

УДК 621.791.927.5

- Лебедев В. О. д-р техн. наук, професор ДП «ДКТБ ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України», м. Київ, e-mail: valpaton@ukr.net
- Жук Г. В. ДП «ДКТБ ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України», м. Київ, e-mail: uspt@ukr.net
- Бриков М. М. д-р техн. наук, професор, професор кафедри обладнання та технології зварювально-го виробництва Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, e-mail: brykov@zpu.edu.ua

## ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦІЙ З НІКЕЛЬ-ВМІСНИХ СТАЛЕЙ ПРИ МЕХАНІЗОВАНОМУ ЗВАРЮВАННІ-НАПЛАВЛЕННІ З МОДИФІКОВАНОЮ (ДОЗОВАНОЮ) ІМПУЛЬСНОЮ ПОДАЧЕЮ ЕЛЕКТРОДНОГО ДРОТУ

**Мета роботи.** Вивчити та проаналізувати в порівняльному порядку вплив чинників керованого імпульсного процесу подавання електродного дроту на деякі основні механічні характеристики швів та наплавлених валиків в процесах зварювання та наплавлення нікельвмісних сталей.

**Методи дослідження.** Вивчення механічних характеристик швів та наплавлених валиків велося з застосуванням сучасного лабораторного обладнання і відповідних методик. Це дало змогу визначити як параметри імпульсної подачі впливають на характеристики міцності шва та біля шовної зони по всій площині поперечного перерізу шва або наплавленого шару. Детальні характеристики імпульсів подачі визначалися за допомогою аналізатора зварювальних процесів з отриманням осцилограм силових параметрів горіння дуги з їх аналізом, в тому числі з визначенням стабільності протікання дугового процесу для різних типів формування імпульсів руху. Важливим для покращення результатів зварювання є керований характер переносу електродного металу синхронний з імпульсним рухом електрода. Відзначено, витрати енергії при на дуговий процес при імпульсній подачі електродного дроту з зазначенням його зменшення в порівнянні з традиційним зварюванням.

Експериментальні роботи виконувались з застосуванням спеціального електродного дроту, який використовується зазвичай для зварювання та наплавлення нікельвмісних сталей. Ці процеси здійснювались в захисному середовищі  $CO_2$  в автоматичному режимі.

**Отримані результати.** Зважаючи на те, що міцнісні характеристик шва є одними з найбільш важливими приділено увагу їх визначенню та аналізу. Характеристики міцності залежать від багатьох параметрів, зокрема теплових характеристик процесу, структури металу шва, наявності неметалічних включень і таке інше. Всі ці чинники вивчалися за допомогою відповідних приладів, та на основі численних порівняльних фото мікроструктур на шліфах поперечного перерізу. З аналізу шліфів виявлено типи отриманих мікроструктур, наявність включень та інше. Визначено, зокрема, що структура металу шва при зварюванні з імпульсним рухом електродного дроту суттєво відрізняється від структури від традиційного зварювання в бік зменшення включень, більш дрібного зерна та інше, що забезпечує підвищення механічних властивостей шва та біляшовної зони.

**Наукова новизна.** На основі циклу експериментальних досліджень запропоновано використання імпульсних алгоритмів руху електродного дроту з визначеними параметрами в автоматичному режимі для зварювання та наплавлення нікельвмісних сталей для забезпечення покращення механічних характеристик швів та наплавлених валиків.

**Практическая ценность.** Визначено, що спосіб зварювання з імпульсною подачею електродного дроту вкерованому варіанті, в тому числі нікельвмісних сталей є ефективним і може широко застосовуватись в промисловості з використанням спеціально розробленого обладнання, яке забезпечує відповідний процес з отриманням більш міцних характеристик.

**Ключові слова:** дугове зварювання, нікельвмісні сталі, електрод, що плавиться, імпульсне подавання дроту, параметри, експерименти, обробка результатів.

## Вступ

Сучасний техніко-технологічний рівень ефективного створення складних металоконструкцій для довгострокової та надійної експлуатації неможливий без застосування зварювальних технологій взагалі, використанні найбільш досконалих конструкційних та зварювальних матеріалів, засобів захисту дуги [1].

Вибір способу зварювання, комплексу зварювального обладнання та матеріалів становлять основу успішного проведення зварювально-наплавних робіт у різних сферах машинобудування, кораблебудування та ін. з урахуванням конкретної специфіки механізованої або автоматизованої реалізації електродугового процесу.

Електродугове зварювання та наплавлення супроводжується великими потоками теплової енергії, що розподіляється на плавлення електродного дроту, нагрівання металу та зовнішнє випромінювання, при цьому теплота, що вводиться в метал, виконує кілька дій: плавить метал, утворюючи рідку ванну та навколошовну зону, де метал знаходиться у твердій фазі із експонентним розподілом теплоти. Крім цього, дуже важливим є розуміння того, що структура металу зварювальної ванни та навколошовної зони різна та по-різному впливає на характеристики швів або наплавлених валиків.

## Постановка задачі

Характеристики металу зварних швів або наплавлених валиків і навколошовних зон визначають експлуатаційні властивості виробів: твердість, міцність, холодостійкість та ін. Дослідження [2] показують, що тип кристалічної решітки багато в чому визначає міцнісні властивості металу в умовах низьких температур. Обраний для роботи в умовах низьких температур метал при зварюванні повинен не погіршити експлуатаційні властивості конструкції. Одне зі складових збереження високих показників міцності, наприклад, ударної в'язкості є застосування сталей і електродного дроту з високим вмістом в них нікелю. Важливо відзначити, що при цьому структура металу навколошовної зони, крім іншого, значною мірою під дією теплоти та подальшого охолодження піддається зміні у вигляді переходу одного виду кристалічної решітки в іншу відповідно до мінімуму вільної енергії, що відповідає тому чи іншому розташуванню атомів. Такий перехід одного виду кристалічної решітки в іншу при нагріванні або охолодженні металу відноситься до алотропічних або поліморфних перетворень, які підпорядковуються законам кристалізації, а зростання зерен нової фази - кристалів з іншими атомними ґратами підпорядковується законам зародження та зростання зародків. Поліморфні перетворення як при нагріванні, так і при охолодженні мають велике значення і виявляються дуже важливим фактором впливу на кристалічну структуру, зернистість і властивості металу навколошовної зони. Крім зміни виду кристалів, якщо немає вторинної кристалізації, метал зварного шва

(зварювальної ванни, що закристалізувалася), як правило, має несприятливу будову у вигляді витягнутих стовпчастих кристалів, і завданням застосовуваної технології є забезпечити дрібнозернисту структуру, бажано з дрібних рівноосних зерен, що покращує структуру металу підвищенням експлуатаційних якостей зварного шва чи наплавленого валика [3].

З вищесказаного випливає, що пошук ефективних засобів і способів підвищення якості показників зварних швів і наплавлених валиків є актуальним і постійним і це обумовлюється як розвитком і вдосконаленням зварювальних матеріалів так і рівнем можливостей електромашинобудування та елементної бази силової та керуючої електроніки.

Механізоване електродугове зварювання-наплавлення суцільними і порошковими електродними дротами на теперішній час є найбільш широко поширеним, забезпечуючи високу продуктивність (швидкість при автоматичному зварюванні-наплавленні може досягати 200 м/год), можливість зварювання деталей з різними характеристиками формування швів високої якості за рахунок введення легувальних елементів та розкислювачів через дріт та вибору режимів процесу, можливість повної автоматизації; зварювання можливе в будь-яких положеннях, відносно мала зона термічного впливу та відносно хороше формування зварного шва та наплавленого валика та ін.

Маючи велику кількість переваг цей спосіб не позбавлений низки недоліків, серед яких можна виділити такі, які можуть проявлятися повністю або частково:

- велика глибина проплавлення основного металу (у деяких випадках частка основного металу в наплавленому валику становить до 60 %);

- низька стабільність процесу наплавлення і, як наслідок, великі втрати електродного металу на розбризкування – 5...15 %;

- вузький діапазон режимів зварювання-наплавлення з отриманням задовільного формування наплавленого валика;

- складнощі з підвищенням продуктивності процесу наплавлення, зумовлені збільшенням вигорання легуючих елементів.

У деяких випадках при механізованому зварюванні-наплавленні є особливі переваги застосування порошкових електродних дротів [4] зокрема в тому, що в процесі зварювання отримуються матеріали з таким хімічним складом, повторити який у звичайній промисловості практично неможливо. Наприклад, додавання в шихту дроту порошоків нікелю, хрому та молібдену сприяє створенню хімічного складу, одержати який у результаті звичайних промислових процесів неможливо [4]. Але при цьому застосування порошкових дротів має ряд недоліків, наприклад, порошковий дріт розплавляється таким чином, як було закладено в процесі його виробництва. Справа в тому, що конструкція дроту є визначальною для процесу роз-

плавлення її дугою. Внутрішня порожнина металевої оболонки заповнена неметалевими матеріалами приблизно від 50 до 70 відсотків. Це означає, що опір електричному струму такого сердечника буде в сотні разів більшим, ніж опір металевої оболонки. З цієї причини металева оболонка плавиться значно швидше. Розплавлення сердечника здійснюється частково за рахунок тепловипромінювання зварювальної дуги і частково за рахунок теплопередачі від нагрітого металу. Тому в процесі зварювання внутрішній матеріал дроту може торкатися ванни розплавленого металу.

Ще одним недоліком можна відзначити і те, що в процесі зварювання існує велика ймовірність того, що в зварному шві можуть утворитися пори, які є наслідком наявності порожнин і нерівномірності заповнення простору всередині металевої оболонки. Основні напрями вдосконалення обладнання та технологій зварювання повинні бути пов'язані зі зменшенням або навіть усуненням зазначених вище недоліків.

Більшість недоліків процесу пов'язана з недостатньою керованістю перенесенням електродного металу, який при традиційному відтворенні процесу дугового зварювання залежить від великої кількості факторів, у тому числі:

- похибки роботи систем механізованого устаткування;
- неточності встановлення режимів дугового процесу;
- якості електродних зварюваних та дугозахисних матеріалів.

### Огляд літератури

Для стабілізації дугового процесу, підвищення якості результатів його дії необхідно впорядкувати (стабілізувати) процес перенесення електродного металу. Досягти цього ефекту можна комплексом пасивних засобів, усуваючи вищезгадані недоліки або використовуючи різні активуючі засоби, наприклад, зазначені в роботі [5]. Однак, на нашу думку, більш дієвими є способи активного впливу на процес перенесення розплавленого дугою електродного металу, основні з яких засновані на застосуванні імпульсних впливів [6]:

- електромагнітного поля;
- джерела зварювального струму;
- системи подачі електродного дроту;
- системи подачі захисного чи охолоджуючого газу;
- систем коливань зварювального виробу чи зварювального інструменту.

Можливо комбіноване застосування впливів, що істотно підвищує їх можливості з управління переносом електродного металу.

Кожен із зазначених варіантів має певні діапазони характеристик впливу на зварювальний процес. Частина з них застосовується в механізованому обладнанні, що промислово випускається, зокрема з джерелами зварювального струму, що мають різні алгоритми імпульсного

функціонування. Частина призначена на вирішення спеціальних завдань.

Наш досвід створення та застосування систем імпульсної подачі електродного дроту показує, що вони можуть вирішити практично будь-які завдання зварювального виробництва із застосуванням різних електродних дротів у різних просторових положеннях та умовах, включаючи підводне зварювання мокрим способом.

Особливо слід відзначити можливість забезпечення якісного бездефектного зварювання з імпульсною подачею дроту різних сталей, включаючи важкозварювані, і сплавів алюмінію широкого діапазону товщин. При цьому мінімізуються втрати електродного металу на розбризкування, знижуються прямі енерговитрати та покращується структура металу шва та наплавленого валика та шару.

Сучасні розробки систем і механізмів імпульсної подачі базуються на застосуванні безколекторних високомоментних електродвигунів з комп'ютеризованим управлінням та регулюванням. Такі системи дозволяють здійснити подачу електродного дроту в широкому діапазоні характеристик – від плавного (не збуреного спеціально) до імпульсного з повністю керованими параметрами – частота, шпаруватість, амплітуда, реверсний рух дроту. Забезпечується неспотворені форми імпульсів частотою до 50–60 Гц [7]. Є розробки систем подачі зі зворотним зв'язком за силовими параметрами дугового процесу, що робить його синергетичним і дає додаткові переваги як у налаштуванні системи, так і підтримці режимів. Такий процес названий зварюванням з дозованим подачею електродного дроту і крім іншого забезпечує кероване зниження тепловкладень у зварювальну ванну і, що дуже важливо, в навколошовну зону (зону термічного впливу). Порівняно з відомими способами управління формою зварювального електричного імпульсу, наприклад [8], спосіб зварювання-наплавлення з дозованою подачею має більш широкі можливості щодо регулювання параметрів переносу і розміру краплі. Дозована подача зварювального дроту може бути реалізована як зі зворотним зв'язком за силовими характеристиками зварювальної дуги (струм зварювання, напруга дуги), так і з ручними параметрами управління. У технічній літературі [9] вказано, зварювання нержавіючих, легованих дуплексних сталей внаслідок їх відмінності по теплопровідності має проводитися при встановленні параметрів процесу таким чином, щоб досягти якомога меншого питомого тепловкладення, щоб звести до мінімуму термічні деформації, при цьому напруги, що виникають, можуть бути досить високими, що у поєднанні з робочими навантаженнями на зварний виріб може призвести до корозійного розтріскування конструкції.

Питоме тепловкладення при веденні дугового процесу визначається як

$$Q = k \frac{UI}{v} \quad (\kappa Дж / мм),$$

де  $U$ ,  $I$  – напруга та струм дугового процесу відповідно;  $v$  – швидкість переміщення зварювального інструменту;  $k$  – коефіцієнт узгодження систем подання величин.

Очевидно, що всі основні фізичні параметри дугового процесу впливають на питоме тепловкладання, а отже, на характеристики зварного шва та навколошовної зони.

Є рекомендації та технологічний досвід із зварювання нержавіючих, легованих дуплексних сталей, де показано, що у дуговий процес небажано вкладати погонну енергію більше (2,5–3,2) кДж/мм, при цьому зварювання необхідно вести короткою дугою, що певною мірою знижує рівень вигоряння легувальних елементів, що легують.

Встановлено [10], що застосування імпульсної подачі електродного дроту з керованими параметрами, а також використання дозованої подачі у варіанті зі зворотним зв'язком по струму дугового процесу та цілеспрямовано встановленими вихідними параметрами процесу забезпечує стабільний перебіг процесу з автоматичним підстроюванням параметрів перенесення електродного металу. Це, у свою чергу, забезпечує рівномірні характеристики проплавлення та зовнішній вигляд шва або наплавленого валика.

Можна вести досить продуктивний процес зварювання-наплавлення із застосуванням систем дозованої подачі, але з меншими тепловкладаннями, ніж це зазвичай відбувається при зварюванні з плавною подачею електродного дроту. При цьому може бути отримана сприятлива структуризація металу шва з подрібненням його структури, що підвищує показники міцності зварного шва або наплавленого валика.

При ефективно вибраних параметрах істотно знижується розбризкування електродного металу, що, в тому числі, є наслідком керованого перенесення крапель з певними керованими характеристиками, що також обумовлює рівень вигоряння легувальних елементів.

Нами вперше виконані порівняльні визначення технологічних характеристик зварних сполук легованої нікелем сталі в обсязі комплексного дослідження при застосуванні імпульсної дозованої подачі електродного дроту.

Додатково можна відзначити, що в деяких випадках застосування імпульсної подачі електродного дроту дозволяє уникнути необхідності післязварювальної термічної обробки при зварюванні нержавіючих сталей. Необхідно особливо вказати на суттєве зниження викидів шкідливих аерозолів при дуговому зварюванні-наплавленні з імпульсними алгоритмами руху електродного дроту, яке докладно розглянуто у роботі [11], і це розширює сфери та умови використання цього виду технологічного процесу.

### Мета роботи

Дослідити технологічні особливості і визначити можливість і умови застосування дозованої подачі електродного дроту для зварювання стикових

з'єднань легованих сталей на прикладі нікельвмісної сталі А353 9 % Ні для застосування в умовах промислового виробництва.

Можливість отримання задовільних характеристик при зварюванні та наплавленні в складніших умовах (низькі температури, положення відмінні з горизонтального) представляє науковий та практичний інтерес.

**Критерії оцінки** дугового процесу з різними видами подачі електродного дроту повинні включати наступні показники: продуктивність зварювання, зниження рівня де шви бездефектні (пори, шлакові включення) і зменшення розбризкування, виключення гарячих тріщин, відповідність механічних властивостей зварних з'єднань.

Під час проведення експериментальних досліджень було, в основному, прийнято:

1. Зварне з'єднання: одностороннє стикове, з V-подібною обробкою, відповідно до вимог WPS № FC9N-H-1906;

2. Положення зварювання нижнє (1G) та горизонтальне на вертикальній площині (2G). Зварювання виконується на керамічній підкладці;

3. Захисний газ CO<sub>2</sub>, електродний дріт SW-9NiH діаметром Ø1.2 мм. Товщина зварюваних або наплавлених пластин 20 мм;

4. Погонна енергія зварювання – не більше 2.3...3,2 кДж / мм. Міжшарова температура – не більше 150 °С. Попередній підігрів відсутній;

5. Полярність зварювання та наплавлення зворотна.

### Матеріали і методи

Управління та регулювання проводиться від універсального блоку подачі електродного дроту, спеціально розробленого на основі великої кількості системних досліджень у ДП «ДКТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ». Блок забезпечує низку встановлюваних алгоритмів руху електродного дроту. Від плавної до імпульсних зі складним режимом руху із частотами 50...60 Гц. Дозована подача електродного дроту є одним з варіантів імпульсної подачі і, по суті, і як зазначалось є способом синергетичного управління переносом електродного металу. Блок, представлений на рис. 1, дозволяє програмно здійснювати практично будь-який алгоритм подачі дроту, а також необхідні цикли зварювання – наплавлення. Графічний алгоритм імпульсної швидкості подачі дроту, реалізований універсальним блоком, представлений на рис. 2. При цьому відпрацювання зворотного зв'язку струму дугового процесу графічно представлено на рис. 3.

Блок в обов'язковому порядку дозволяє контролювати, а при необхідності, документувати наступні параметри дугового процесу:

- величина напруги  $U_{св}$ , В;

- зварювальний струм (певне значення, а також струм максимальний  $I_{max}$ , і мінімальний –  $I_{min}$  – для процесу з дозованим подачею електродного дроту): А;

- тимчасові параметри імпульсу:  $t_b$ , коли дріт

рухається вперед, до зварювальної ванни, під дією механізму подачі,  $t_n$  – час паузи, необхідний плавлення електрода і  $t_r$  – час руху дроту назад, від ванни.

Окремо має бути визначено (задано) апаратно:

- швидкість подачі зварювального дроту  $V_e$ ;
- виліт електрода.

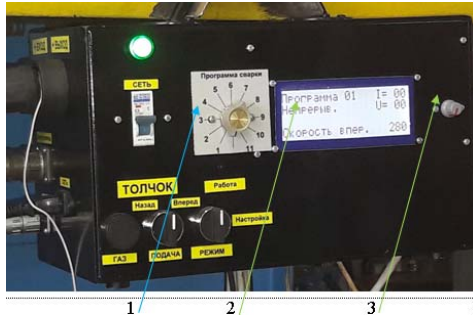


Рис. 1. Універсальний блок управління подачею електродного дроту:

- 1 – перемикач вибору та встановлення вибраних способів подачі; 2 – дисплей; 3 – регулятор установки параметрів подачі

У процесі комплексного дослідження впливу способу зварювання з імпульсною подачею електродного дроту виконувались:

1. дослідження параметрів імпульсів;
2. оцінка величини розбризкування;
3. дослідження величини роботи удару для зварного шва та лінії сплавлення при низькій температурі  $T = -196\text{ }^\circ\text{C}$ ;
4. металографічні дослідження зварного з'єднання із вимірами мікротвердості;
5. рентенографічний контроль зварних з'єднань.

Дослідження виконувалися для трьох базових режимів (способи зварювання), які може реалізувати універсальний блок управління подачею електродного дроту:

1. Звичайна подача електродного дроту з ручним встановленням швидкості подачі та напруги джерела зварювального струму;
2. Імпульсна подача електродного дроту з ручним встановленням будь-якого з параметрів імпульсного руху як це показано на рис. 2, а також напруга

джерела зварювального струму;

3. Дозована подача електродного дроту, яка алгоритмічно представлена на рис. 3, при цьому задаються лише два параметри у вигляді низького та високого рівня струму, які підтримуються зворотним зв'язком за параметрами процесу (струму дуги). У таблиці 1 систематизовані можливості, переваги та недоліки способів зварювання та наплавлення, що визначаються видом подачі електродного дроту.

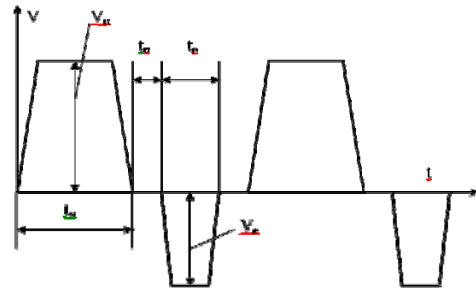


Рис. 2. Графічний алгоритм імпульсної швидкості подачі дроту  $V_b$ ,  $V_r$  – швидкості руху в імпульсі та реверсі;  $t_b$ ,  $t_r$ ,  $t_p$  – часи руху в імпульсі, паузи та реверсі

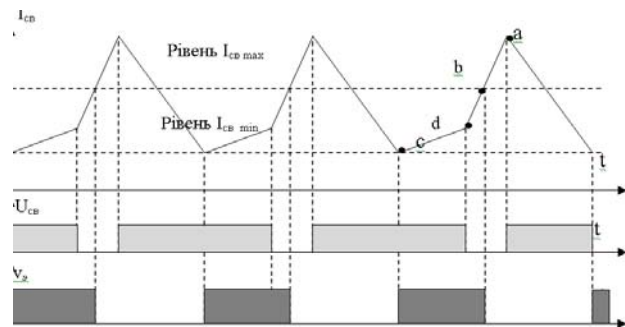


Рис. 3. Алгоритм роботи системи управління переносом електродного металу пов'язаний з параметрами струму дугового процесу:  $I_{св}$  – струм зварювання;  $U_{св}$  – напруга зварювання;  $v_e$  – швидкість подачі електродного дроту; a – перехід краплі у ванну; b – пауза швидкості подачі; c – пуск подачі; d – коротке замикання

Таблиця 1 – Порівнювані за ефективністю режими зварювання-наплавлення

№	Спосіб ведення електродного процесу	Вибір режиму	Переваги	Недоліки	Примітки
1	Класична подача	Ручне встановлення режиму зварювальної напруги та швидкості подачі (струму)	Простота установки та оперативного регулювання	Недостатня керуваність електродувим процесом	Наявність попередніх даних про режими
2	Імпульсна подача з використанням всіх параметрів імпульсної подачі, зазначених на рис. 2	Ручне встановлення режиму зварювальної напруги і всіх параметрів імпульсної швидкості подачі (струму)	Забезпечення високоєфективного процесу зварювання наплавки з керованим переносом електричного металу	Складність налаштування оптимального режиму	Наявність попередніх даних про режими
3	Дозована подача з інформаційним зворотним зв'язком по струму процесу	Автоматична установка імпульсної швидкості подачі в залежності від встановлених мінімального і максимального струму процесу	Швидкий вибір, встановлення і зміна режимів зварювання, наплавлення. Автоматичне підтримання заданих режимів, забезпечення якості процесу	Деяке укладання апаратного обладнання для організації зворотного зв'язку за параметрами дугового процесу	Наявність попередніх даних про режими

**Експерименти.** Усі способи ведення механізованого та автоматичного електродугового процесу, представлені в табл. 1, використовуються для зварювання наплавлення різних за складом та застосуванням сталей, алюмінію та його сплавів у різних просторових положеннях, широкому діапазоні режимів різними типами електродних дротів. В теперішній час ведуться роботи із застосуванням способів зварювання та наплавлення з імпульсними алгоритмами подачі у водному середовищі мокрим способом.

При цьому найкращі результати виходять при застосуванні способів зварювання з використанням керованих алгоритмів руху електродного дроту.

Слід вказати на особливості розробки та конструювання механізованих систем зварювального обладнання – зварювальних і наплавних напівавтоматів із застосуванням механізмів керованої імпульсної подачі електродного дроту. Особливість пов'язана з необхідністю урахування згасання амплітуди імпульсного руху.

В процесі експериментальних робіт з електродугового зварювання був проведений вхідний спектральний контроль хімічного складу сталі А353 9 % Ni, наплавленого металу, що застосовується в дослідженнях порошковим дротом SW-9NiH. Результати аналізу наведено у табл. 2а, б.

**Таблиця 2а** – Вміст легувальних елементів сталі А353 9 % Ni

Масова частка у відсотках легувальних елементів					
C	Si	Mn	Ni	S	P
0,063	0,16	0,49	9,5	0,001	0,014

**Таблиця 2б** – Вміст легувальних елементів у наплавленому металі порошковим дротом SW-9NiH

Масова частка у відсотках легувальних елементів							
C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	S	P
0,063	0,16	0,49	18,4	9,5	0,043	0,007	0,014

Процес електродугового зварювання – наплавлення з імпульсною подачею електродного дроту може бути реалізований, як зі зворотним зв'язком за силовими характеристиками зварювальної дуги (струм зварювання, напруга дуги), так і з ручним способом вибору та встановлення параметрів імпульсного руху електродною. У цьому дослідженні застосовувався інформативний зворотний зв'язок по струму процесу.

Досліджено можливість та особливості застосування керованої подачі електродного дроту легованих сталей при механізованому зварюванні в середовищі CO<sub>2</sub> на прикладі холодостійкої сталі А353 з вмістом 9 % Ni товщиною 20 мм. порошковим дротом SW-9.

Підбір режимів зварювання дозованої подачі проводився у наступній послідовності. На початку виконувалося одностороннє автоматичне зварювання стикових з'єднань сталі S235 товщиною 20 мм з V- подібною розділкою із застосуванням керамічної підкладки. На наступному етапі обраний режим уточ-

нювався для механізованого зварювання з'єднання. Після цього вибраний режим застосовувався при механізованому зварюванні. Було обрано наступні оптимальні режими зварювання стиків А353 сталі 9 % Ni (табл. 3). Також було обрано режими зварювання стику сталі в положенні 2G, імпульсна подача дроту з ручним встановленням параметрів імпульсів (табл. 4).

Необхідно відзначити гарне зворотне формування кореня шва в обох випадках

Важливо знати, що прийнятне формування зварних горизонтальних швів на вертикальній площині, що представляє певні складності при застосуванні звичайних систем подачі дроту, спрощується в умовах дії імпульсних алгоритмів руху електродного дроту при оптимально обраних параметрах.

**Таблиця 3** – Режим зварювання стику в положенні 1G, імпульсна подача дроту (дозована)

Тип шва	Напруга, В	Зварювальний струм А		Середній струм (показник джерела зварювання), А	Швидкість подачі зварювального дроту, см/с
		I <sub>max</sub>	I <sub>min</sub>		
Кореневий	31	200	150	125	13,9
Заповнення обробки, облицювальний	32	250	200	180	13,9

Примітка. Витрати зварювального газу 21–22 л/хв.

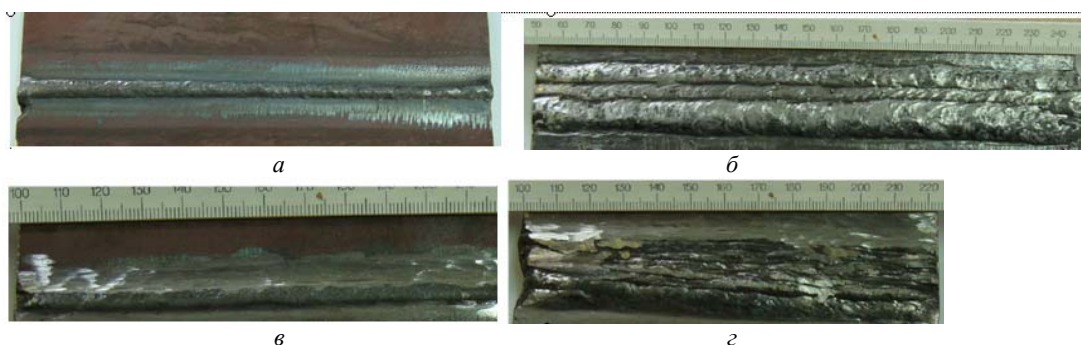
**Таблиця 4** – Режим зварювання стику сталі в положенні 2G, імпульсна подача дроту з ручним встановленням параметрів імпульсів

Тип шва	Напруга, В	Зварювальний струм А		Видіт, мм	t <sub>в</sub> , мс	t <sub>п</sub> , мс	t <sub>н</sub> , мс	Швидкість подачі дроту, см/с
		I <sub>max</sub>	I <sub>min</sub>					
Кореневий*, заповнення оброблення**, облицювальний**	6	50	00	0	0	0	0	8,0

Примітка. Зварювання: \* – кутом, назад; \*\* – кутом уперед. Витрати захисного газу 21–22 л/хв.

Фотографії зварних з'єднань, зварені в положеннях Flat (1G) і Horizontal (2G) для прикладу та порівняння представлені на рис. 3. Потік ванни металу на 2G швах немає. Видно, що за розмірами в частині ширини шви мало відрізняються один від одного, що свідчить про практичну відсутність зсуву металу з вертикальної площини. Підтвердженням сказаного є визначення геометричних розмірів стикових швів, які наведені в табл. 5.





**Рис. 3.** Формування зварного шва при застосуванні імпульсної подачі; позиція 1G: *a* – кореневого шва на керамічній підкладці; *б* – лицювального шва; позиція 2G: *в* – кореневого шва на керамічній підкладці *г* – облицювального шва

**Таблиця 5** – Геометричні розміри стикових швів, виконаних зварюванням із імпульсною подачею

№ п/п	Положення зварювання	Кількість проходів	Облицювальний шов		Кореневий шов	
			Ширина, мм	Висота, мм	Ширина, мм	Висота, мм
1	Нижнє, 1G	14	25,5–27,5	2–3	6–7	1–1,5
2	Горизонтальне, 2G	10	29–32	3–4	6–7	1–1,5

Рентгенографічний контроль зварних з'єднань показав, що вони мають високу якість. Існують лише окремі дефекти у вигляді окремих (1–2) пір діаметром  $\varnothing 1,5$  мм для положення 2G. У разі зварювання у положенні 1G дефекти у шві були відсутні. При проведенні багатопродірного зварювання були встановлені наступні технологічні особливості заповнення обробки V-подібного стикового з'єднання для отримання найбільш якісного зварного шва.

#### 1. Положення 1G.

Зварювання проводиться за наявності зворотного зв'язку по струму дугового процесу при застосуванні дозованої подачі. Для забезпечення якісного формування першого кореневого проходу необхідно зварювати при зменшеному вильоті електрода. Це дозволяє ефективно проводити потрібні маніпуляції електродом при зварюванні кореневого проходу для отримання якісного зворотного формування шва та видалення шлаку з ванни. При цьому параметри зварювального струму для кореня шва будуть дещо меншими, ніж для наступних проходів.

#### 2. Положення 2G.

Застосування зварювання з імпульсною дозованою подачею для горизонтального з'єднання не завжди є оптимальним з точки зору продуктивності, зокрема при виконанні багатошарового зварювання. Тут доцільніше застосування імпульсної подачі електродного дроту з ручним встановленням параметрів імпульсів, що дозволяє отримати значну продуктивність процесу.

#### 3. Положення 1G та 2G.

Найбільш проблемним з метою забезпечення низького рівня дефектності є другий прохід, що накладається на кореневий шов. У цьому випадку звуження оброблення кромки і віддаленість шва від поверхні листа не дає можливість при маніпуляціях електродом повною мірою видалити шлак зі зварювальної ванни.

Це може сприяти утворенню у цьому шарі шлакових включень. Обмеженість у маніпуляціях електродом може призвести до неможливості повною мірою оплавити кромки, що сприяє утворенню непроварів.

Отримані експериментальні дані, дозволили встановити наступні переваги застосування дозованої подачі порошкового дроту порівняно зі звичайним механізованим зварюванням в середовищі  $\text{CO}_2$ :

- дефектність швів менша, особливо це стосується наявності пор та шлаків;
- при цьому швидкість зварювання можна порівняти зі звичайним механізованим процесом;
- зварювальна дуга «пластична», горить стабільно, виведення шлаку та перемішування зварювальної ванни відбувається добре.

У процесі виконання робіт була проведена оцінка величини розбризкування металу дроту для положення 1G у разі застосування дозованої подачі дроту. Режими наплавлення за даними табл.2. Отримані такі результати:

- витрати зварювального дроту – 7 м, вага – 47,5–48 г; час горіння 45–46 с; маси наплавленого металу – 40 г; вага пластини перед напавкою – 1494,5 г; після наплавлення – 1534,5 г.

Дослідження вольтамперної характеристики дуги у разі дозованої подачі зварювального дроту при зварюванні сталі А353 з 9 % Ni проводили за допомогою аналізатора зварювальних процесів. Результати представлені в табл. 6 та рис. 4.

#### Результати та обговорення

Осцилограми напруги на дузі, струму та оцінку кількості коротких замикань наведено на рис. 4. Аналіз результатів осцилографування, представлений у вигляді вольтамперних характеристик на рис. 5, показує, що найбільш оптимальним з стабільності перенесення розплавленого металу у ванну є застосування

імпульсної (дозованої) подачі. У цьому випадку спостерігається найменше значення часу короткого замикання \*  $K_{зкр} = 0,0013$  мс, що вдвічі менше ніж у разі імпульсної подачі з ручною установкою параметрів імпульсів та зварювання без імпульсів подачі, при цьому кількість коротких замикань менша у 2 та 5 разів відповідно. Коефіцієнти стабільності режиму струму і напруги на дузі при застосуванні дозованої подачі також істотно в 1,5...1,9 рази менше ніж для процесу традиційного зварювання. Порівняльний аналіз осцилограм напруги та струму процесу для процесу з імпульсною дозованою подачею показує їх рівномірний характер, різкі піки відсутні.

Дослідження холодостійкості зварних з'єднань [12] при визначенні величини роботи удару KV для зварного шва та лінії сплавлення проводилися при температурі  $T = -196$  °С. Вирізка зразків Шарпі розміром 10мм x 10мм з стикових зварних з'єднань, розташування надрізу та оцінка результатів проводилася відповідно до вимог IGC Code for Ships Carrying Liquefied Gas Ch6. Результати випробувань зразків представлені у табл. 6. Режими зварювання приймалися відповідно до табл. 2, 3 положення 1G і 2G відповідно.

Додатково, з метою загальної оцінки ударної в'язкості зварних з'єднань, було визначено роботу удару для основного металу вздовж та поперек прокату (табл. 7).

Аналіз експериментальних даних, наведених у табл. 6 і 7 показує, що застосування дозованої подачі зварювального дроту і підібраних режимів зварювання (табл. 2, 3) забезпечує величину роботи удару по центру зварного шва, лінії сплавлення і на відстані 1

мм від лінії сплавлення з достатнім запасом (1,5–2 рази) стосовно нормативного. Результати експериментів стабільні, викиди не спостерігаються. Основний метал ізотропний щодо в'язкості – робота удару практично однакова вздовж та поперек прокату.

При зниженні температури до температури кліматичного холоду рівень ударної в'язкості зберігається на рівні  $280$  Дж/см<sup>2</sup>, що пояснюється високим вмістом нікелю в сталі. Порівняння роботи удару основного металу та зварного з'єднання показує, що під дією термічного циклу зварювання відбувається суттєве зменшення роботи удару металу приблизно в 4 рази, що свідчить про необхідність обмежувати погонну енергію зварювання. У цьому випадку доцільно застосування імпульсної дозованої та імпульсної з ручним завданням режимів подачі зварювального дроту, що дозволяє отримати оптимальний тепловий цикл зварювання для сталі A353 9 % Ni та її подібним.

Зразки для металографічних досліджень полірувалися до 14 класу чистоти із застосуванням алмазних паст різної дисперсності. Для виявлення мікроструктури зразки були травлені електrolітично у 20 % водному розчині сірчаноокислого амонію (рис. 6–7).

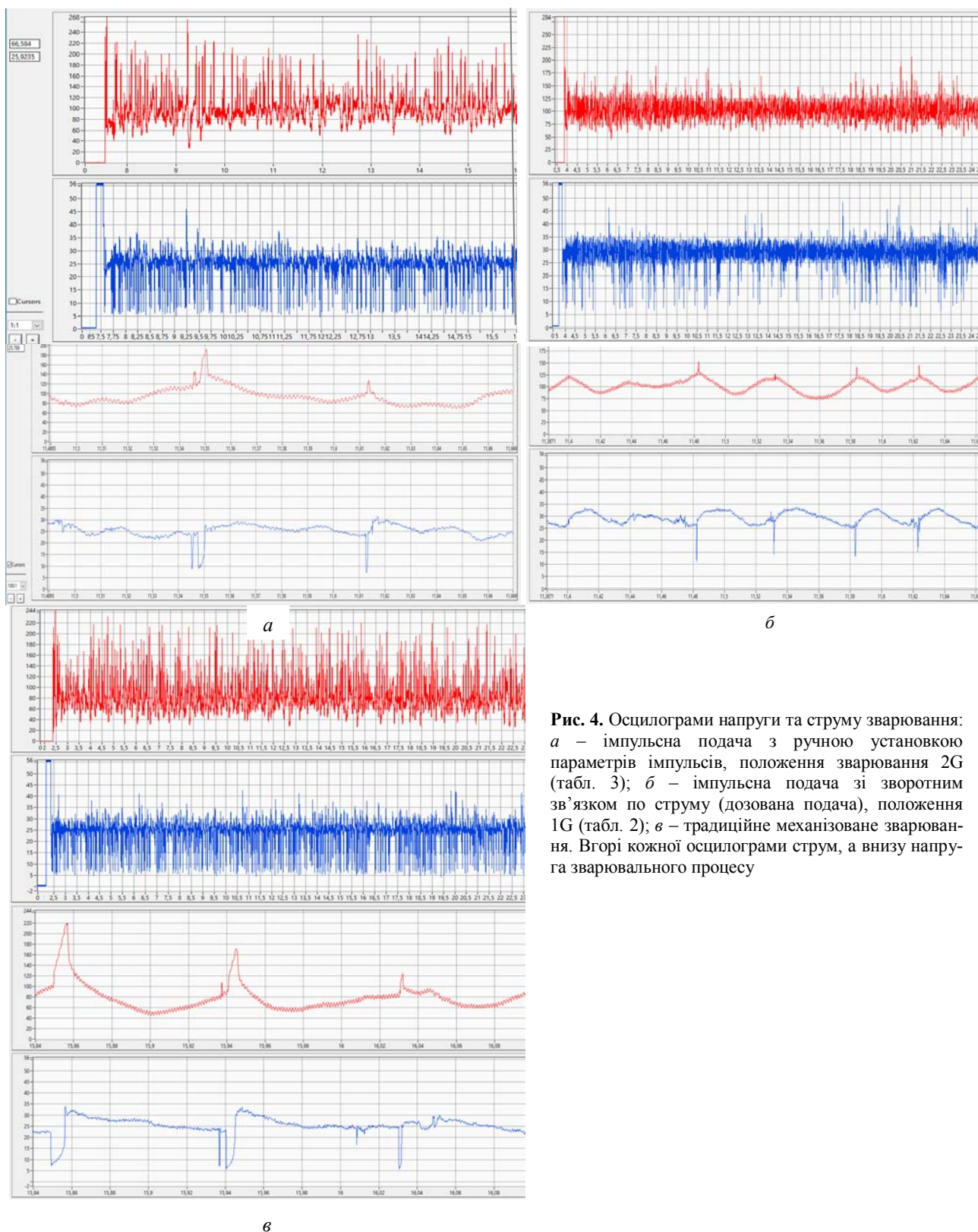
Металографічні дослідження проводили на мікроскопі NEOPHOT-32 за різних збільшень. Фотозйомка неметалевих вихань і мікроструктури здійснювалася за допомогою цифрової фотокамери OLYMPUS. Вимірювання твердості за Віккерсом проводили на твердомірі M-400 фірми LECO при навантаженні 1 кг. Зміст феритної фази визначали на феритометрі FERRITGEHALTMESSER-1053.

**Таблиця 6** – Характеристики імпульсів дозованої подачі електродного дроту при зварюванні сталі A353 9% Ni

№	$U_{ср}$ , В	$I_{ср}$ , А	$K_v^U$ , %	$K_v^I$ , %	$N_{кз}$	$\tau_{кзср}$ , мс	$N_{кз}$ дійсн.	$\tau_{кз}$ дійсн., мс	$f_{кз}$ , Гц
1. Імпульсна подача з ручним регулюванням параметрів імпульсу, положення зварювання 2G (табл. 3);	25,3	97	0,17	0,24	119	0,0028	61	0,0048	14,6/7,5
2. Дозована подача, положення зварювання 1G (табл. 2)	29,4	100	0,09	0,16	53	0,0013	-	-	6,5
3. Звичайне механізоване зварювання, швидкість подачі зварювального дроту 8,3 см/с, напруга 26 В, зварювальний струм $I = 150$ А.	25,2	78	0,14	0,29	263	0,0025	116	0,0048	11,6/5,1

Примітки:  $K_v^U$ , % – коефіцієнт, що характеризує стабільність процесу напруги. Процес вважається стабільним, якщо значення коефіцієнта менше 0,21;  $K_v^I$ , % – коефіцієнт, що характеризує стабільність процесу по зварювальному струму;  $U_{ср}$ , В – середня напруга на дузі;  $I_{ср}$ , А – середній зварювальний струм;  $N_{кз}$  – загальна кількість коротких замикань; \*  $K_{зкр}$ , мс – час короткого замикання;  $N_{кз}$  дійсн. – кількість дійсних коротких замикань (що впливають процес зварювання); \*  $K_{з}$  дійсн. – час дійсного короткого замикання;  $f_{кз}$ , Гц – частота дійсних коротких замикань.





**Рис. 4.** Осцилограми напруги та струму зварювання: *а* – імпульсна подача з ручною установкою параметрів імпульсів, положення зварювання 2G (табл. 3); *б* – імпульсна подача зі зворотним зв'язком по струму (дозована подача), положення 1G (табл. 2); *в* – традиційне механізоване зварювання. Вгорі кожної осцилограми струм, а внизу напруга зварювального процесу

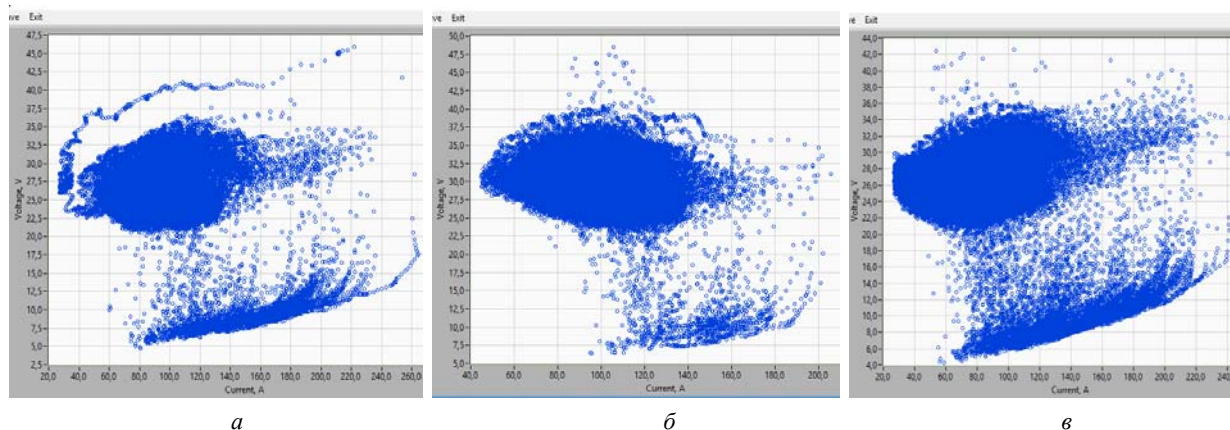


Рис. 5. Вольт-амперна характеристика: *a* – механізоване зварювання з імпульсною подачею електродного дроту; *б* – механізоване зварювання з імпульсною (дозованою) подачею дроту; *в* – традиційне механізоване зварювання

**Таблиця 7** – Результати визначення роботи удару (KV) стикових зварних з'єднань сталі А353 9% Ni завтовшки 20 мм при зварюванні з дозованою подачею

№	Положення зварювання	Місце розташування V – подібного надрізу	Температура проведення випробування, °С	Величина роботи удару KV, J	Мінімальне значення роботи удару по IGC Code KV, J
1	Нижнє (1G)	Лінія сплавлення	- 196	77	41
2				68	
3				84	
4				78	
5		Центр шва		62	
6				70	
7				60	
8				70	
9	Горизонтальне (2G)	Лінія сплавлення	84		
10			88		
11			77		
12			98		
13		Линия сплавлення + 1 мм	89		
14			64		
15			108		
16		Центр шва	74		
17			85		
18			86		
19	85				
20	85				

**Таблиця 8** – Результати визначення роботи удару (KV) листового прокату А353 сталі 9 % Ni

№	Напрямок прокату	Температура проведення випробування, °С	Величина роботи удару KV, J	Мінімальне значення роботи удару по IGC Code KV, J
1	Вздовж напрямку прокату, L	- 196	313	41
2			314	
3			289	
4			289	
9	Поперек напрямку прокату, T	- 196	254	
10			283	
11			276	
12			282	

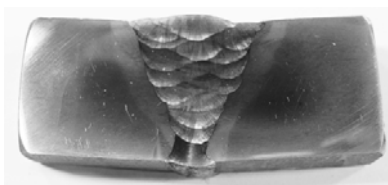


Рис. 6. Загальний вигляд зварного з'єднання, положення 1G

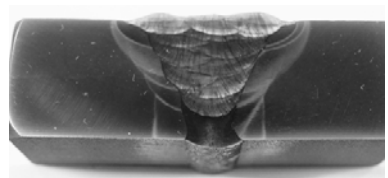


Рис. 7. Загальний вигляд зварного з'єднання, положення 2G

При візуальному огляді багат шарових зварних з'єднань зразків 1G і 2G (відповідно нижнє і горизонтальне положення при зварюванні) тріщин, пір та інших макродефектів на досліджуваних поверхнях не виявлено. Дослідження неметалевих включень у зварних з'єднаннях з неполірованою поверхнею показало, що у швах спостерігаються однотипні неметалеві включення, а саме: основну масу включень складають оксиди – глобулярні включення сірого кольору, у темному полі оточені тонкою лінією – це вюстит, рис. 8–9.

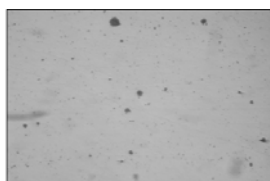


Рис. 8. Неметалічні включення у центрі шва, зразок 1G,  $\times 500$

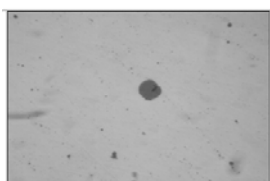


Рис. 9. Неметалічні включення, у шві біля лінії сплаву, зразок 1G,  $\times 500$  сплавлення

Забрудненість оксидами відповідає 2–3 балам за ГОСТ 1778-70. Розмір цих включень від 1 до 10 мкм, іноді від 15 мкм і більше (рідко). Також спостерігаються окремі дрібні силікати ( $\text{SiO}_2$ ) від 2 до 4 мкм.

Забрудненість силікату менше за бал №1 за ГОСТ 1778-70. В основному металі зразків 1G і 2G спостерігаються оксиди точкові (розмір 1–4 мкм) – забруднення менше бала № 1, а також зустрічаються одиничні силікати крихкі (4–5 мкм) – забруднення менше бала № 1 за ГОСТ 1778-70.

Мікроструктура досліджуваних швів зразків 1G та 2G лита, аустенітна (рис. 10–12). У всіх швах відсутня феритна фаза ( $\delta$ -ферит). Незначна кількість феритної фази спостерігається по лінії сплаву – до 0,5–0,8 %, що пов'язано з впливом основного металу.



Рис. 10. Мікроструктура шва, зразок 1G,  $\times 100$

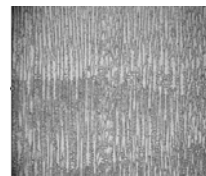


Рис. 11. Мікроструктура центра шва, зразок 2G,  $\times 100$

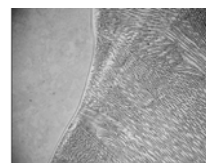


Рис. 12. Мікроструктура шва біля лінії сплаву, зразок 2G,  $\times 100$

У зоні термічного впливу, у верхній частині зразків 1G і 2G як у ділянках великого зерна, так і в ділянках дрібного зерна спостерігається суміш верхнього та нижнього бейніту (тонко подрібнена суміш голок різної спрямованості та її пакети, орієнтовані під кутом  $60^\circ$ ), що видно на рис. 13–17. Розмір зерна у ділянках великого зерна у верхній частині зразків 1G та 2G відповідає балам №3–4 за ГОСТом 5639-82 (розмір зерен від 88 мкм до 125 мкм), у ділянках дрібного зерна – бал № 5–6 (розмір зерен від 44 до 65 мкм). Твердість такої мікроструктури знаходиться в межах від  $\text{HV1} = 263 \text{ кгс/мм}^2$  до  $343 \text{ кгс/мм}^2$ . У центральній та кореневій частині зварних з'єднань у ВТО зразків 1G та 2G спостерігаються структури термооброблені внаслідок термоциклів при заповненні розробки. В результаті твердість знижується до  $\text{HV1} = 260\text{--}275 \text{ кгс/мм}^2$  у зразку 1G і до  $\text{HV1} = 260\text{--}309 \text{ кгс/мм}^2$  у зразку 2G. Мікроструктура основного металу зразків 1G і 2G дрібнозерниста (бал зерна № 8–9 за ГОСТом 5639-82 (середній розмір зерен від 0,015 до 0,022 мм або 15–22 мкм) феритна з виділенням карбідів і, можливо, невеликою кількістю аустеніту).



Рис. 13. Мікроструктура лінії сплаву, зразок 1G,  $\times 200$

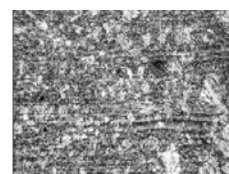


Рис. 14. Мікроструктура ділянок великого та дрібного зерна ЗТВ 1G,  $\times 200$



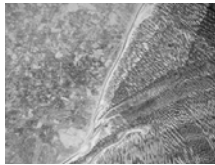


Рис. 15. Мікроструктура біля лінії сплаву, зразок 2G,  $\times 100$

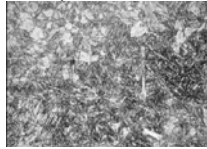


Рис. 16. Мікроструктура ділянки великого зерна 3ТВ, зразок 2G,  $\times 200$

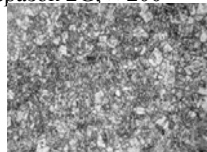


Рис. 17. Мікроструктура ділянки дрібного зерна 3ТВ, зразок 2G,  $\times 200$



Рис. 18. Мікроструктура основного металу, зразок 2G,  $\times 200$

Було досліджено мікротвердість лінії сплавлення та її розподіл у 3ТВ (рис. 19). У разі зварювання в положенні 2G лінія сплавлення у лицьового валика має підвищену твердість 330...347 кгс/мм<sup>2</sup> HV1 порівняно зі зварюванням у положенні 1G, де аналогічна твердість має значення 242...287 кгс/мм<sup>2</sup> HV1. Крім приповерхневих шарів мікротвердість вздовж лінії сплаву однорідна. Мікротвердість зварного шва має значення HV1 = 193...205 кгс/мм<sup>2</sup> і менше ніж для основного металу HV1 = 242...248 кгс/мм<sup>2</sup>.

Відсутність у мікроструктурі лінії сплавлення мартенситу та утворення карбідів по межах зерен, а також дрібнодисперсність ферито-карбідної структури та бейніту показує, що зварювальні з'єднання сталі А353 9 % Ні не повинні бути схильні до утворення холодних тріщин і метал лінії сплаву повинен мати досить високу в'язкість.

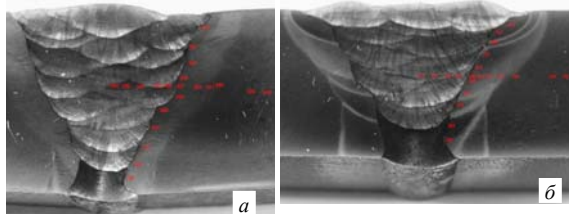


Рис. 19. Твердість HV1, кгс/мм<sup>2</sup> стикового з'єднання сталі А353 9 %Ні завтовшки 20 мм:  
а – положення 1G; б – положення 2G

#### Висновки

1. На основі аналізу отриманих експериментальних даних можна стверджувати, що застосування імпульсної подачі електродного дроту дозволяє отримати

ти менше дефектів у шві (пори, шлак) і істотно менше розбрикування металу; швидкість зварювання при застосуванні дозованої подачі близька до звичайного механізованого зварювання.

2. Застосування розробленої в ДП ДКТБ «ІЕС ім.Є.О.Патона НАНУ» універсальної системи подачі з різними алгоритмами руху електродного дроту дозволяє при керованій імпульсній подачі, в тому числі і дозований, виконувати зварювання сталі А353 з 9 % Ні, легованих та інших сталей на оптимальному рівні погонній енергії з реалізацією керування процесом перенесення електродного металу для механізованого зварювання порошковим дротом. На відміну від керування переносом металу за рахунок застосування імпульсного впливу джерел зварювального струму, можна отримувати рівномірне плавлення оболонки порошкового дроту та її наповнювача, що позитивно позначається на структурі металу шва.

3. Параметри імпульсної подачі по-різному впливають на результати процесів зварювання і наплавлення, при цьому найбільш універсальною є дозована подача електродного дроту, в реалізації якої використовуються зворотні зв'язки параметрів дугового процесу, в тому числі і по струму.

4. Реалізація імпульсної подачі з керованими параметрами, у тому числі і дозованої в умовах виробництва, не вимагає спеціальних зварювальних джерел живлення. Технологія дозованої подачі може бути вписана у існуючий технологічний процес із мінімальними витратами. При цьому обсяг додаткової підготовки виробництва буде мінімальним.

5. Механізм дозованої подачі, розроблений ДП ДКТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, має високі показники швидкодії та надійності, тому що в його електродвигуні відсутній щітковий вузол та знижувальний механічний редуктор.

6. Сфера застосування механізованого та автоматичного процесів зварювання та наплавлення з імпульсною подачею електродного дроту дуже широка і включає в себе:

- різноманітність застосовуваних електродних дротів як за складом, так і за типом;
- різні зварювані та наплавлені сталі та сплави алюмінію;
- організація якісного ведення процесу у різних просторових положеннях та умовах, у тому числі й під водою.

#### Список літератури

1. Патон Б. Е. Современные направления исследования и разработок в области сварки и прочности конструкций / Патон Б. Е. // Автоматическая сварка. – 2003. – № 10–11. – С. 7–22.
2. Анализ хладостойкости металлов с различным типом кристаллического строения / Кабалдин Ю. Г., Хлыбов А. А., Аносов М. С. и др. // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22. – № 3. – С. 48–55.
3. Определение параметров импульсного механического воздействия на сварочного ванну для структуризации металла при автоматической дуговой наплавке / Лебедев, В. А., Драган С. В., Галь А. Ф., Козырко О. А. // Збірник наукових праць НУК. Обробка матеріалів у машинобудуванні. – 2016. – № 1. – С. 19–26.
4. Мойсов Л. П. Порошковая проволока – сва-

рочный материал XXI века / Мойсов Л. П. // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2002. – № 9. – С. 7–10.

5. Восстановительная наплавка порошковой проволокой / Орлов Л. Н., Голякевич А. А., Титаренко В. И., Пелешко В. Н. // Автоматическая сварка. – 2005. – № 12. – С. 45–50.

6. V. Lebedev, U. Reisgen & I. Lendel, Study of technological opportunities of GMA welding and surfacing with pulse electrode wirefeed // Welding in the World. February, 2016. – 9 p.

7. Лебедев В. А. Быстродействующий вентильный электропривод для оборудования механизированной дуговой сварки / Лебедев В. А., Гулый М. В. // Мехатроника. Автоматизация, Управление. – 2014. – № 6. – С. 47–51.

8. Influence of GMAW-P current waveforms on heat input and weld bead shape / Joseph A., Farson D., Harwig D., Richardson R. // Science and Technology of Welding and Joining. – 2005. – Vol. 10. – N 3. – P. 311–318.

9. Influence of heat input on weld bead geometry using duplex stainless steel wire electrode on low alloy steel specimens. Cogent Engineering Mondal A., Kumar Saha M., Hazra R., & Das S. – 2016. – Vol. 3(1). – 14 p.

10. Лебедев В. А. Механизированная дуговая сварка и наплавка в разных пространственных положениях с управляемой дозированной подачей электродной проволоки различных типов / Лебедев В. А., Жук Г. В. // Тяжёлое Машиностроение. – 2017. – № 6. – С. 19–23.

11. Гигиенические характеристики механизированной дуговой сварки с импульсной подачей электродной проволоки / Лебедев В.А., Левченко О.Г., Максимов С.Ю. и др. // Безопасность Жизнедеятельности. – 2015. – № 9. – С.15–18.

12. Low temperature impact toughness of high strength structural steel / L. Tong, L. Niu, S. Jing, L. Ai, X. Zhao // Thin-Walled Structures. – 2018. – Is. 132. – P. 410–420.

Одержано 10.06.2022

### Lebedev V., Zuck G., Brykov M. Performance characteristics of nickel-containing steel structures during mechanized welding-surfacing with modified (dosed) electrode wire feeding

**Purpose.** To study and analyze in a comparative order the influence of factors of the controlled pulse process of electrode wire supply on some basic mechanical characteristics of seams and welded rollers in the processes of welding and surfacing of nickel-containing steels.

**Methods of research.** The study the mechanical characteristics of seams and welded rollers was carried out using modern laboratory equipment and appropriate techniques. This made it possible to determine how the pulse feed parameters affect the strength characteristics of the weld and near the weld zone over the entire cross-sectional area of the weld or weld layer. Detailed characteristics of feed pulses were determined using a welding process analyzer to obtain oscillograms of power parameters of arc combustion with their analysis, including determining the stability of the arc process for different types of pulses. Important for the improvement of welding results is the controlled nature of the electrode metal transfer synchronous with the pulsed movement of the electrode. It is noted that the energy consumption of the arc process during the pulse supply of the electrode wire with an indication of its reduction compared to traditional welding.

Experimental work was performed using a special electrode wire, which is usually used for welding and surfacing of nickel-containing steels. These processes were carried out in a protective environment of CO<sub>2</sub> in automatic mode.

**Results.** Due to the fact that the strength characteristics of the weld are among the most important, attention is paid to their definition and analysis. The strength characteristics depend on many parameters, in particular the thermal characteristics of the process, the structure of the weld metal, the presence of non-metallic inclusions and so on. All these factors were studied with the help of appropriate instruments, and on the basis of numerous comparative photos of microstructures on sections of the cross section. The analysis of the sections revealed the types of microstructures obtained, the presence of inclusions and more. It is determined, in particular, that the structure of weld metal in pulsed electrode wire welding differs significantly from the structure of traditional welding in reducing inclusions, finer grains, etc., which improves the mechanical properties of the weld and seam area.

**Scientific novelty.** Based on a series of experimental studies, the use of pulse algorithms for the movement of the electrode wire with certain parameters in automatic mode for welding and surfacing of nickel-containing steels to improve the mechanical properties of seams and welded rollers.

**Practical value.** It is determined that the method of pulse welding of electrode wire to the controlled variant, including nickel-containing steels is effective and can be widely used in industry using specially designed equipment that provides a suitable process with stronger characteristics.

**Key words:** arc welding, nickel-containing steels, melting electrode, pulsed wire feed, parameters, experiments, processing of results.