

# 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

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

Одним з перспективних шляхів розв'язання питання підвищення строку експлуатації зварних конструкцій є розробка методів зварювання, заснованих на використанні імпульсного керування енергетичними параметрами процесу. Імпульсний режим зварювання дозволяє здійснювати регульоване тепловкладення в зону зварного з'єднання, керувати режимом плавлення електродного металу, формуванням структури металу шва і зони термічного впливу (ЗТВ). Встановлено, що зі збільшенням частоти імпульсно-дугового зварювання вдається знизити ширину ЗТВ та ділянки крупного зерна. Таким чином, у разі зварювання низьколегованих сталей за рахунок застосування технології з імпульсним процесом є перспектива зменшити ширину ділянки перегріву, що важливо для випадків ремонту стоншень стінок труб під час заплавлення дефектів на діючому трубопроводі механізованим способом. Бібліогр. 16, табл. 2, рис. 11.

*Ключові слова:* магістральні трубопроводи, імпульсно-дугове зварювання, технологічні параметри, зварне з'єднання, геометричні параметри, структура.

**Вступ.** У наш час через технічний стан нафтогазопромислового устаткування і магістральних трубопроводів вони стають об'єктами підвищеної небезпеки. Дана обставина обумовлює необхідність застосування ефективних методів ремонту. За допомогою традиційних методів зварювання важко розв'язати всі технологічні завдання, що ускладнюються: забезпечення можливості регулювання в широких межах глибини проплавлення, зварювання по підвищених зазорах і в різних просторових положеннях, з'єднання різнорідних по складу металів і сплавів, зменшення розбрикування електродного металу, підвищення стабільності загоряння дуги і її горіння [1].

Основною проблемою при зварюванні неповоротних стиків магістральних трубопроводів є забезпечення необхідної якості кореневих, заповнюючих і облицювальних шарів і високого рівня механічних характеристик у стику, що зварюється. Відомо, що до 90 % дефектів, які виявляються при контролі якості зварних з'єднань, пов'язані з дефектами в корневих шарах зварних швів: підризами, непроварами, неметалічними включеннями, порами [2]. Основною причиною появи зазначених дефектів, крім пов'язаних з поганою підготовкою стику під зварювання, є порушення режимів зварювання (швидкості зварювання, напруги дуги, струму), а також їх невідповідність необхідним значенням, що забезпечують одержання якісних зварних з'єднань. Традиційно застосовувані процеси ручного зварювання можуть забезпечити необхідну якість зварних з'єднань тільки при ретельній підго-

товці стику, що зварюється, і використанні високоякісних матеріалів.

Накопичений досвід показує, що імпульсні методи керування процесом зварювання дозволяють розв'язати наступні технологічні проблеми:

- керований і спрямований перенос електродного металу [3–5];

- можливість виконання зварювання у всіх просторових положеннях і спрощення техніки зварювання [6, 7];

- поліпшення якості зварних з'єднань завдяки більшій концентрації енергії джерела нагрівання і кращим умовам первинної кристалізації [5, 8, 9];

- зменшення втрат на вигар і розбрикування [4, 10].

Аналіз літератури показав, що при імпульсному живленні структура шва дрібнозерниста і розорієнтована, а механічні властивості зварних з'єднань вище, ніж при зварюванні з короткими замиканнями дугового проміжку [11–13]. Накладення імпульсів дозволяє суттєво підвищити інтенсивність і стійкість дугового розряду, змінюються гідродинамічні процеси у зварювальній ванні та умови її кристалізації. Імпульсне підвищення тиску дуги поліпшує формування шва, валик шва стає дрібнолускатим, спостерігається подрібнення мікроструктури, пов'язане з ударним впливом крапель електродного металу [14–16].

Метою проведених досліджень було визначення впливу режимів зварювання та частоти  $f$  процесу ім-

пульсно-дугового зварювання на геометричні розміри наплавлень і структурні перетворення у зоні термічного впливу.

**Методика експерименту.** Для реалізації поставленого завдання використовували джерело живлення ЛЕТ-500. Використовуючи додаткове програмне забезпечення, можна досить гнучко регулювати більшість параметрів джерела, включаючи форму вихідної вольт-амперної характеристики. Імпульсний режим роботи джерела дозволяє працювати на двох таких ВАХ із зазначенням часу роботи кожної (рис. 1, а). Спадні ділянки ВАХ (1 та 2) відповідають струму паузи та імпульсу. Під час перемикавання між характеристиками величина струму зварювання змінюється на відповідне значення для поточної характеристики (рис. 1, б, в).

Для першої частини експериментів були обрані сімейства вольт-амперних характеристик ВАХ № 1 і ВАХ № 2 (рис. 2, а) Головна відмінність між сімействами була в поступовому збільшенні струму паузи, зміщуючи ліворуч падаючу ділянку 1 (крива 1) (ВАХ № 1). При цьому положення кривої 2 (ВАХ № 2) залишилося незмінним.

В роботі використовували імпульсно-дуговий процес з частотою  $f = 100$  Гц та шпаруватістю  $C = 2$ . Погонну енергію  $Q$  для кожного експерименту (табл. 1) розраховували за формулою

$$Q = \frac{60I_{\text{ср.}}U_{\text{ср.}}}{v_{\text{зв.}}} \eta,$$

де  $v_{\text{зв}}$  – швидкість зварювання (м/год),  $\eta = 0,7$ ;  $I_{\text{ср.}}$  – середній струм зварювання, який розрахо-

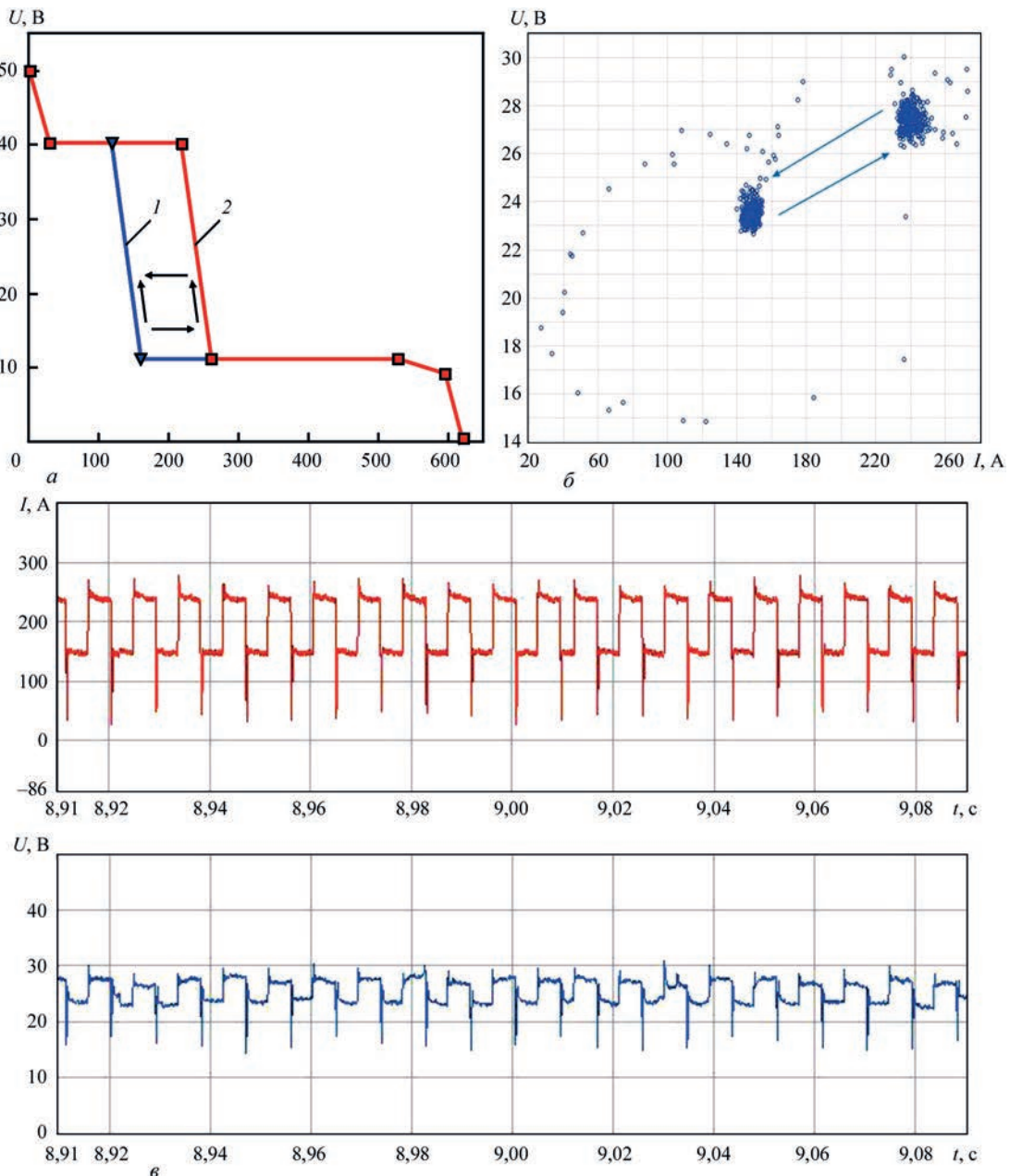


Рис. 1. Комбінація ВАХ джерела живлення для реалізації імпульсного процесу зварювання (а): 1, 2 – відповідно струм паузи та імпульсу; динамічна ВАХ (б) та осцилограма процесу (в, г)

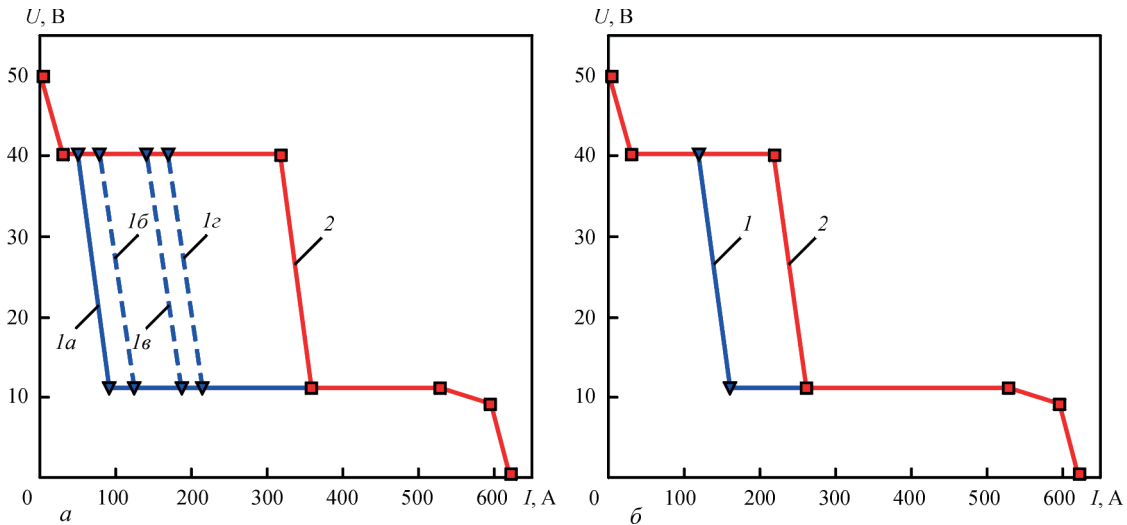


Рис. 2. Сімейство ВАХ для виконання ІДЗ з метою визначення залежності геометричних розмірів  $b, h$  від:  $a$  – режимів зварювання  $I_{\text{ср.}}, U_{\text{ср.}}$ ;  $b$  – частоти  $f$  процесу (опис 1, 2 див. у тексті)

вугється за відомою для імпульсно-дугових процесів формулою, а саме,  $I_{\text{ср.}} = (I_{\text{імпульсу}} t_{\text{імпульсу}} + I_{\text{паузи}} t_{\text{паузи}}) / (t_{\text{імпульсу}} + t_{\text{паузи}})$ .

З метою визначення як частота  $f$  імпульсно-дугового процесу, який протікає з короткими замиканнями, впливає на геометричні характеристики  $h$  та  $b$ , були проведені експериментальні дослідження. Для цього в імпульсне джерело живлення були введені ВАХ № 1 та ВАХ № 2 (рис. 2, б), швидкість зварювання становила  $v_{\text{зв.}} = 30$  см/хв, подача зварювального дроту  $v_{\text{др.}} = 6,4$  м/хв. Після налаштування виконувалися наплавлення на пластину на частоті  $f = 5, 10, 25, 37, 50, 75, 100$  Гц. Для уникнення теплового впливу від попереднього наплавлення, кожне наступне наплавлення виконувалося після охолодження пластини до  $20$  °С. Вказані параметри забезпечували наступний режим зварювання  $I_{\text{ср.}} = 202 \dots 205$  А,  $U_{\text{ср.}} = 21,5$  В. Це, у відповідності до формули, дозволяло отримувати погонну енергію на рівні  $Q = 6,0 \dots 6,2$  кДж/см.

Для виявлення впливу частота  $f$  ІДЗ на ширину та мікроструктуру ЗТВ зварних з'єднань експериментальна частина роботи передбачала проведення наплавлень на пластину зі сталі 09Г2С з імпульсами частотою 3, 5, 10, 25, 37 та 50 Гц. З метою порівняння отриманих результатів, додатково виконано наплавлення із використанням звичайного процесу механізованого дугового зварювання в суміші  $\text{Ar} + \text{CO}_2$ . Для експериментів були обрані вольт-амперні характеристики, зображені

Таблиця 1. Отримані режими імпульсно-дугового процесу при різних положеннях ВАХ № 1

ВАХ № 1	$I_{\text{ср.}}, \text{А}$	$U_{\text{ср.}}, \text{В}$	$Q, \text{кДж/см}$	$v_{\text{зв.}}, \text{см/хв}$	$v_{\text{др.}}, \text{м/хв}$
1а	187	22	5,760	30,0	6,8
1б	200	23	6,440		
1в	225	25,4	8,036		
1г	225	25,4	8,036		
1з	230	29,2	9,402		

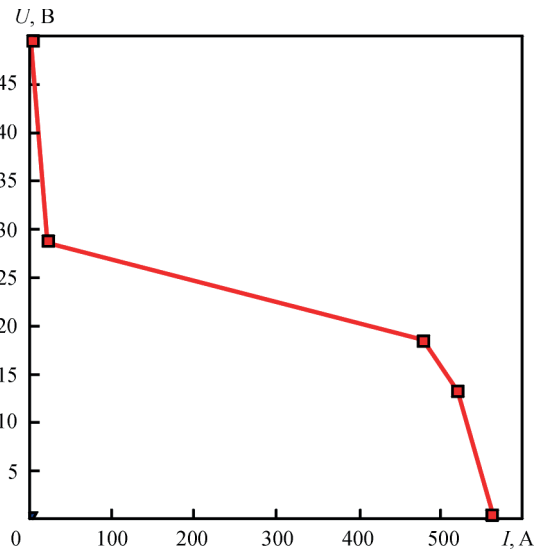


Рис. 3. Вольт-амперна характеристика джерела живлення для виконання механізованого зварювання стаціонарним процесом

на рис. 2, б, що забезпечували імпульсно-дуговий та звичайний (рис. 3) процес зварювання.

Режими механізованого зварювання ( $I_{\text{ср.}}, U_{\text{ср.}}$ ) дротом Св08Г2С діаметром 1,2 мм в суміші  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  для обох процесів визначалися за допомогою комп'ютеризованої інформаційно-виміральної системи IMS 2007 (табл. 2). Погонну енергію  $Q$  для кожного експерименту визначали за формулою.

Таблиця 2. Режими механізованого зварювання

$f, \text{Гц}$	$I_{\text{ср.}}, \text{А}$	$U_{\text{ср.}}, \text{В}$	$Q, \text{кДж/см}$	$v_{\text{др.}}, \text{м/хв}$	$v_{\text{зв.}}, \text{см/хв}$	Примітка
3	203	21,8	6,195	6,4	30,0	ІДЗ
5	203	21,6	6,139			
10	198	22,2	6,153			
25	207	21,1	6,115			
37	198	22,3	6,181			
50	205	21,0	6,027	6,4	30,0	Стационар.
–	200	22,1	6,188			

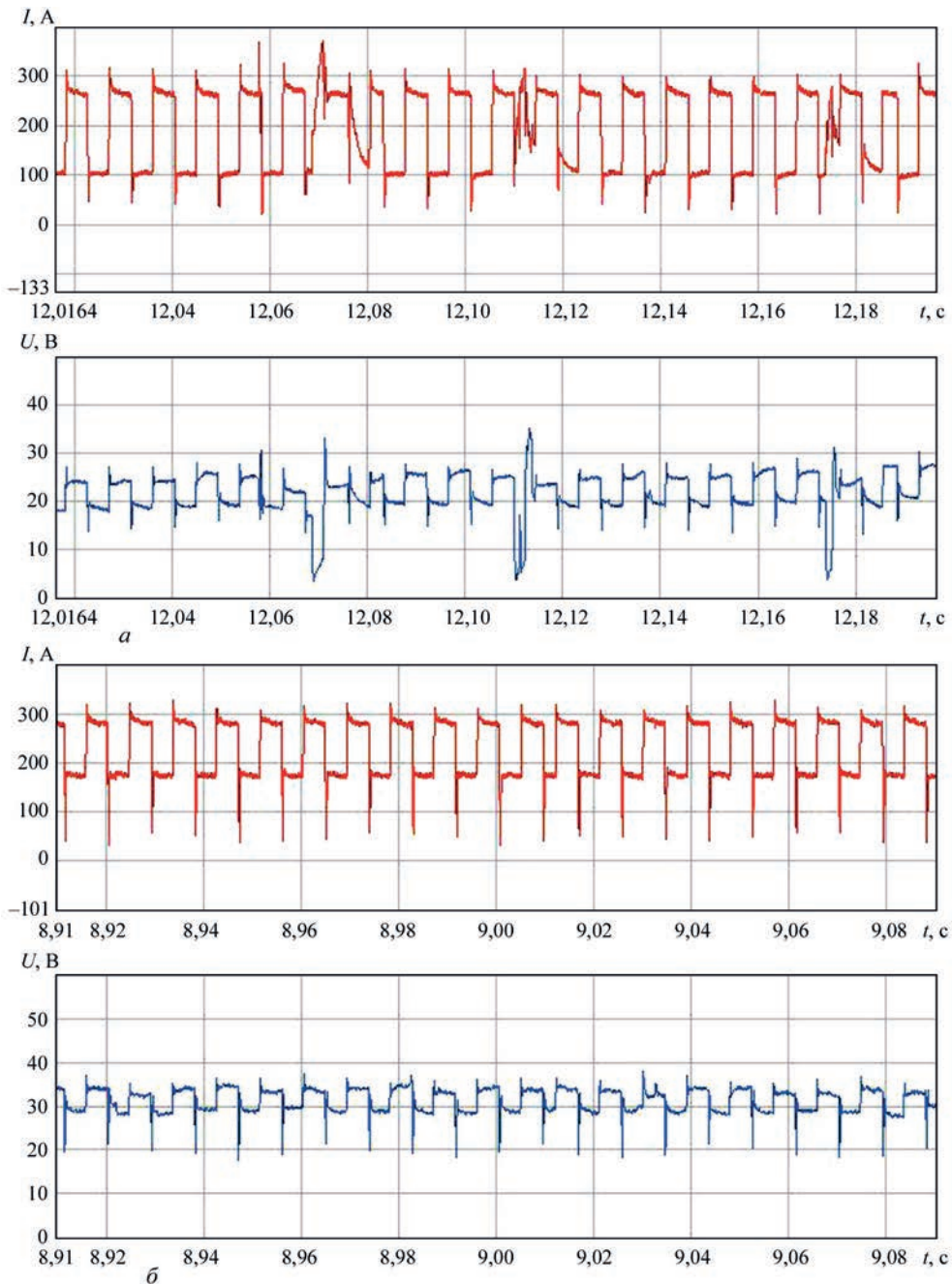


Рис. 4. Осцилограми процесів імпульсно-дугового процесу: *a* – з короткими замиканнями (для  $I_{\text{ср.}} = 187$  А); *б* – без коротких замикань (для  $I_{\text{ср.}} = 225$  А)

Після виконання наплавлень на пластину товщиною 12 мм були виготовлені шліфи для металографічних досліджень металу шва та ЗТВ. Твердість ділянок ЗТВ та шва вимірювали на мікротвердомірі М-400 «Лесо».

В результаті обробки даних осцилограм було встановлено, що поступове збільшення величини струму паузи спричинює зростання середнього струму зварювання, що підвищує потужність процесу. Враховуючи, що швидкість подачі зварювального дроту залишається незмінною, відбувається більше розплавлення металу на торці електрода та подовження дугового проміжку. Ми можемо спостерігати збільшення середньої

напруги зварювання. Також спостерігається змінення імпульсно-дугового процесу з короткими замиканнями на процес без короткого замикання (рис. 4).

На гістограмах напруги дуги це відображається наявністю миттєвих значень в діапазоні  $U_{\text{к.з.}} = 3 \dots 10$  В (рис. 5, *a*), що характерно для коротких замикань, та у порівнянні із ІДЗ на «довгій» дузі їх відсутністю (рис. 5, *б*).

**Результати досліджень та обговорення.** Регулювання ВАХ № 1 з позиції 1а до позиції 1г призводить до збільшення величини погонної енергії  $Q = f(I_{\text{ср.}}, U_{\text{ср.}})$  із відповідними змінами геометричних розмірів та форми наплавлених валиків

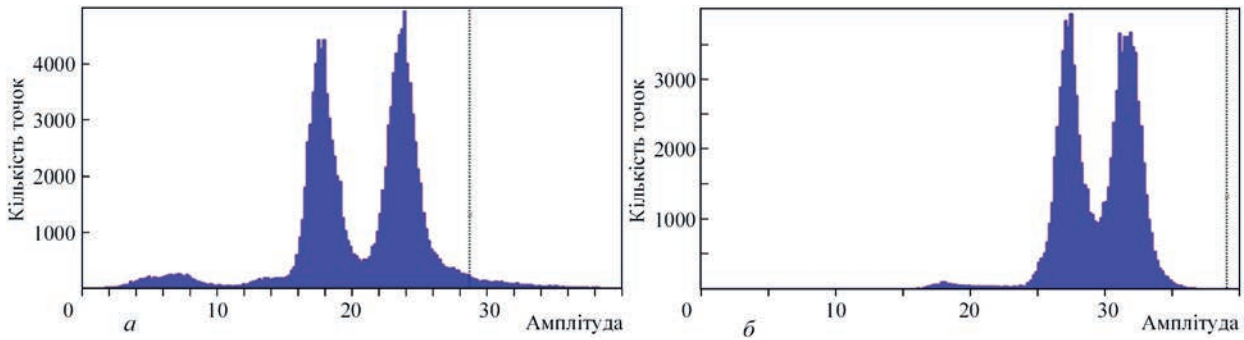


Рис. 5. Гістограми миттєвих значень напруги дуги при імпульсно-дуговому процесі: *a* – з короткими замиканнями (для  $I_{\text{ср.}} = 187\text{A}$ ); *б* – без коротких замикань (для  $I_{\text{ср.}} = 225\text{A}$ )

при  $v_{\text{др.}} = \text{const}$ ,  $v_{\text{зв.}} = \text{const}$ . Встановлено, що збільшення струму паузи призводить до підвищення  $U_{\text{ср.}}$ , і це в кінцевому випадку відбивається у підвищенні ширини валиків  $b$  із відповідним зменшенням глибини проплавлення  $h$  (рис. 6).

Вплив погонної енергії  $Q = f(I_{\text{ср.}}, U_{\text{ср.}})$  імпульсно-го процесу на середню величину глибини проплавлення  $h$  та ширини  $b$  валиків наведений на рис. 7.

Аналіз результатів замірів ширини наплавлень та глибини проплавлення показав, що збільшення величини частоти  $f$  з 5 до 100 Гц не призводить до зміни геометричних розмірів. Найбільш суттєво вплив частоти  $f$  відбивається на лускатості валиків: із збільшенням  $f$  до 100 Гц лускатість зменшується (рис. 8). Це пов'язано з тим, що швидкоплинне переключення роботи імпульсного джерела живлення з ВАХ № 2, яка відповідає за максимальний енергетичний рівень процесу, на ВАХ № 1, котра визначає мінімальний енергетичний рівень, не призводить до суттєвого охолодження розплавленого металу. Тепловий режим ванни наближається до квазістаціонарного стану, який характерний для звичайного зварювання з короткими замкненнями без імпульсного впливу.

Дослідження впливу частоти  $f$  ІДЗ на ширину та мікроструктуру ЗТВ зварних з'єднань показали, що структура наплавленого металу шва фе-

ритно-перлітна з окремими ділянками доєвтектоїдного фериту по границям кристалітів. Що стосується ЗТВ, то аналіз у випадках як ІДЗ, так і при стаціонарній дузі, показав, що на ділянці великого зерна формуються практично однакові види структурних складових. Тобто в цілому структура цієї ділянки в усіх зразках феритно-перлітна з різними модифікаціями фериту: упорядкованою другою фазою, відманштеттовою, поліендрічною (рис. 9). В зразках, що були отримані при виконанні ІДЗ з частотами  $f = 37, 50$  Гц та стаціонарним режимом зварювання, додатково були виявлені структури бейніту.

Розмір зерен на ділянці перегріву ЗТВ збільшується з підвищенням частоти  $f$ . Так, для  $f = 3, 5$  Гц бал зерна складає 7-8 ( $D_{\text{зеп}} = 22...30$  мкм); при  $f = 10$  Гц – 7 ( $D_{\text{зеп}} = 30$  мкм);  $f = 25, 37$  Гц – 6, 7 ( $D_{\text{зеп}} = 30...44$  мкм). Для  $f = 50$  Гц та стаціонарного процесу зварювання бал зерна складає 6 ( $D_{\text{зеп}} = 44$  мкм).

Вимірювання мікротвердості  $HV1$  в різних зонах показало, що поступове збільшення частоти  $f$  не призводить до суттєвих змін в значеннях середньої величини мікротвердості на ділянці великого зерна (рис. 10).

Середнє значення мікротвердості для  $f = 50$  Гц наближається до такого, що отримано при зварюванні стаціонарною дугою. При аналізі цих ре-

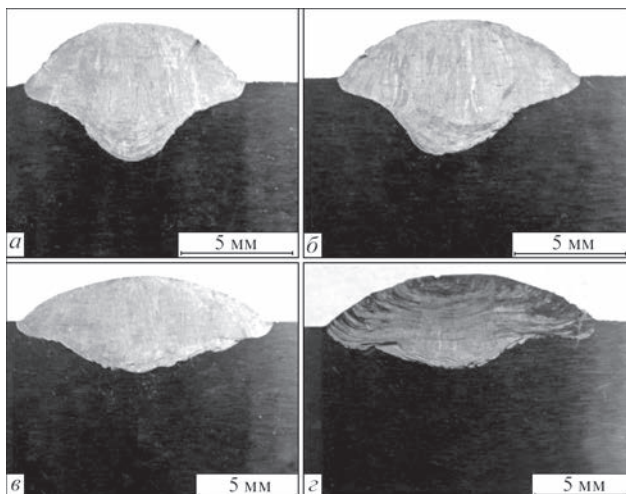


Рис. 6. Макрошліфи наплавлень, виконаних при різних ВАХ № 1: *a* – положення 1а; *б* – 1б; *в* – 1в; *г* – 1г

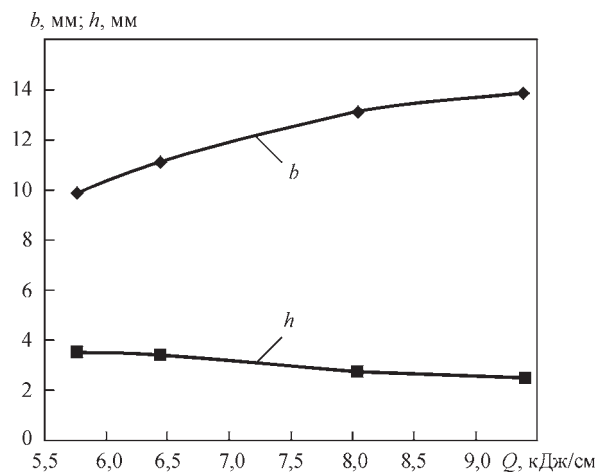


Рис. 7. Залежність глибини проплавлення  $h$  та ширини  $b$  від погонної енергії  $Q = f(I_{\text{ср.}}, U_{\text{ср.}})$  імпульсного процесу

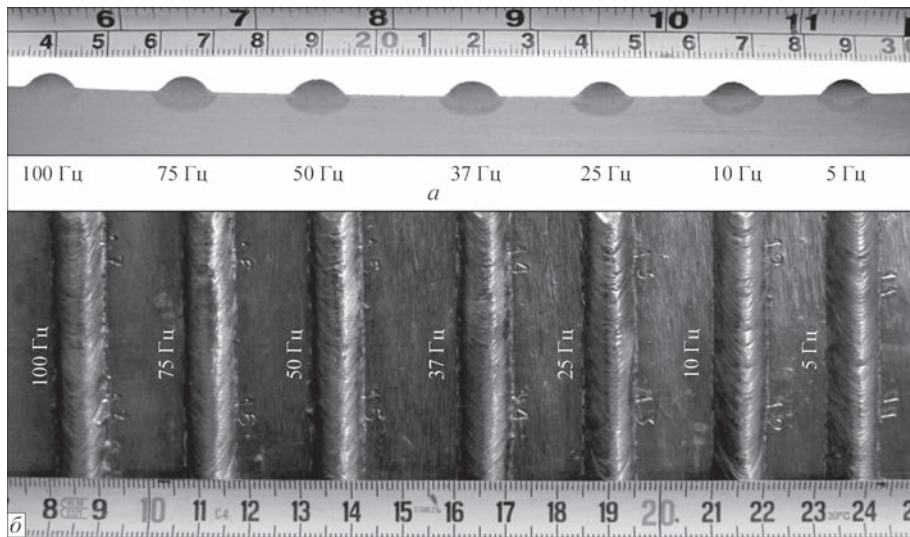


Рис. 8. Вплив частоти  $f$  імпульсного процесу на переріз валиків (а); лускатість наплавленого металу (б)

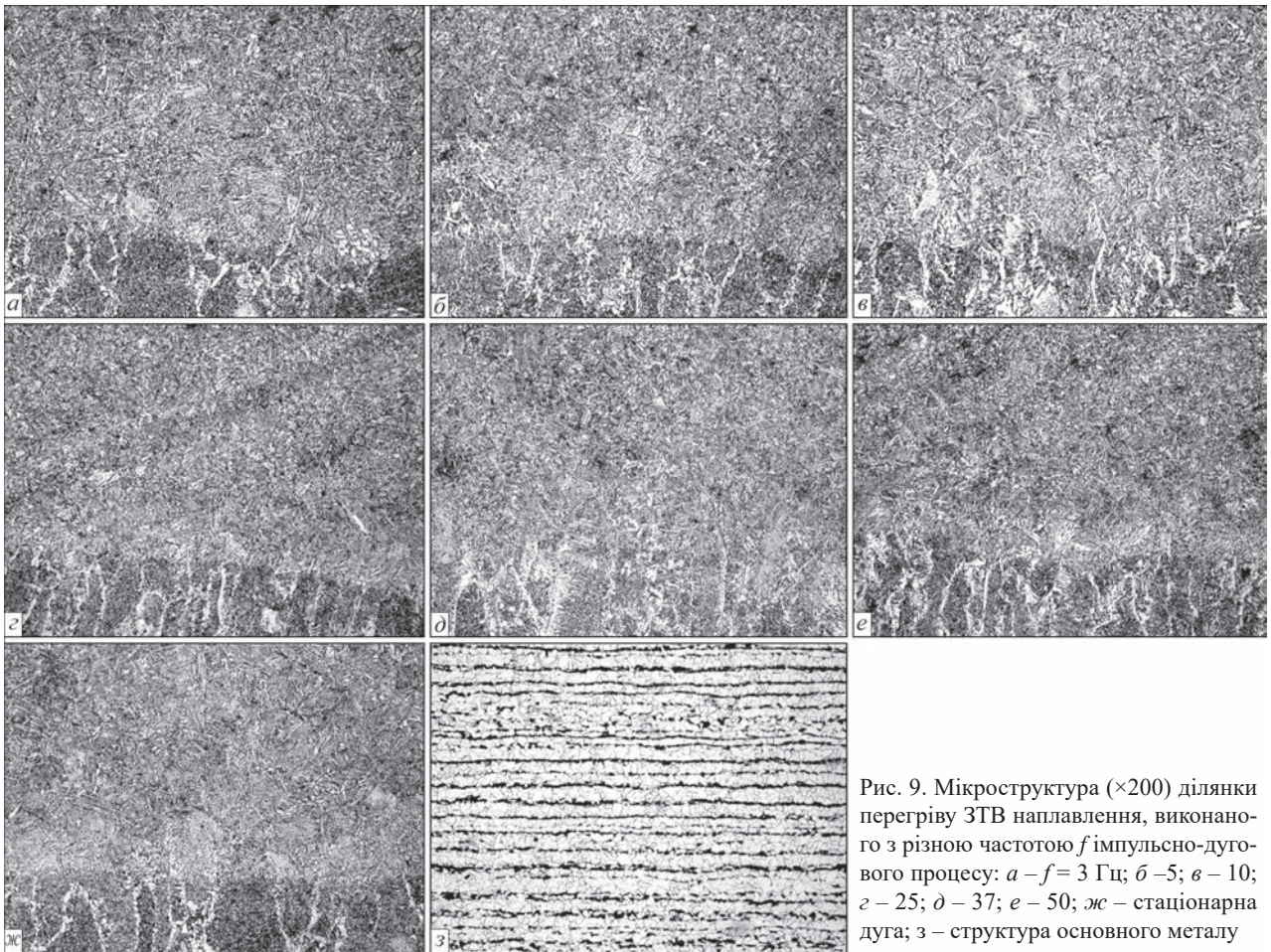


Рис. 9. Мікроструктура ( $\times 200$ ) ділянки перегріву ЗТВ наплавлення, виконаного з різною частотою  $f$  імпульсно-дугового процесу: а –  $f = 3$  Гц; б – 5; в – 10; г – 25; д – 37; е – 50; ж – стаціонарна дуга; з – структура основного металу

зультатів створюється враження, що зі збільшенням частоти  $f$  ІДЗ за ефектом впливу на метал ЗТВ наближається до процесу зварювання стаціонарною дугою.

Відносно ще одного показника – ширини ЗТВ – результати металографічних досліджень показали поступове, незначне зменшення загальної ширини ЗТВ з підвищенням частоти  $f$  до 50 Гц (рис. 11).

Подібна тенденція спостерігається і для ділянки великого зерна в ЗТВ. Проте у порівнян-

ні із стаціонарним процесом зварювання ширина цієї ділянки зменшується більш суттєво – на 25...30 %. Таким чином, у разі зварювання низьколегованих сталей за рахунок застосування технології з імпульсним процесом є перспектива впливати на ширину ділянки перегріву ЗТВ при різних значеннях частот і відносно малих значеннях погонної енергії  $Q$  (6,0...6,2 кДж/см). З практичної точки зору це дозволяє зменшити в ЗТВ частку несприятливої, малопластичної ділянки

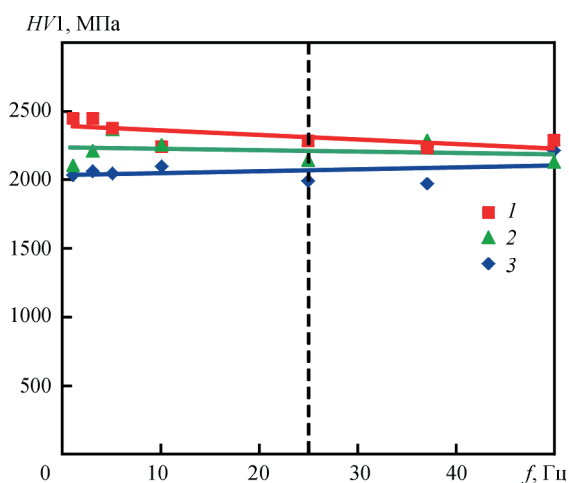


Рис. 10. Вплив частоти ІДЗ  $f$  на розподіл мікротвердості  $HV1$  на різних ділянках ЗТВ: 1 – ділянка великого зерна біля лінії сплавлення; 2 – ділянка крупного зерна біля ділянки перекристалізації; 3 – зварний шов біля лінії сплавлення

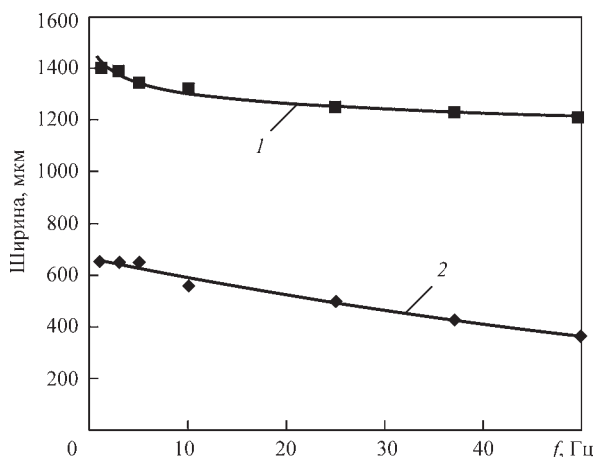


Рис. 11. Вплив частоти ІДЗ  $f$  на загальну ширину ЗТВ (1) та ширину ділянки великого зерна (2) при  $Q = 6,0...6,2$  кДж/см перегріву, що важливо для випадків ремонту стоншень стінок труб під час заплавлення дефектів на діючому трубопроводі механізованим способом.

**Висновки**

1. Встановлено, що поступове збільшення струму паузи за рахунок зміщення спадної ділянки ВАХ при незмінній швидкості подачі електродного дроту призводить до підвищення напруги дуги і, як наслідок, імпульсно-дуговий процес з короткими замиканнями змінюється на процес без коротких замикань. При цьому спостерігається підвищення ширини валиків на 30...40 % із відповідним зменшенням глибини проплавлення на 25...30 %.

2. Збільшення частоти з 5 до 100 Гц не впливає на геометричні параметри зварного шва, проте спостерігається зменшення лускатості.

3. Показано, що зміна частоти ІДЗ практично не впливає на структурні складові на ділянці великого зерна ЗТВ, які також співпадають зі зразком, звареним стаціонарними режимами зварювання. Також не

спостерігається суттєвих змін в значеннях середньої величини мікротвердості на ділянці великого зерна.

4. Встановлено, що підвищення частоти прямо пропорційно впливає на розмір зерен на ділянці перегріву ЗТВ. Так, зі збільшенням частоти ІДЗ з 3 до 50 Гц розмір зерен на ділянці перегріву ЗТВ збільшується з 8 ( $D_{зер} = 22$  мкм) до 6 ( $D_{зер} = 44$  мкм).

5. Встановлено, що підвищення частоти ІДЗ дозволяє знизити ширину ЗТВ та ділянки великого зерна. При цьому зменшення ширини ділянки великого зерна більш суттєве і досягає 25...30 % при частоті  $f = 50$  Гц.

**Список літератури**

1. Сараєв Ю.Н., Макарова Л.И., Кирилова Н.В. и др. (2001) Пути повышения эффективности строительства, эксплуатации и ремонта нефтегазопромыслового оборудования и магистральных трубопроводов на основе адаптивных импульсных технологий сварки и наплавки. *Сварочное производство*, 5, 31–37.
2. Мазель А.Г., Гарлинский В.Д., Шейкин М.З. и др. (1979) *Современные способы сварки магистральных трубопроводов плавлением*. Москва, Недра.
3. Saraev, Ju.N. (1999) Increase in efficiency of arc welding based on an adaptive algorithm for pulsed control of process energy parameters. *Welding Conference LUI Join'99 International Conference on Efficient Welding in Industrial Applications (ICEWIA)*, сс. 222–226.
4. Крампит Н.Ю., Крампит А.Г. (2014) Исследование процесса импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*, 5, 106–112.
5. Князьков А.Ф., Князьков С.А. (2011) Активное управление плавлением и переносом электродного металла. *Сварка и диагностика*, 4, 27–32.
6. Веревкин А.В. (2010) *Повышение эффективности сварки в CO<sub>2</sub> неповоротных стыков магистральных трубопроводов за счет применения импульсного питания сварочной дуги*: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Барнаул.
7. Крампит М.А., Буракова Е.М., Зубенко Л.Н. (2014) Тенденции развития импульсных способов управления процессом сварки. *Инновационные технологии и экономика в машиностроении. Сб. тр. V Международной научно-практической конференции. Т. 1. 22–23 мая 2014 г.*
8. Якушин Б.Ф., Бакуло А.В. (2017) О механизме формирования структуры металла шва при импульсно-дуговой сварке. *Сварочное производство*, 9, 29–35.
9. Manikya Kanti. K., Srinivasa Rao, P., Ranga Janardhana, G. (2013) Optimization of Weld Bead Penetration in Pulsed Gas Metal Arc Welding using Genetic Algorithm. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3, 3, 368–371.
10. Жерносеков А.М., Андреев В.В. (2007) Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом. *Автоматическая сварка*, 10, 48–52.
11. Golikov, N.I., Maksimova, E.M., Saraev, Yu.N. (2019) Investigation of the microstructure of the heat-affected zone of low-alloyed steel during pulsed arc aelding under conditions of low climatic ambient temperatures. *OP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 681.
12. Завдовсєв А.В., Позняков В.Д., Rogante M. та ін. (2020) Особливості формування структури і властивості з'єднань сталі S460M, виконаних імпульсно-дуговим зварюванням. *Автоматичне зварювання*, 6, 11–16. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.06.02>
13. Завдовсєв А.В., Позняков В.Д., Жданов С.Л. та ін. (2020) Вплив режимів імпульсно-дугового зварювання на зміну параметрів шву і ЗТВ зварних з'єднань та механічні властивості низьколегованих сталей. *Там само*, 12, 23–28. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.12.03>

14. Крампит А.Г., Крампит Н.Ю. (2015) Способы управления формированием сварного шва. *Технологии и материалы*, 2, 21–26.
15. Голиков Н.И., Сидоров М.М., Максимова Е.М., Сараев Ю.Н. (2018) Исследование микроструктуры сварных соединений, выполненных в условиях отрицательных температур. Наука – Образование – Производство: Опыт и перспективы развития. *Сб. материалов XIV Международной научно-технической конференции (8–9 февраля 2018 г.)*, сс. 161–164.
16. Saraev, Y.N., Bezborodov, V.P. (2013) Effect of the energy parameters of the welding process on the structure and properties of welded joints in low-alloy steels. *Welding International*, 27, 9, 678–680.
7. Krampit, M.A., Burakova, E.M., Zubenko, L.N. (2014) Tendencies of development of pulsed methods for welding process control. *In: Proc. of 5th Int. Sci.-Pract. Conf. on Innovative Technologies and Economics in Mechanical Engineering*, Vol. 1, 22–23 May 2014.
8. Yakushin, B.F., Bakulo, A.V. (2017) On mechanism of weld metal structure formation in pulsed arc welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, 9, 29–35 [in Russian].
9. Manikya Kanti, K., Srinivasa Rao, P., Ranga Janardhana, G. (2013) Optimization of Weld Bead Penetration in Pulsed Gas Metal Arc Welding using Genetic Algorithm. *Int. J. of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(3), 368–371.
10. Zhernosekov, A.M., Andreev, V.V. (2007) Consumable electrode pulsed arc welding. *The Paton Welding J.*, 10, 48–52.
11. Golikov, N.I., Maksimova, E.M., Saraev, Yu.N. (2019) Investigation of the microstructure of the heat-affected zone of low-alloyed steel during pulsed arc welding under conditions of low climatic ambient temperatures. *OP Conf. Series: Materials Sci. and Engineering*, 681.
12. Zavdoveev A.V., Poznyakov V.D., Rogante M., et al. (2020) Features of structure formation and properties of joints of S460M steel made by pulsed-arc welding. *The Paton Welding J.*, 6, 9–13. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.06.02>.
13. Zavdoveev, A.V., Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L. et al. 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 J.*, 10, 21–26. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.12.03>.
14. Krampit, A.G., Krampit, N.Yu. (2015) Methods of weld formation control. *Tekhnologii i Materialy*, 2, 21–26 [in Russian].
15. Golikov, N.I., Sidorov, M.M., Maksimova, E.M., Saraev, Yu.N. (2018) Examination of microstructure of welded joints made under negative temperature conditions. Science – Education – Production: Experience and Prospects of Development. *In: Proc. of 14th Int. Sci.-Tech. Conf. (8-9 February 2018)*, 161–164.
16. Saraev, Y.N., Bezborodov, V.P. (2013) Effect of the energy parameters of the welding process on the structure and properties of welded joints in low-alloy steels. *Welding Intern.*, 2(9), 678–680.

## References

1. Saraev, Yu.N., Makarova, L.I., Kirilova, N.V. et al. (2001) Ways of increase in efficiency of construction, operation and repair of oil and gas equipment and main pipelines on the base of adaptive pulsed technologies of welding and surfacing. *Svarochn. Proizvodstvo*, 5, 31–37 [in Russian].
2. A.G., Tarlinsky, V.D., Shejkin, M.Z. (1979) *Modern methods of fusion welding of main pipelines*. Moscow, Nedra [in Russian].
3. Saraev, Ju.N. (1999) Increase in efficiency of arc welding based on an adaptive algorithm for pulsed control of process energy parameters. *In: Proc. of Int. Conf. LUI Join'99 on Efficient Welding in Industrial Applications (ICEWIA)*, 222–226.
4. Krampit, N.Yu., Krampit, A.G. (2014) Investigation of the process of CO<sub>2</sub> consumable electrode pulsed arc welding. *Vestnik MG TU, Ser. Mashinostroenie*, 5, 106–112 [in Russian].
5. Knyazkov, A.F., Knyazkov, S.A. Active control of melting and transfer of electrode metal. *Svarka i Diagnostika*, 4, 27–32 [in Russian].
6. Verevkin, A.V. (2010) Increase in efficiency of CO<sub>2</sub> welding of main pipeline fixed joints through the application of pulse power supply of the welding arc: *Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree. Barnaul* [in Russian].

## EFFECT OF PARAMETERS OF PULSE-ARC WELDING ON THE FORMATION OF WELD METAL AND MICROSTRUCTURE OF HEAT-AFFECTED-ZONE OF 09G2S STEEL

S.Yu. Maksymov, D.M. Krazhanovsky, Yu.A. Shepelyuk, S.V. Osynska

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

One of the promising ways to solve the problem of increasing the life of welded structures is the development of welding methods based on the use of pulsed control of energy parameters of the process. The pulsed mode of welding allows performing a regulated heat input in the welded but zone, controlling the mode of melting the electrode metal, forming weld metal structure and the heat-affected-zone (HAZ). It was found that with an increase in the frequency of pulse-arc welding, it is possible to reduce the width of the HAZ and a region of a coarse grain. Thus, in the case of welding low-alloy steels, due to the use of technology with a pulse process, there is a prospect of reducing the width of the overheating region, which is important for the cases of repair of pipe walls thinning during remelting of defects in the operating pipeline using a mechanized method. 16 Ref., 2 Tabl., 11 Fig.

*Key words:* main pipelines, pulse-arc welding, technological parameters, welded joint, geometric parameters, structure.

Надійшла до редакції 26.01.2022

**Materials, methods and technologies**  
24th International Conference





19-22 August, 2022  
Burgas, Bulgaria

<http://bit.ly/2Aa6Jk3>

