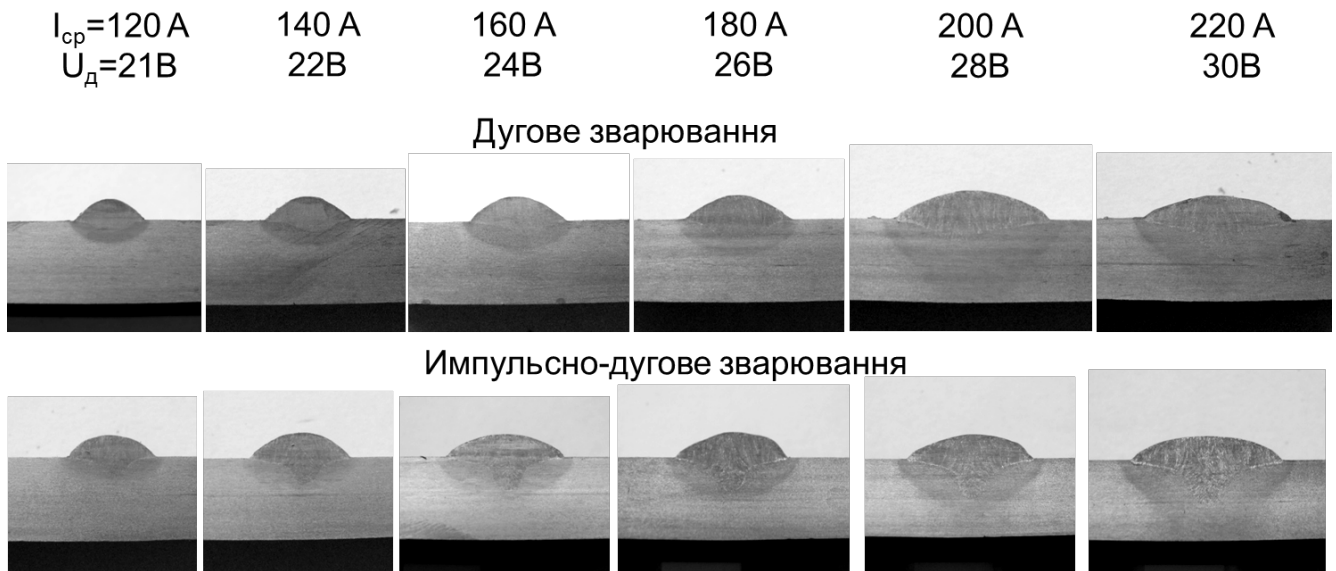


Рис. 2 Зовнішній вид макрошліфів.

Кількісний аналіз показав, що зі збільшенням струму зварювання ширина шва також збільшується. Характер зміни цієї величини однаковий, як для зварювання стаціонарно палаючої 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 палаючої дугою (рис.3). Також при імпульсно-дуговому 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-дугового зварювання - менше (рис.3).

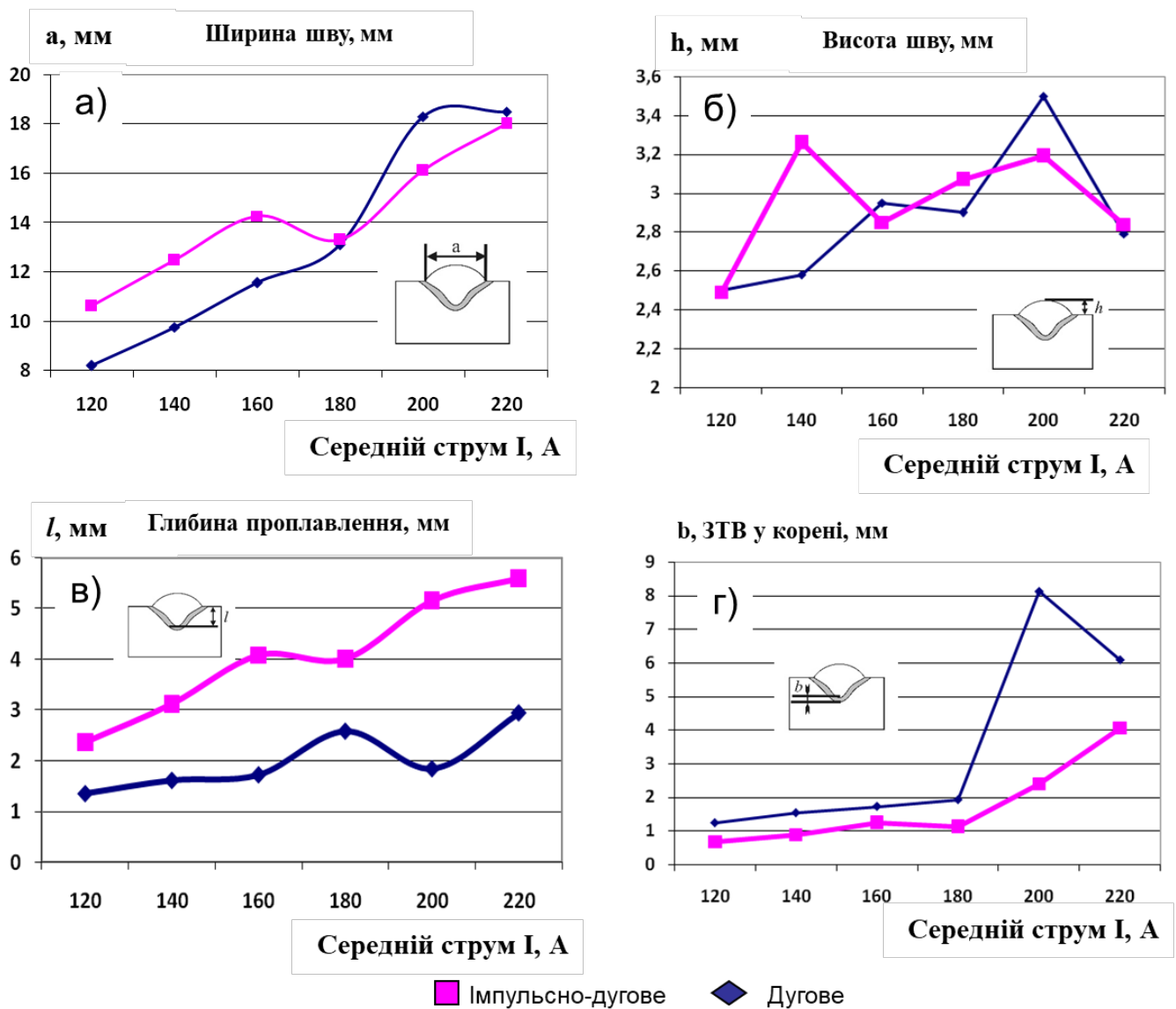


Рис. 3 Кількісні характеристики параметрів швів, виконаних імпульсно-дуговим та дуговим зварюванням.

**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. 4б), так і у поверхні шва.

При режимі зварювання зі струмом імпульсу  $I_i = 140\text{A}$  і струмом паузи  $I_p = 112\text{A}$  (фіксований час імпульсу =  $0.5\text{c}$ ) з ростом часу паузи збільшується висота шва, дещо зменшується ширина шва і зменшується ширина ЗТВ, а глибина проплавлення при  $t_p=0,5$  збільшується, а надалі практично не змінюється. У разі фіксації часу паузи ( $0.5\text{c}$ ) і збільшення часу імпульсу глибина проплавлення також спочатку збільшується, а надалі стабілізується, але підтвердження цього факту потребує додаткових досліджень. Ширина ЗТВ змінюється нелінійно, та у випадку фіксованого часу імпульсу 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.

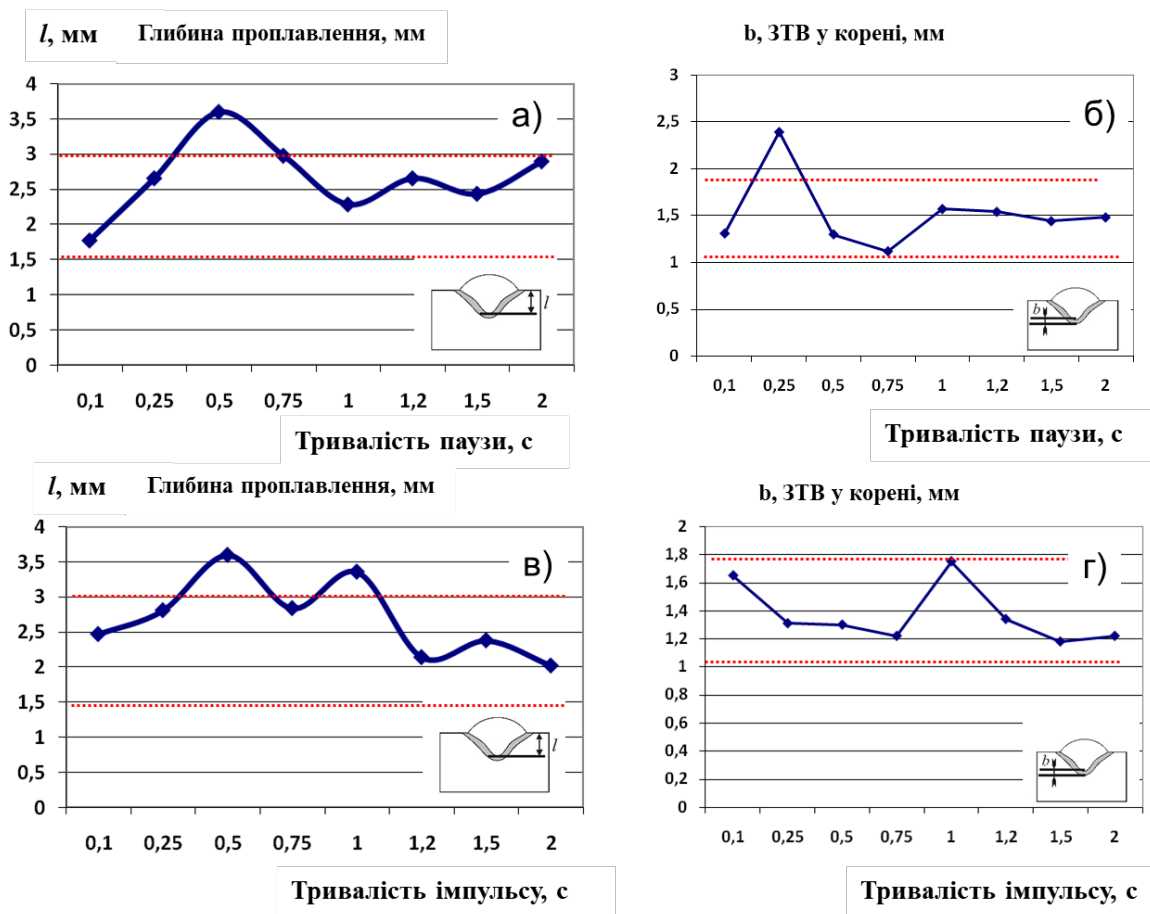


Рис. 4 Кількісні характеристики параметрів швів виконаних зварюванням пульсуючою дугою. а,б – час імпульсу фіксований  $t_{и}= 0.5$  с; в,г - час паузи фіксований  $t_{п}= 0.5$  с.

Аналіз термічних циклів зварювання дозволив встановити такі особливості: при ІДЗ швидкість зростання температури металу ділянки перегріву ЗТВ більше, ніж у разі зварювання стаціонарною дугою; в високотемпературній області від 1350 °С до 1000 °С охолодження металу при ІДЗ відбувається швидше, а в області температур менше 1000 °С - повільніше (рис.5 а, б). Більш детальний аналіз впливу режимів імпульсної 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 ІДЗ 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.

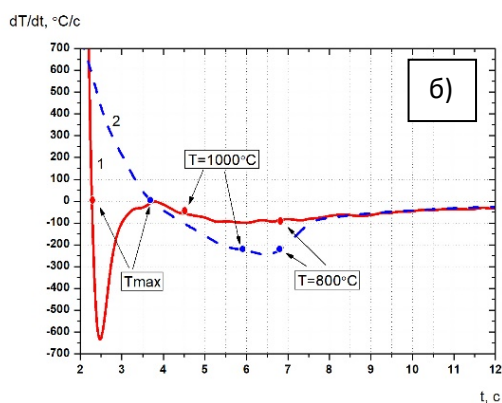
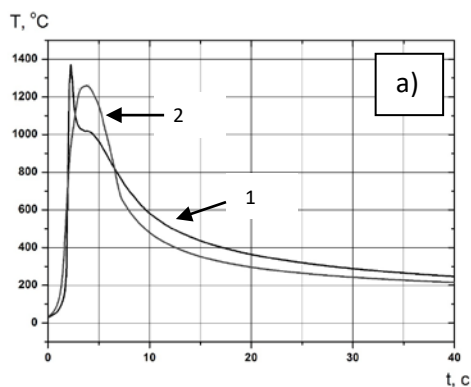


Рис.5. Термічні цикли зварювання (а) та швидкість зміни температури (б)  
для ІДЗ (1) та ДЗ (2).

Зміна умов охолодження, що спостерігаються при переході від зварювання стаціонарно палаючої 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.

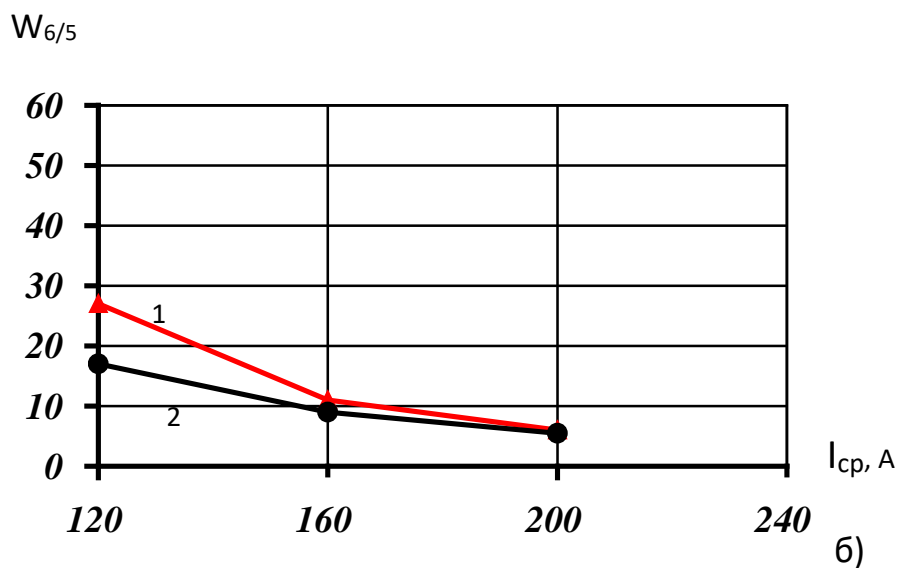
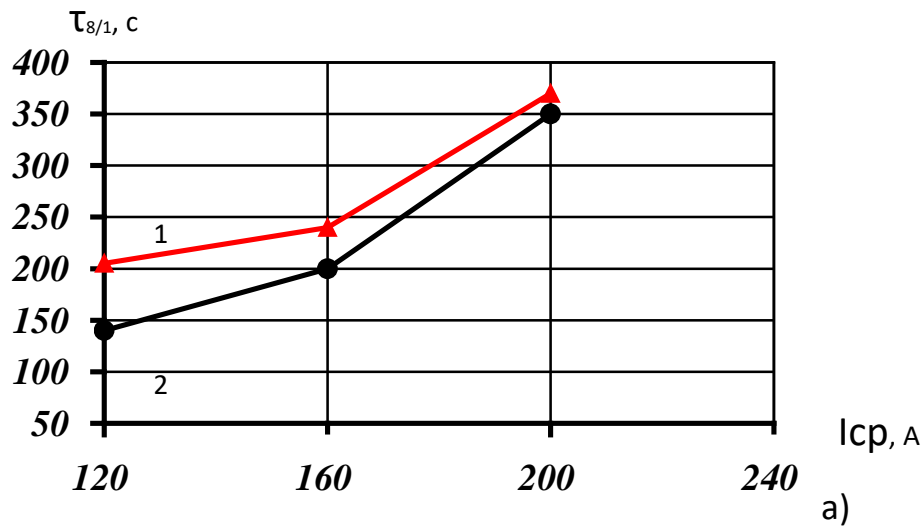


Рис.6. Зміна часу (а) і швидкості (б) охолодження ділянки перегріву металу ЗТВ при ІДЗ (2) і зварюванні стаціонарної дугою (1) зі швидкістю 15 м / год.

Механічні властивості зварних з'єднань наведені на рис. 7. Дослідження впливу імпульсно-дугового зварювання на механічні властивості зварних з'єднань низьковуглецевих високоміцних сталей марок S460M та 14X2ГМР показали, що ІДЗ дозволяє отримати більші значення статичної міцності металу шву зі збереженням високого рівня пластичності. При цьому значення ударної в'язкості  $KCV_{-40}$  при температурі випробувань  $-40^{\circ}\text{C}$ , 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  $KCV_{-20} \geq 27\text{Дж}$ .

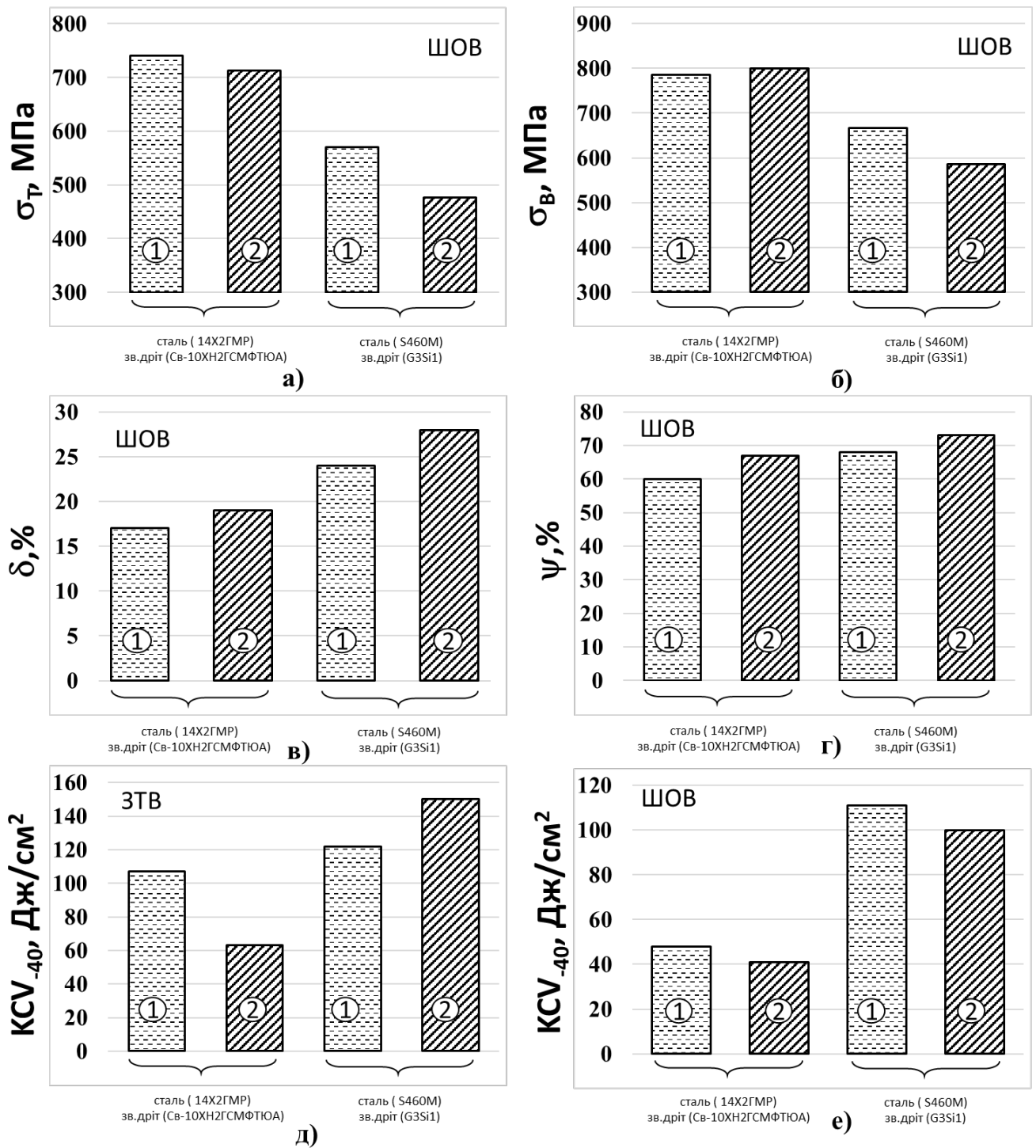


Рис. 7 Механічні властивості зварних з'єднань низьковуглецевих високоміцних сталей марки 14X2ГМР та S460M при ІДЗ (1) та ДЗ (2).

Результати випробувань зварних з'єднань які виконувалися з використанням технологічних проб Теккен свідчать про достатньо високий опір утворенню холодних тріщин сталі S460M як при ІДЗ, так і при ДЗ 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 підігріва до температур 90-100°C.

## **Висновки**

1. Імпульсно-дугове зварювання 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°C при цьому зменшується практично в 1,5 рази.
2. Використання зварювання пульсуючою дугою дозволяє збільшити ширину шва і зменшити ширину ЗТВ в порівнянні зі зварюванням стаціонарно палаючою дугою.
3. В результаті випробувань встановлено, 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.

## **Література**

1. V.D. Poznyakov, A.V. Zavdoveev, A.A. Gajvoronsky, A.M. Denisenko and A.A. 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 Journal*, # 9, 2018, p. 7-12
2. P.K. Palani, N. Murugan, Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding // *Journal of Materials Processing Technology* 172 (2006) 1–10

3. H. Tong, T. Ueyama, et al., 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) (2001) 203–208.
4. J.C. Needham, A.W. Carter, Material transfer characteristics with pulsed current, *Brit. Weld. J.* 5 (1965) 229–241.
5. S. Rajasekaran, Weld bead characteristics in pulsed GMA welding of Al–Mg alloys, *Weld. J.* 78 (12) (1999) 397-s–407-s.
6. P.E. Murray, Selecting parameters for GMAW using dimensional analysis, *Weld. J.* 81 (7) (2002) 125-s–131-s.
7. M. Amin, N. Ahmed, Synergic control in MIG welding 2—power current controllers for steady dc open arc operation, *Met. Construct.* June (1987) 331–340.
8. M. Amin, Pulse current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding, *Met. Construct.* May (1983) 272–377.
9. J.A. Lambert, Assessment of the pulsed GMA technique for tube attachment welding, *Weld. J.* 68 (2) (1989) 35–43.
10. W.G. Essers, Van Gompal, Arc control with pulsed GMA welding, *Weld. J.* 64 (6) (1984) 26-s–32-s.
11. Amin M. Synergetic pulse MIG welding // *Metal construction.* – 1981. - #6. –P. 349-353.
12. L. Dorn, K. Devakumaran, F. Hofmann Pulsed current gas metal arc welding under different shielding and pulse parameters; Part 2: Behaviour of metal transfer // *ISIJ international* 49.2 (2009): 261-269.
13. Патон Б.Е., Потапьевский А.Г., Подола Н.В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным регулированием процесса. // *Автоматическая сварка.* – 1964. –№1. – С. 2-6.
14. Tomoyuki Ueyama Trends in developments in gas shield ed arc welding equipment in Japan // *Автоматическая сварка.* – 2013. –№10. – С. 51-58.
15. Лашенко Г. И. Способы дуговой сварки стали плавящимся электродом. К.: «Екотехнологія», 2006. – 384 с.

