

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О. ПАТОНА**

**КАХОВСЬКИЙ
Микола Юрійович**

УДК: 621.791.042.3

**САМОЗАХИСНИЙ ПОРОШКОВИЙ ДРІТ ДЛЯ ПІДВОДНОГО
ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ ХРОМОНІКЕЛЕВИХ
СТАЛЕЙ ТИПУ 18-10**

Спеціальність 05.03.06
«Зварювання та споріднені процеси і технології»

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ - 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті електрозварювання імені Є. О. Патона Національної Академії Наук України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, с.н.с.
Максимов Сергій Юрійович
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
м. Київ, завідуючий відділом №18

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Перемітько Валерій Вікторович
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське,
декан металургійного факультету, професор кафедри технології
та устаткування зварювання

кандидат технічних наук, доцент
Сливінський Олексій Анатолійович
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ,
доцент кафедри зварювального виробництва інституту
матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона.

Захист відбудеться «29» квітня 2021 року о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.26.182.01, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 03150, м. Київ -150, вул. Казимира Малевича, 11.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: Україна, 03150, МСП, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

Автореферат розіслано «25» березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д. 26.182.01
кандидат технічних наук



Є.В. Шаповалов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для проведення зварювально-ремонтних робіт на морських нафтогазових платформах та трубопроводах, портових і гідротехнічних спорудах, при суднопідйомних і судноремонтних роботах широко застосовують мокре підводне зварювання. Завдяки своїй мобільності і простоті, його використання є особливо актуальним при ліквідації аварійних ситуацій на об'єктах підвищеної небезпеки, наприклад на атомних електростанціях.

Так на Пенсільванській АЕС (США) було проведено ремонт обладнання, що знаходилося в зоні високої радіації методом ручного дугового зварювання покритими електродами безпосередньо у воді. Успішне виконання ремонтних робіт підтвердило доцільність використання фізичних властивостей води, як бар'єра від радіоактивного випромінювання.

Однак внаслідок низької продуктивності даного виду зварювання, проведення повного обсягу зварювально-ремонтних робіт потребувало великої кількості зварників та тривалої зупинки виробничого циклу АЕС. Вирішення даної проблеми можливе за рахунок застосування механізованого мокрого підводного дугового зварювання, при якому продуктивність виконання робіт значно підвищується, загальна тривалість проведення зварювально-ремонтних робіт так само, як і час перебування водолаза-зварника поблизу джерела радіоактивного випромінювання значно скорочуються, а можливість подальшої автоматизації процесу дозволяє повністю виключити перебування людини в особливо небезпечних умовах.

Через особливості фізико-металургійних процесів горіння дуги і утворення зварного з'єднання безпосередньо у водному середовищі для мокрого підводного зварювання використовуються спеціалізовані присадкові матеріали. Розроблені в ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України покриті електроди і порошковий самозахисний дріт призначені для зварювання лише маловуглецевих та низьколегованих сталей. Що ж стосується покритих електродів для мокрого підводного зварювання високолегованих сталей, то їх наявність в світі вкрай обмежена, а зварювальні дроти як в Україні так і закордоном взагалі відсутні.

Враховуючи вищезазначене та фінансові збитки внаслідок простою виробничого циклу АЕС, що за літературно-аналітичними даними можуть складати півмільйона доларів США за годину, розробка самозахисного порошкового дроту та технології механізованого мокрого підводного зварювання високолегрованої корозійностійкої сталі є вкрай актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконувалася в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України згідно тем 1.6.1.19.3 (19/3) 2013-2015 рр. «Дослідження зварюваності мартенситно-старіючих, високолегованих хромонікелевих сталей, нікелевих сплавів і різнорідних з'єднань та обробка конструкційних, функціональних і композиційних матеріалів» та 1.6.1.1.19.2 (19/2) 2016-2018 рр. «Розробка технології та автоматизація процесів зварювання в умовах інтенсивного радіаційного опромінення конструкційних елементів герметичних пеналів із нержавіючих сталей для захоронення відходів ядерних реакторів».

Мета роботи: розробити самозахисний порошковий дріт для мокрого підводного зварювання високолегованої корозійностійкої хромонікелевої сталі типу 18-10, що забезпечує механічні властивості металу шва у відповідності до вимог класу «В» стандарту з підводного зварювання ANSI/AWS D3.6.

Наукові задачі. Для виконання поставленої мети треба вирішити наступні задачі:

- дослідити фізико-хімічні властивості газошлакоутворюючої системи і оптимізувати її склад та кількість для забезпечення високих зварювально-технологічних характеристик та задовільного формування зварного шва;
- вивчити особливості взаємодії газів і розплавленого металу, ступінь окислення легуючих елементів в атмосфері парогазового пузиря, а також визначити тип і кількість розкислювачів;
- визначити головні чинники дестабілізуючого впливу водного середовища, дослідити методи підвищення стабільності процесу горіння дуги, а також визначити тип і кількість стабілізуючих компонентів;
- дослідити структуру і властивості наплавленого металу та встановити вихідні положення для розробки самозахисного порошкового дроту для мокрого підводного зварювання високолегованих корозійностійких хромонікелевих сталей типу 18-10.

Об'єкт досліджень: механізоване дугове зварювання високолегованої аустенітної корозійностійкої сталі X18H10T порошковим самозахисним дротом безпосередньо у водному середовищі.

Предмет досліджень: фізико-металургійні процеси, що протікають при мокрому підводному зварюванні високолегованої корозійностійкої хромонікелевої сталі типу 18-10.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

- визначено особливості впливу водного середовища на газонасиченість металу зварного шва та граничну кількість газів в ньому. Показано, що на відміну від зварювання на повітрі, при мокрому підводному зварюванні пріоритетною задачею є зниження в наплавленому металі вмісту кисню. Встановлено, що отримання якісних багат шарових наплавлень без наявності пор та ґрату досягається обмеженням вмісту кисню в наплавленому металі на рівні 0,050...0,055 мас. % (що відповідає рівню кисню при зварюванні на повітрі), і забезпечується підвищенням кількості газошлакоутворюючих компонентів в осерді порошкового дроту з 14 мас.% до 20,0...21,0 мас. % та додаванням композиції розкислювачів на основі Mn, Si, Al;
- запропоновано ефективні заходи щодо підвищення стабільності процесу горіння дуги при підводному зварюванні сталі X18H10T шляхом вибору типу і кількості фторидних і карбонатних складових, а також компонентів стабілізаторів. Визначено, що дестабілізуючий вплив фторидів обернено пропорційний їх термічній стійкості. В якості стабілізуючої добавки обрано спеціально виплавлену фриту на основі лужних та лужноземельних металів (Li, Na, K, Ca), вміст якої забезпечує протікання процесу підводного зварювання без коротких замикань;
- вперше, за допомогою математичного методу планування експерименту досліджено вплив компонентів газошлакоутворюючих систем на основі

комплексних композицій карбонатів та фторидів, а також змінних складових на основі Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 на якість формування зварних швів, ступінь розбризкування та відділення шлакової кірки при підводному зварюванні сталі X18H10T. Визначено, що оптимальний склад газшлакоутворюючої системи самозахисного порошкового дроту знаходиться в межах: комплекс фторидів - 30...55 мас. %, комплекс карбонатів - 25...45 мас. % та TiO_2 - 20...30 мас. %.

Практичне значення отриманих результатів. Запропоновано і реалізовано принципи створення самозахисного порошкового дроту для дугового зварювання високолегованих корозійностійких сталей безпосередньо у воді, які базуються на результатах вивчення особливостей впливу водного середовища на характер фізико-металургійних процесів зварювання. Вперше в світовій практиці розроблено самозахисний порошковий дріт, який забезпечує необхідний рівень властивостей зварних з'єднань у відповідності до вимог класу «В» стандарту з підводного зварювання ANSI/AWS D3.6 і становить основу технології мокрого підводного зварювання високолегованих корозійностійких хромонікелевих сталей типу 18-10.

Особистий внесок автора. Дисертаційна робота є результатом самостійно виконаних наукових досліджень. Постановка завдань, вибір наукових підходів для їх вирішення, виконання експериментів, основні наукові результати, що викладені в дисертації, виконані здобувачем особисто. При підготовці та обробці отриманих даних, формулюванні висновків, теоретичних узагальнень та технологічних рекомендацій, написанні публікацій, внесок автора був визначальним.

Апробація результатів досліджень. Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на 7 науково-технічних конференціях таких, як: Unterwassertechnik 2011: Vorträge der Sondertagung im Rahmen von DVS Congress und DVS Expo, (м. Гамбург, Німеччина, 2011 р.); VIII международная конференция «Сварочные материалы», (м. Київ, 2014 р.); VIII науково-технічна міжнародна конференція молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології», (м. Київ, 2015 р.); 69th International Institute of Welding Annual Assembly and International Conference (м. Мельбурн, Австралія, 2016 р.); 9th International Conference of young scientists and specialists «Welding and Related Technologies (WRTYS-2017)», (м. Київ, 2017 р.); The international research and practical conference «The development of technical sciences: Problems and solutions», (м. Брно, Чехія, 2018 р.); «International scientific conference «Modern global trends in the development of innovative scientific researches», (м. Рига, Латвія, 2020 р.).

Публікації результатів досліджень. За темою дисертації опубліковано 14 наукових праць, з них 7 статей у спеціалізованих фахових виданнях (4 з яких у виданнях, що входять до міжнародної науко-метричної бази «Scopus») та 7 праць в наукових збірниках і матеріалах конференцій.

Структура і обсяг роботи. Робота складається з реферату, змісту, вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел, викладена на 204 сторінках друкованого тексту, включає 59 рисунків, 108 таблиць та 102 використаних джерела.

Автор висловлює щире і глибоке подяку за підтримку та всебічне сприяння у виконанні роботи працівникам Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної Академії Наук України: провідному науковому співробітнику

відділу №19, кандидату технічних наук Каховському Ю.М. та науковому керівнику, завідувачу відділу №18, доктору технічних наук Максимову С.Ю.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовані актуальність і мета дисертаційної роботи, вказана наукова новизна, наводиться практична цінність, визначено об'єкт і предмет дослідження.

У першому розділі наведено літературний огляд результатів досліджень особливостей зварювання високолегованих сталей аустенітного класу, способи зварювання та зварювальні матеріали, сучасне уявлення суті процесів, які протікають при мокрому підводному зварюванні маловуглецевих сталей, систематизовані результати існуючих даних, зроблені висновки, сформульована мета та задачі досліджень.

Підводне зварювання низьколегованих конструкційних сталей досить широко використовується в галузі енергетики, нафтогазовидобуванні, кораблебудуванні, будівництві гідротехнічних та портових споруд, трубопроводів, однак все більше застосування внаслідок високих антикорозійних властивостей знаходять високолеговані корозійностійкі хромонікелеві сталі типу 18-10, такі як 03X18H10T, 08X18H10T та 12X18H10T. Ці сталі мають високу корозійну стійкість, добре зварюються та прокатуються в гарячому й холодному станах, витримують глибоку витяжку і профілювання. Об'єктом досліджень обрана високолегована корозійностійка сталь аустенітного класу 12X18H10T.

Особливості підводного зварювання низьколегованих конструкційних сталей описані в літературних джерелах досить повно, а от що стосується високолегованих корозійностійких сталей – то літературні джерела практично відсутні.

Зварювання у водному середовищі має ряд відмінностей від зварювання на повітрі. Відомо, що густина води у 850 разів більша ніж повітря, теплоємність - у 4 рази, а теплопровідність - у 25 разів. Внаслідок інтенсивного охолоджуючого впливу до 130°C/с та підвищеного гідростатичного тиску навколишнього середовища відбувається контрагування (стиснення стовпа) зварювальної дуги. Дуга горить у замкненому об'ємі парогазового пузиря, який утворюється за рахунок дисоціації води на O₂, H₂, OH, O, H, продуктів згорання та випаровування електродного матеріалу і розплавленого металу самого виробу, що призводить до значного насичення рідкого металу газами [O] та [H]. В процесі горіння дуги об'єм газового пузиря збільшується до критичного розміру, після дроблення якого більша частка (приблизно 80...90%) спливає на поверхню. Спільний вплив зазначених факторів визначає екстремальність умов зварювання під водою і обумовлює труднощі одержання якісних зварних з'єднань.

На даний час мокре підводне зварювання високолегованих корозійностійких сталей виконують тільки за допомогою ручного дугового зварювання спеціалізованими покритими електродами, самозахисних порошкових дротів для мокрого підводного зварювання високолегованих корозійностійких хромонікелевих сталей типу 18-10 в світі досі не розроблено.

У другому розділі наведено обрані та розроблені методики і обладнання для проведення досліджень та експериментів.

Аналіз електричних параметрів процесу зварювання проводились на основі модифікованої методики І.К. Походні, із застосуванням аналізатора зварювальних процесів ASP-19. Він складається з ноутбука та автономного 16-канального 14-бітного високошвидкісного аналого-цифрового перетворювача з системою нормалізації сигналів та гальванічною розв'язкою сигналів струму та напруги дуги від зварювального контуру за рахунок датчиків Холла. Для кількісної оцінки стабільності процесу горіння дуги фіксували значення тривалості і періодичності коротких замикань ($\tau_{кз}$), обчислювали середньостатистичні значення діючих величин зварювального струму ($I_{зв}$) та напруги дуги ($U_{д}$), а також коливання сили струму ($\Delta I_{зв}$) та напруги дуги ($\Delta U_{д}$) відносно їх середніх значень. За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення були побудовані та проаналізовані графічні зображення показників протікання процесу зварювання (гістограми напруги дуги та зварювального струму, вольт-амперна характеристика і осцилограма процесу зварювання).

Оцінку розбризкування присадного металу і відокремлення шлакової кірки проводили якісно (суб'єктивно) по 10 бальній шкалі (10 – відмінно, 1 – погано).

Оцінку щільності металу шва (наявність пор, зашлакувань та гарячих тріщин) проводили візуально, для чого після злому таврового зразка на його поверхні визначали наявність чи відсутність дефектів та їх кількість згідно ISO 15792-1:2020.

Хімічний склад наплавленого металу оцінювали методами хімічного та емісійного спектрального аналізів передбаченими ISO 6847:2020 з верхніх шарів наплавлень з використанням спектрометра ЛОМО ДФС-36, а вміст водню та кисню – методом відновлювального плавлення в потоці газу-носія циліндричних зразків Мі-99, вирізаних з центральних ділянок зварних швів на установках Лесо RO-316 і RH-3 відповідно.

Для виявлення мікроструктури зварного з'єднання дослідних зразків обрали електролітичне травлення в 20% водному розчині сірчанокислового амонію ($U = 6...8$ В, $\tau = 4...6$ с). Перегляд та фотографування мікроструктур здійснювались на мікроскопі Neophot-32 з використанням цифрової камери Olympus. Вимірювання твердості по Віккерсу проводили за допомогою твердоміру марки Лесо М-400 при навантаженнях 100 г та 1000 г. Оцінку вмісту феритної фази в наплавленому металі проводили об'ємним магнітним методом на контрольних зразках, вирізаних з останнього шва наплавлення, за допомогою феритометра Ferritgehaltmesser 1.053.

Механічні властивості металу шва оцінювали відповідно до міжнародних стандартів ANSI/AWS D3.6 і ДСТУ EN ISO: 9015-1:2019, 9015-2:2019, 5173:2019, 9016:2019 та 4136:2014. Випробування зварних з'єднань на схильність до міжкристалітної корозії проводили у відповідності до ДСТУ ISO 3651-1:2005 та 3651-2:2005 методом АМ або АМу (середовище – сірчана кислота).

Для виготовлення дослідних зразків порошкового самозахисного дроту було розроблено та виготовлено спеціалізований волочильний стан з формуючою приставкою дослідного зразка. Порошкові дроти виготовляли методом засипання шихти в стрічку-оболонку і волочіння через ряд філь'єр до необхідного діаметру.

Для випробування дослідних зразків порошкових дротів був доопрацьований зварювальний трактор ТС-17, виготовлено дослідну ванну для проведення мокрого підводного зварювання на глибині до 0,5 метра. Виконання контрольних зварних

стиків та відпрацювання технології зварювання у різних просторових положеннях проводили у басейні глибиною 3 метри.

У **третьому розділі** наведено результати досліджень фізико-хімічних та металургійних процесів при мокрому підводному зварюванні високолегованих хромонікелевих сталей типу 18-10, які дозволили обрати тип шлакової системи та кількість газошлакоутворюючих компонентів, обґрунтувати вибір стрічки-оболонки для виготовлення порошкового самозахисного дроту малого діаметру, дослідити наукові передумови для розробки легуючої та шлакової систем.

Відповідно до ДСТУ EN ISO 3581:2019 та ГСТУ 3-020-2001 при зварюванні високолегованої хромонікелевої сталі 12X18H10T необхідно забезпечити хімічний склад наплавленого металу типу 08X20H9Г2Б, що забезпечує гарантовану технологічну міцність (тріщиностійкість) за рахунок наявності феритної складової в кількості 2...10% та достатні механічні та корозійні властивості.

Розрахунок легуючої складової шихти порошкового дроту проводили з урахуванням коефіцієнтів переходу легуючих елементів в наплавлений метал, враховуючи ступінь їх вигорання, які на підставі аналізу літературних джерел обрали $[Cr] = 0,92$; $[Ni] = 0,96$; $[Mn] = 0,67$; $[Nb] = 0,9$; $[Si] = 0,45$.

Для виготовлення дослідного порошкового самозахисного дроту обрано оболонку зі сталі 08кп. Вона найбільш широко використовується при виготовленні порошкових дротів, характеризується постійною наявністю в мережі збуту, порівняно низькою собівартістю та високою технологічністю при волочінні.

Розрахувавши кількісний склад легуючої складової та базовий склад шлакової системи, було виготовлено дослідний зразок дроту діаметром 2,8 мм. Подальша перетяжка дроту на менший діаметр не призводила до бажаного результату, так як дріт розривався через критичний коефіцієнт заповнення. Оскільки зварювання даним дротом можливе лише у нижньому положенні, даний варіант був відкинтий.

З метою зменшення діаметру дослідного дроту, було обрано стрічку-оболонку з високолегованої сталі X18H10T. Менший діаметр дроту досягається шляхом зменшення об'єму шихти за рахунок вмісту хрому та нікелю у складі металу стрічки-оболонки.

В процесі волочіння дослідного дроту через філь'єри відбувається деформаційне зміцнення оболонки (наклеп), що не дає можливості отримати щільний замок і викликає часткове висипання шихти з осердя дроту та виключає подальше його ущільнення.

Нагартування (наклепу) можливо було б позбутися шляхом проміжного відпалу, але це призводить до вигорання деяких газошлакоутворюючих компонентів, а отже даний варіант був також відкинтий.

Враховавши вищенаведене, було обрано стрічку-оболонку зі сталі феритного класу, що виключає будь-які фазові перетворення при холодній деформації. Феритна структура забезпечує високу пластичність, як в умовах металургійного переділу (гарячої прокатки), так і при холодній деформації в процесі волочіння порошкового дроту через філь'єри до заданого діаметру.

Таким чином, використовуючи стрічку-оболонку з високолегованої сталі феритного класу з невеликим додатковим легуванням, вдалося виготовити

дослідний порошковий дріт діаметром 1,6 мм, що забезпечує технологічну можливість зварювання в будь-якому просторовому положенні.

Даним порошковим дротом виконано наплавлення на повітрі та під водою на режимі $U_d = 32 \dots 34$ В, $I_{зв} = 180 \dots 200$ А, струм постійний, полярність - зворотна.

Аналіз зовнішнього вигляду наплавлень свідчив, що на відміну від зварювання на повітрі при мокрому підводному зварюванні вміст газшлакоутворюючих компонентів у кількості 8,0 мас.% не є достатнім. Поверхня шва нерівномірна та недостатньо вкрита шлаком, метал шва є перепаленим. Для отримання щільних званих швів із задовільним формуванням кількість газшлакоутворюючих компонентів повинна перевищувати 14 мас.%.

З метою отримання задовільного формування наплавленого металу, як однієї з головних умов забезпечення надійного зварного з'єднання, було досліджено вплив компонентів газшлакоутворюючої системи на формування наплавленого металу. Було виготовлено дослідну партію дротів зі змінними фторидною та карбонатною складовими. Оцінка результатів формування наплавленого металу показала, що використання комплексних композицій фторидної та карбонатної складових осердя дроту помітно покращує формування наплавленого металу.

Для оптимізації газшлакоутворюючої системи дослідного дроту обрано три трьохкомпонентні композиції з незмінними карбонатно-флюоритними складовими та змінними оксидними складовими на основі компонентів TiO_2 , SiO_2 та Al_2O_3 . Сумарна кількість компонентів даних газшлакоутворюючих систем в осерді дроту витримувалася постійною.

З метою дослідження зварювально-технологічних характеристик газшлакової системи порошкового дроту та охоплення всього діапазону можливих її складів використано математичний метод планування експерименту та обрано D-оптимальний план поліному 4-го порядку у трикомпонентній системі на симплексі.

Після вирішення рівнянь та обчислення даних за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення «Statistica» були побудовані діаграми «склад-властивість» для кожного з оцінюваних параметрів, а також була побудована сумарна діаграма, бали для якої розраховувалися за сумою показників, враховуючи наступні коефіцієнти вагомості: 1,0 - формування шва (валика); 0,9 - легкість відокремлення шлакової кірки; 0,7 - розбризкування.

Аналіз отриманих даних свідчить, що показники найкращих зварювально-технологічних характеристик забезпечуються дослідним дротом з газшлакоутворюючою системою на основі TiO_2 .

Виявлено, що шлакова система з вмістом SiO_2 , яка знижує температуру твердіння шлаку, практично не впливає на рівень зварювально-технологічних характеристик, тому вона, так само як і шлакова система з вмістом Al_2O_3 , показники якої є найгіршими, для подальших досліджень були відкинуті.

Згідно побудованій регресивній моделі область найкращих зварювально-технологічних характеристик при зварюванні на повітрі обмежена складом газшлакоутворюючої складової в межах: комплекс фторидів - 10...20 мас. %, комплекс карбонатів - 10...20 мас. % та TiO_2 - 65...75 мас. %, а при мокрому

підводному зварюванні: комплекс фторидів - 30...55 мас. %, комплекс карбонатів - 25...45 мас. % та TiO_2 - 20...30 мас. %, рис.1.

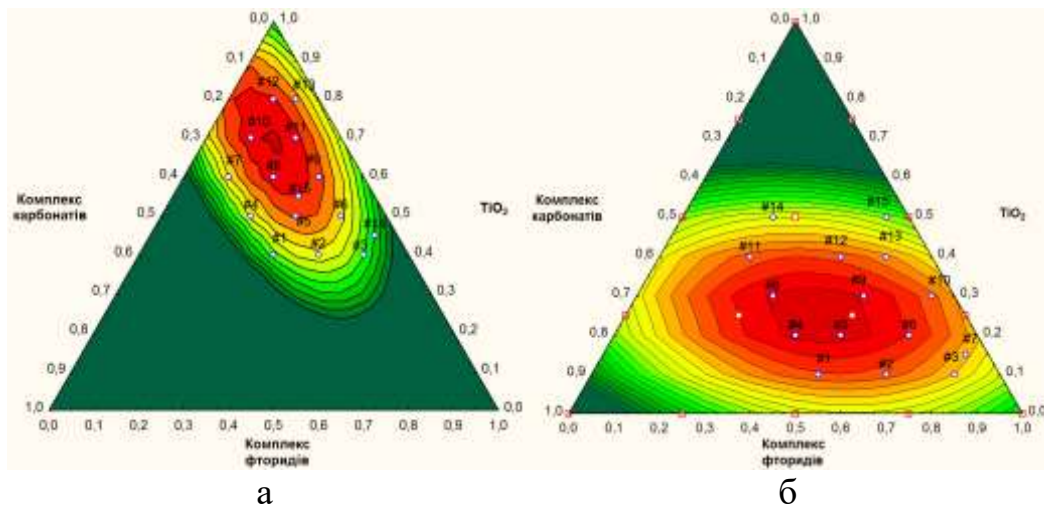


Рис. 1 – Сумарні кількісні показники ЗТХ при зварюванні дослідним дротом на повітрі (а) та при мокрому підводному зварюванні (б).

У четвертому розділі досліджено металургійні аспекти мокрого підводного зварювання сталі X18N10T при розробці порошкового самозахисного дроту.

Підводне зварювання характеризується високою концентрацією газів в металі зварного шва, що пояснюється великою кількістю водню та кисню в парогазовому пузирі, утворених внаслідок дисоціації води, високою швидкістю кристалізації зварювальної ванни та підвищеним тиском навколишнього середовища.

При зварюванні низьколегованих сталей перенасичення наплавленого металу воднем призводить до зварювальних дефектів і зниження механічних характеристик зварного шва, в той час як розчинність водню в аустенітному металі досить велика (55...60 см³/100 г) і його вміст перебуває, як правило, в межах розчинності.

При підводному зварюванні високолегованих корозійностійких сталей в першу чергу слід забезпечити надійний захист розплавленого металу від окислювального впливу навколишнього середовища.

Кисень, взаємодіючи з розплавленим металом, сприяє вигорянню високоактивних легуючих компонентів і може проявлятися в наплавленому металі зварного шва у вигляді оксидних включень, які негативно впливають на механічні характеристики зварного з'єднання, а також у вигляді дефектів, таких як пори.

Для отримання якісних багатошарових наплавлень без наявності грату, пор та із задовільним формуванням наплавленого металу, вміст кисню при мокрому підводному зварюванні повинен бути рівний вмісту кисню при зварюванні на повітрі.

Для визначення необхідно-допустимого рівня вмісту газів в наплавленому металі шва були виконані багатошарові наплавлення порошковим дротом базового складу з вмістом газозлакоутворюючих компонентів 8 мас.% в різних середовищах (аргон, повітря, вуглекислий газ, вода).

Результати досліджень показали, що вміст кисню при цьому склав: при зварюванні в аргоні – 0,026 мас.%, на повітрі – 0,052 мас.%, у вуглекислому газі – 0,071 мас.%, при підводному зварюванні 0,25 мас.%, рис.2.

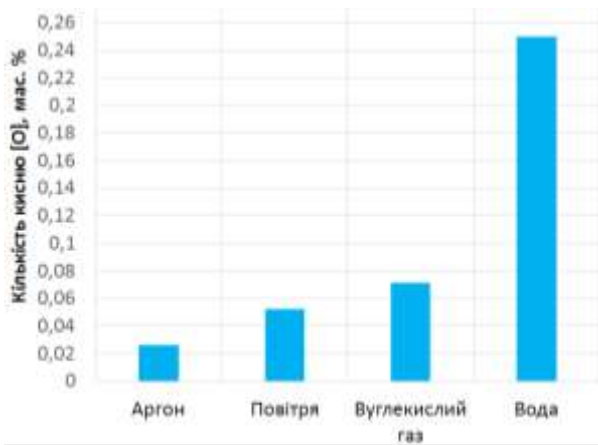


Рис. 2 – Вміст кисню в наплавленому металі отриманому при зварюванні в різних середовищах.

Поступове збільшення вмісту газозлакоутворюючих компонентів з 14 мас. % до 21 мас. % призвело до зменшення вмісту кисню в наплавленому металі шва з 0,18 мас. % до 0,14 мас.%. При цьому зовнішній вид наплавлень значно покращується, рис.3. Подальше збільшення не призводить до будь яких помітних змін та обмежене внутрішнім об'ємом порошкового дроту. Вміст водню в металі шва при мокрому підводному зварюванні не викликає утворення пор та зниження механічних характеристик, так як знаходиться в межах розчинності в аустенітному металі. Вміст азоту складає 0,03 мас.% і не залежить від виду та кількості газозлакоутворюючих компонентів шихти, а обумовлений лише його вмістом в оболонці, або в порожнинах між компонентами шихти порошкового дроту.

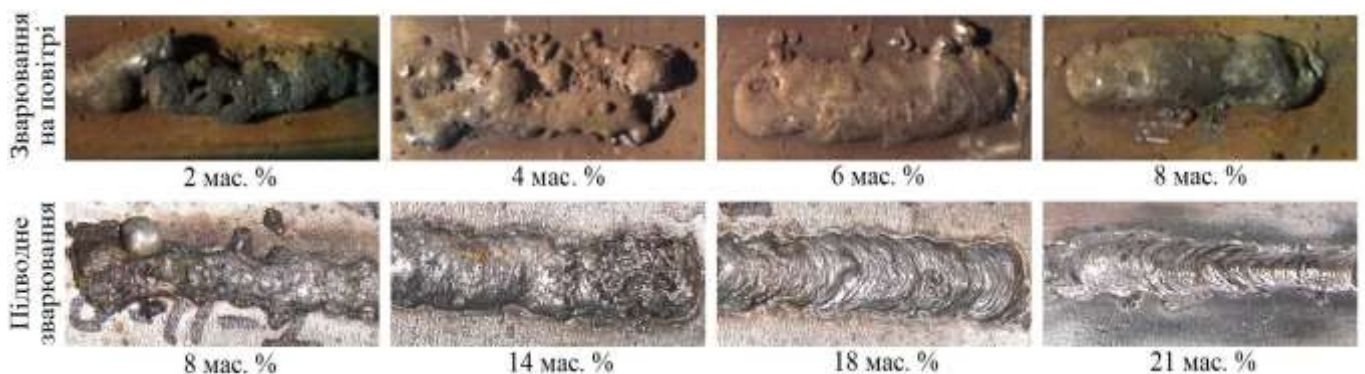


Рис. 3 – Зовнішній вигляд наплавлень, отриманих при підводному зварюванні та на повітрі дротами з різною кількістю газозлакоутворюючих компонентів.

Подальші дослідження зі зменшення вмісту кисню в наплавленому металі проведено шляхом додаткового введення розкислювачів з високою спорідненістю до кисню та високою розкислювальною здатністю. На основі літературних даних з числа елементів-розкислювачів було виключено титан, кальцій та магній, як елементи, які можуть утворювати гідриди і сприяти зв'язуванню водню в нерозчинні в металі сполуки та сприяти збільшенню його кількості в наплавленому металі. Слід відмітити, що в металі шва згідно вимогам ДСТУ EN ISO 3581:2019 та ГСТУ 3-020-2001 є присутніми біля 2 мас.% мангану та біля 1 мас.% кремнію. Таким чином, в якості розкислювачів обрали кремній, манган та алюміній.

Для визначення оптимального складу та вмісту елементів-розкислювачів в шихті порошкового дроту розраховано склад та виготовлено дослідні зразки з різним вмістом мангану, кремнію та алюмінію, рис.4.

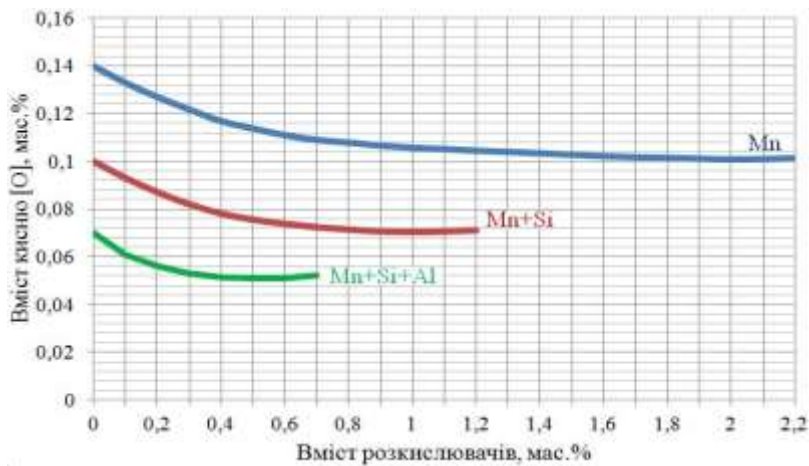


Рис.4 – Вміст кисню в наплавленому металі при підводному зварюванні дослідним дротом з вмістом елементів-розкислювачів.

Після газового аналізу 5-шарових наплавлень, виконаних при підводному зварюванні, визначено, що вміст кисню в наплавленому металі на рівні 0,05...0,055 мас. % досягається шляхом додавання в шихту порошкового дроту наступних елементів-розкислювачів в кількості: мангану - 1,9...2,0 мас. %, кремнію - 0,9...1,0 мас. %, алюмінію - 0,4...0,6 мас. %.

Основні складові пароговального пузиря (водень і кисень) чинять істотний вплив на стабільність процесу горіння дуги і перенесення електродного металу через дуговий проміжок. Кисень, як поверхнево-активний елемент, сприяє подрібненню крапель за рахунок зниження поверхневого натягу розплавленого металу. Тоді як водень, за рахунок значної теплопровідності і високого значення потенціалу іонізації, сприяє контрагуванню стовпа дуги і збільшенню електродинамічної сили, затримуючи краплю на торці електрода, тим самим збільшуючи її розміри і дестабілізуючи процес горіння дуги. Зменшення кількості водню в складі пароговального пузиря проходить за рахунок використання фторидних компонентів, зв'язуючи його в нерозчинні сполуки, такі як HF^- . Не дивлячись на позитивний вплив в боротьбі з воднем, необхідно враховувати, що фторидні шлакові системи характеризуються відносно низькою стабільністю процесу горіння дуги і великокрапельним характером переносу електродного металу. Тому, доцільно було провести дослідження щодо вибору фторидів та карбонатів, які чинять найменш негативний вплив на стабільність процесу горіння дуги.

Для порівняння дестабілізуючого впливу фторидів на процес горіння зварювальної дуги виготовлено ряд дослідних дротів зі змінною фторидною складовою. Зафіксовано показники стабільності процесу горіння дуги і характер переносу електродного металу. Аналіз побудованих гістограм та чисельних значень параметрів процесу (відносного коливання сили струму, напруги дуги та часу короткого замикання) та їх оцінка в балах свідчать, що фторидні компоненти в міру підвищення дестабілізуючого впливу можна вистроїти в наступній послідовності: комплекс фторидів > MgF_2 > CaF_2 > BaF_2 > NaF > Na_2SiF_6 > Na_3AlF_6 .

З метою виявлення найменш дестабілізуючої карбонатної складової шихти дослідного дроту, проведено дослідження стабільності процесу горіння дуги при підводному зварюванні дослідними дротами з вмістом різних карбонатів в складі газшлакоутворюючої системи. Аналіз осцилограм процесу зварювання, вольт-амперних характеристик, гістограм напруги дуги та зварювального струму, а також

чисельних значень параметрів процесу надають можливість вибудувати карбонати у наступний «якісний» ряд: $\text{FeCO}_3 < \text{CaCO}_3 < \text{Na}_2\text{CO}_3 < \text{Комплекс карбонатів}$.

Отримані результати досліджень показали, що стабільність процесу горіння дуги є порівняно найвищою при використанні комплексних композицій карбонатної та фторидної складових в шихті порошкових дротів. Однак, дане рішення не дозволяє підвищити існуючий рівень стабільності процесу горіння дуги дослідного дроту, оскільки комплексні композиції вже використовуються в базовій шлаковій системі на основі результатів досліджень формування металу шва.

Відомо, що введення в плазму дуги легкоіонізуючих хімічних з'єднань лужних, лужноземельних та рідкоземельних металів, які мають низький потенціал іонізації та низьку роботу виходу електронів, в значній мірі підвищують стабільність процесу горіння дуги. Тому проведено дослідження по введенню в шихту порошкового дроту компонентів-стабілізаторів, в тому числі комплексних.

В якості компонентів, що вводилися в базовий склад шлакової системи порошкового дроту, були обрані: фрита - спеціально виплавлена стабілізуюча добавка на основі лужних і лужноземельних з'єднань (Li, Na, K, Ca), воластоніт $\text{Ca}_3(\text{Si}_3\text{O}_9)$ та кріоліт $(\text{Na}_3\text{AlF}_6)$. Найбільш наочно результати досліджень демонструють гістограми напруги дуги і вольтамперні характеристики процесу мокрого підводного зварювання, рис. 5...7.

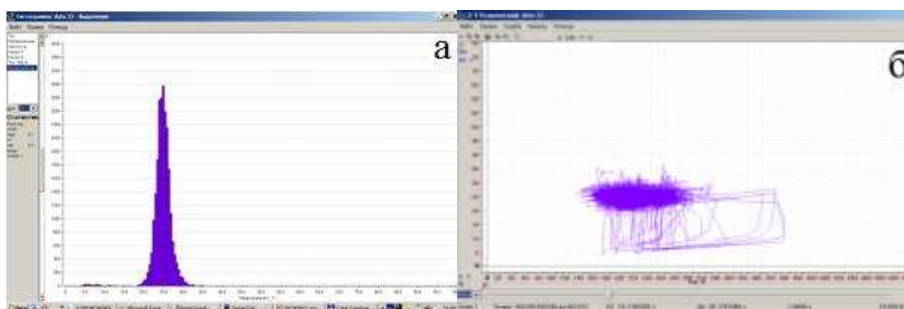


Рис. 5 – Гістограма напруги дуги (а) і вольтамперна характеристика процесу підводного зварювання (б) дротом з вмістом фрити.

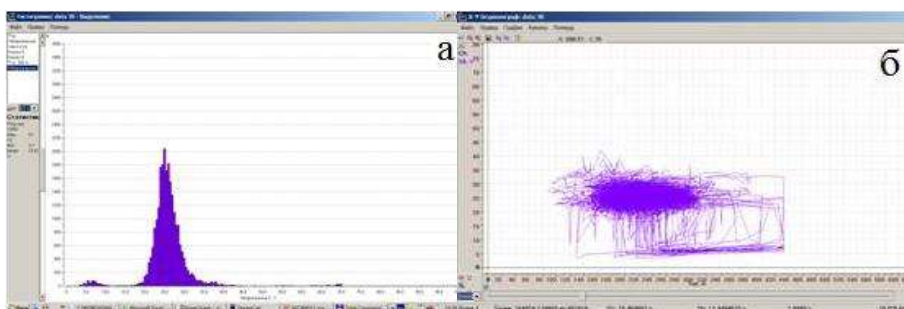


Рис. 6 – Гістограма напруги дуги (а) і вольтамперна характеристика процесу підводного зварювання (б) дротом з вмістом воластоніта.

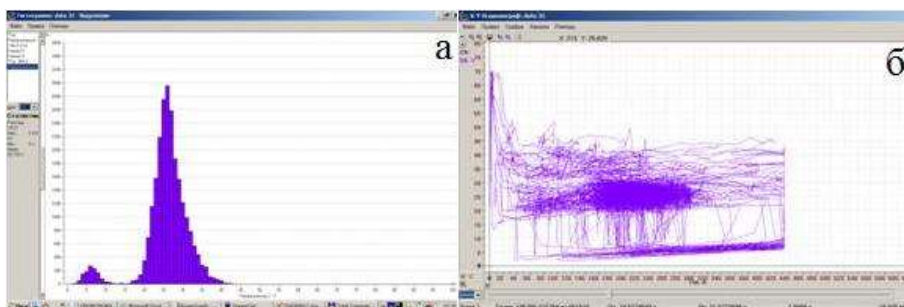


Рис. 7 – Гістограма напруги дуги (а) і вольтамперна характеристика процесу підводного зварювання (б) дротом з вмістом кріоліту.

Отримані дані свідчать, що застосування в якості стабілізуючої добавки фрити дозволяє в найбільшій мірі знизити відносно коливання сили струму і напруги дуги, отримати дрібнокрапельний перенос металу, поліпшити стабільність процесу

горіння дуги і вести процес мокрого підводного зварювання самозахисним порошковим дротом практично без коротких замикань.

Слід відмітити, що значна кількість оксидів лужних і лужноземельних елементів, які потрапляли в плазму дуги, підвищують стабільність процесу горіння дуги при мокрому підводному зварюванні, а також сприяють оптимізації шлаку за фізико-хімічними характеристиками. Про це свідчить те, що при виконанні багат шарових наплавлень порошковим дротом при мокрому підводному зварюванні відзначене легке відділення шлакової кірки, що в свою чергу сприяло отриманню багат шарових наплавлень без зашлакувань.

У п'ятому розділі наведено оцінку службових характеристик металу зварного з'єднання, отриманого при мокрому підводному зварюванні високолегованих корозійностійких хромонікелевих сталей дослідним дротом, відпрацьована технологія та техніка зварювання, вибрано обладнання та оптимізовано режими зварювання, розроблена необхідна нормативна документація.

Вибір зварювального джерела живлення для дослідного дроту оптимального складу полягав в дослідженні впливу характеристик роботи комплексу напівавтомат/джерело живлення на показники стабільності плавлення порошкового дроту і його зварювально-технологічні властивості при зварюванні під водою. З використанням зварювальних джерел: ВДУ-500, ПСГ-500, АСУМ-400 та ВДУЧ-500 дослідним дротом виконані наплавлення при мінімальному і максимальному значеннях струму та низькому, середньому і високому значеннях напруги дуги. Відповідно до отриманих результатів і оцінки стабільності процесу горіння дуги та зовнішнього вигляду наплавлень визначено, що для мокрого підводного зварювання дослідним самозахисним порошковим дротом високолегованих корозійностійких хромонікелевих сталей типу 18-10 доцільно використовувати інверторний випрямляч дуговий універсальний ВДУЧ-500.

З метою визначення хімічного складу металу шва та проведення порівняльного аналізу зразків, отриманих при підводному зварюванні та на повітрі, виконано 5-шарові наплавлення на сталь 12Х18Н10Т товщиною 12 мм розробленим порошковим дротом. З отриманих даних видно, що хімічний склад наплавленого металу відповідає вимогам ДСТУ EN ISO 3581:2019 та ГСТУ 3-020-2001, табл. 1.

Таблиця 1. Хімічний склад наплавленого металу отриманого дослідним дротом.

Середовище зварювання	Масова частка, %							
	C	Cr	Ni	Nb	Si	Mn	S	P
Вода	0,05	20,81	9,5	0,48	0,82	1,98	0,006	0,003
Повітря	0,06	21,83	9,5	0,59	0,95	2,10	0,009	0,005
ДСТУ EN ISO 3581:2019	0,05... 0,12	18,00... 22,00	8,00... 10,50	0,70... 1,30	< 1,3	1,00... 2,50	< 0,020	< 0,030

При мокрому підводному зварюванні в значній мірі вигоряють легуючі елементи, такі як хром, кремній та ніобій, а також вуглець, сірка та фосфор. Пониження вмісту феритоутворюючих елементів (Cr, Si та Nb) призводить до зменшення феритної фази у складі металу шва, але отриманого рівня у 10...12% достатньо для попередження негативного впливу на технологічну міцність (стійкість

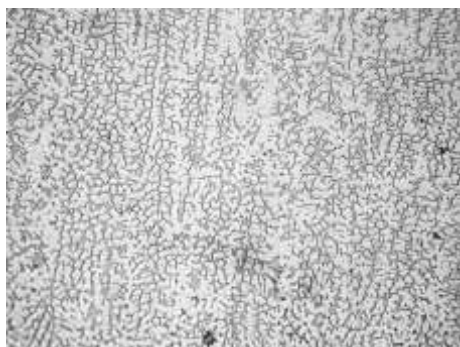
проти утворення гарячих тріщин). Отриманий дослідним дротом наплавлений метал шва типу 08X20H9Г2Б має високі значення міцності та пластичності, які в повній мірі відповідають вимогам ДСТУ EN ISO 3581:2019 та ГСТУ 3-020-2001 та знаходяться на рівні характеристик металу, наплавленого, наприклад, електродами марки ЦЛ-11 ($\sigma_B \geq 550$ МПа; $\delta \geq 22$ %; $a_n \geq 80$ Дж/см²), табл.2.

Таблиця 2. Механічні властивості металу шва.

Марка порошкового дроту	Границя текучості $\sigma_{0,2}$, МПа	Границя міцності σ_B , МПа	Відносне видовження δ , %	Відносне звуження Ψ , %	Ударна в'язкість a_n , Дж/см ²
ПП-АНВ-25	350,8	623,3	25,7	28,7	90,3

Мікроструктура основного металу як і мікроструктура у верхній частині зварного шва дослідних зразків складається з аустенітної матриці та δ -фериту. Структура у верхній частини зварних швів, виконаних при зварюванні на повітрі, являє собою стовбчасті кристаліти, кожен з яких складається з великої кількості однаково орієнтованих комірок, рис.8 (а). В корні зварного шва кристаліти збільшуються. В посиленні зварних швів переважає коміркова форма кристалізації (середній розмір комірки 25 мкм).

У верхній частині зварних швів, виконаних під водою, структура являє собою стовбчасті кристаліти, оточені вздовж границь аустенітними прошарками завширшки приблизно 5...15 мкм. В тілі кристалітів комірки орієнтовані під деяким кутом одна до одної, утворюючи своєрідні границі зрощення, рис.8 (б). В посиленні швів переважає коміркова форма кристалітів також з оточеними вздовж границь аустенітними прошарками (середній розмір комірки приблизно 80 мкм).



а



б

Рис. 8 – Мікроструктура металу зварного шва при зварюванні на повітрі (а) та при мокрому підводному зварюванні (б), х 200.

Отримані значення мікротвердості свідчать, що при зварюванні під водою та на повітрі мікротвердість у верхній частині металу зварного шва практично не змінюється, тоді як твердість в нижній частині зварного шва та в шарі, збагаченому δ -феритом, підвищується, що характерно для усіх дослідних зразків. Виразної границі між зоною термічного впливу і основним металом не спостерігається. На полірованій поверхні зразків, виконаних при зварюванні на повітрі, у верхній частині зварного шва спостерігаються рівномірно розташовані маленькі оксиди, в тому числі SiO_2 . Об'ємна частка неметалевих включень при зварюванні на повітрі – 0,010%.

В зразках, виконаних при зварюванні під водою, виявлені включення такого самого складу, як і у зразках, виконаних при зварюванні на повітрі, але розмір їх більший. Об'ємна частка неметалевих включень – 0,011%.

В основному металі спостерігаються оксиди, нітриди (поодинокі та скупчення), а також поодинокі включення геометричної форми з гострими кутами, схожі на крихкі силікати, або ж корунди. Порівняльні металографічні дослідження мікроструктури металу шва при мокрому підводному зварюванні та при зварюванні на повітрі свідчать, що у першому випадку спостерігається подрібнення зерна, особливо в поверхневих шарах, прилеглих до води. Тобто бал зерна, отриманий при підводному зварюванні, менший від отриманого на повітрі, що частково пояснюється охолоджуючою дією водного середовища.

Рекомендовані режими зварювання дослідним порошковим дротом обираються в залежності від товщини металу, що підлягає зварюванню, та просторового положення зварювання виходячи з умов отримання зварних швів з гарним формуванням. Струм - постійний, полярність – зворотна, ВАХ – жорстка.

Кут нахилу крайок повинен складати приблизно 35...45°. Зазор між пластинами, що зварюються - до 2 мм. Зварювання кореневого проходу, який за розмірами не перевищує 1,8 мм, слід виконувати нитковим зварним швом, а більшого – з поперечними коливаннями на 0,5...1 мм відносно осі зварного шва. Наступні проходи виконуються з поперечними коливаннями кінця електроду із затримкою в крайніх положеннях. Для зварювання кореневого проходу слід використовувати зварювальний дріт діаметром 1,6 мм при $I = 190...260$ А, $U = 27...28$ В, для інших – 1,6...2,0 мм при $I = 220...280$ А, $U = 29...32$ В, рис. 9. Для вертикального та стельового положення зварювання слід використовувати дріт діаметром 1,6...1,8 мм при $I = 160...230$ А, $U = 26...29$ В.

Швидкість зварювання в усіх випадках обирається водолазом-зварником таким чином, щоб розплавлений шлак не підтікав під зварювальну дугу. Потрапляння зварюваної дуги на шлакову кірку може призвести до утворення шлакових включень та до непровару кореня шва, що не допускається.



Рис. 9 – Зовнішній вигляд зразків при мокрому підводному зварюванні дослідним самозахисним порошковим дротом.

В зв'язку з високими показниками корозійної стійкості застосування дослідного порошкового дроту можливе і при виконанні зварювальних робіт на об'єктах нафтохімічної галузі, хімічного машинобудування, атомної енергетики та інших схожих галузях промисловості.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Встановлено, що для забезпечення технологічної можливості виготовлення дроту діаметром 1,6 мм, який забезпечує тип наплавленого металу 08X20H9Г2Б, необхідно використовувати стрічку-оболонку зі сталі феритного класу. Використання для матеріалу стрічки-оболонки сталі X18H10T призводить до наклепу, а використання сталі 08кп – до збільшення діаметру дроту.

2. Встановлено, що на відміну від зварювання на повітрі, при мокрому підводному зварюванні використання базового складу газошлакоутворюючої системи у кількості 8 мас. % є недостатньою і не дозволяє отримати щільні зварні шви. Підвищення кількості газошлакоутворюючих компонентів до 14 мас. % забезпечує мінімально задовільний рівень якості формування зварного шва.

3. Встановлено, що застосування в якості складових газошлакоутворюючої системи дослідного дроту комплексних композицій фторидів та карбонатів найбільше покращує показники якості формування наплавленого металу.

4. Отримані дані свідчать, що області складів шлакових систем порошкових дротів з найкращими ЗТХ, як при зварюванні на повітрі так і при підводному зварюванні, прилягають до сторони комплекс фторидів/ TiO_2 потрійної діаграми. Збільшення кількості третього компоненту (комплекс карбонатів) розширює цю область, але рівень зварювально-технологічних властивостей не підвищує. Шлакова система на базі SiO_2 знижує температуру твердіння шлаку, але практично не впливає на рівень зварювально-технологічних характеристик.

5. Встановлено, що отримання якісних багатошарових наплавлень із задовільним формуванням наплавленого шва при мокрому підводному зварюванні без наявності ґрату та пор досягається обмеженням вмісту кисню на рівні 0,050...0,055 мас. %, що забезпечується підвищенням вмісту газошлакоутворюючих компонентів в осерді порошкового дроту до рівня 20,0...21,0 мас. % та додаванням композиції розкислювачів.

6. Визначено, що дестабілізуючий вплив фторидів обернено пропорційний їх термічній стійкості. Найменш дестабілізуючими процес горіння дуги фторидами та карбонатами є комплексні композиції карбонатної та фторидної складових, як при мокрому підводному зварюванні високолегованих корозійностійких сталей, так і при зварюванні на повітрі. Визначено, що для компенсування впливу водного середовища та підвищення стабільності горіння дуги при мокрому підводному зварюванні напругу на дузі необхідно підвищувати на 4...6 В у порівнянні з напругою при зварюванні на повітрі.

7. Введення фрити до складу дослідного дроту забезпечує дрібнокрапельний перенос електродного металу і відсутність коротких замикань, позитивно позначається на підвищенні стабільності процесу горіння дуги, зменшуючи величину коливань зварювального струму і напруги дуги, крім того покращує фізико-хімічні властивості шлаку полегшуючи відокремлення шлакової кірки.

8. Бал зерна, отриманий при мокрому підводному зварюванні, приблизно на 2 одиниці менший від величини балу зерна, отриманого при зварюванні на

повітрі. Кількість неметалевих включень в металі шва при мокрому підводному зварюванні більша від кількості, отриманої на повітрі, але вони розподілені рівномірно по тілу зерна і є дисперсними, що не погіршує показники пластичних характеристик та ударної в'язкості металу шва нижче необхідних значень, регламентованих стандартами. Хімічний склад та механічні характеристики наплавленого металу шва при мокрому підводному зварюванні досліджуваної сталі в повній мірі відповідають вимогам ДСТУ EN ISO 3581:2019 та класу «В» стандарту з підводного зварювання ANSI / AWS D 3.6 – 2017.

НАУКОВІ ПРАЦІ, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. **Н. Ю. Каховский**, С. Ю. Максимов, Г. В. Фадеева. Подводная сварка элементов АЭС из высоколегированных коррозионностойких сталей типа 18-10 самозащитной порошковой проволокой. *Науково-технічний журнал «Ядерна та радіаційна безпека»*. Київ. 2014. №4(64). С. 41-45. [Scopus]
2. **М. Yu. Kakhovskyi**. Innovative technique for mechanized underwater welding of high-alloy corrosion-resistant steel. *Academic and Research Journal «Science and Innovation»*. Kyiv. 2015. Vol. 11 (4). P. 23-29. [Scopus]
3. **М. Ю. Каховський**. Вплив водного середовища на газонасиченість металу зварного шва під час підводного зварювання сталі 12X18H10T. *Міжнародний науково-технічний журнал «Фізико-хімічна механіка матеріалів»*. Львів. 2015. №6 (Том 51). С. 83-86. [Scopus]
4. **М. Kakhovskyi**. Influence of aqueous media on the gas saturation of weld metal in the course of underwater welding of 12KH18N10T steel. *Materials Science*. New-York, USA. 2016. №51(6). P. 843-846. [Scopus]
5. K.A. Yushchenko, A.V. Bulat, **N.Yu. Kakhovskyi**, V.I. Samojlenko, S.Yu. Maksimov, S.G. Grigorenko. Investigation of composition and structure of weld metal of Kh20N9G2B type made in wet underwater welding. *International Scientific-Technical and Production Journal «The Paton Welding Journal»*. Kyiv. 2014. № 6-7. P. 135-138.
6. **Н. Ю. Каховский**, С. Ю. Максимов, Г. В. Фадеева. Сварочно-ремонтные работы на АЭС с применением технологии механизированной подводной сварки высоколегированных коррозионностойких сталей типа 18-10. *Науково-технічний збірник «Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля»*. Чорнобиль. 2014. №23. С. 26–31.
7. **Н. Ю. Каховский**, С. Ю. Максимов. Исследование влияния компоненто-стабилизаторов шихты порошковой проволоки на ее сварочно-технологические свойства при подводной сварке. *Збірник наукових праць «Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки»*. Маріуполь. 2014. Випуск 29. С. 128-133.
8. Yu. Kakhovskyi, **М. Kakhovskyi**. Development of welding consumables for wet underwater welding of high-alloy corrosion-resistant steel. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. Lviv. 2015. №1(Vol.1). С. 83-89.
9. K. A. Yushchenko, S. Yu. Maksimov, **М. Yu. Kakhovskyi**, G. V. Fadeeva, S. A. Suprun. Welding of stainless steels under water. *Unterrassertechnik 2011: Vorträge*

der Sondertagung im Rahmen von DVS Congress und DVS Expo. Hamburg, Deutschland. 2011. 28 September. P. 28-31.

10. **М. Ю. Каховський.** Самозахисний порошковий дріт для мокрого підводного зварювання високолегованої корозійностійкої хромонікелевої сталі типу 18-10. *Матеріали VIII міжнародної конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології».* Київ. 2015. 20-22 травня. С. 51.

11. S. Yu. Maksimov, **N. Yu. Kakhovsky**, I. V. Lendel. Wet underwater welding in the extreme conditions. *Document IIW: Doc. XII-2288-16.* Melbourne, Australia. 11-13 July. 2016.

12. **М. Kakhovskyi.** Automation of process of wet underwater welding of highly-alloyed corrosion-resistant chromium-nickel steel Cr18Ni10Ti. *Proceedings of 9th international conference of young scientists «Welding and Related Technologies (WRTYS-2017)».* Kyiv. 2017. 23-26 May. P. 21-24.

13. **М. Yu. Kakhovskyi**, A. S. Ievdokymenko. Influence of grade of nickel powder on gas saturation of deposited metal. *Proceedings of the international research and practical conference «The development of technical sciences: Problems and solutions».* Brno, Czech Republic. 2018. 27-28 April. P. 1-3.

14. **М. Kakhovskyi**, Y. Kakhovskyi. Welding-technological properties of slag systems of flux-cored wire. *Proceedings of the International scientific conference «Modern global trends in the development of innovative scientific researches».* Riga, Latvia. 2020. 20 March. P. 124-125.

АНОТАЦІЯ

Каховський М. Ю. Самозахисний порошковий дріт для підводного зварювання високолегованих хромонікелевих сталей типу 18-10. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології». – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, 2021.

При проведенні ремонтних робіт трубопроводів і обладнання морських нафтогазових родовищ, ремонті басейнів для зберігання відпрацьованого ядерного палива на атомних електростанціях, або інших елементів металокопункцій, виготовлених з високолегованих корозійностійких хромонікелевих сталей працюючих у водному середовищі, застосовують дугове підводне зварювання. Дисертаційна робота присвячена розробці самозахисного порошкового дроту для механізованого та автоматизованого мокрого підводного зварювання даних сталей.

Досліджено фізико-металургійні особливості впливу водного середовища при мокрому підводному зварюванні сталі X18Ni10T на взаємодію присадкового металу з газами, ступінь окислення легуючих елементів, стабільність процесу горіння дуги, а також імовірність утворення гарячих тріщин та пор в металі шва.

За допомогою математичного методу планування експерименту оптимізовано газошлакоутворюючу систему осердя порошкового дроту та визначено необхідну кількість і тип газошлакоутворюючих компонентів і розкислювачів.

Визначено головні чинники дестабілізуючого впливу водного середовища та досліджено методи підвищення стабільності процесу горіння дуги шляхом введення в склад осердя дроту стабілізуючих компонентів.

Перевагами розробленого порошкового самозахисного дроту над існуючою технологією ручного дугового підводного зварювання є збільшена продуктивність виконання ремонтних робіт, забезпечення економічного ефекту від меншого простою виробничого циклу АЕС, менший контакт водолазів-зварників і персоналу з радіоактивним середовищем та можливість за рахунок подальшої автоматизації процесу повного виключення перебування людини в особливо небезпечних умовах.

Ключові слова: високолегована корозійностійка сталь, мокре підводне механізоване зварювання, порошковий самозахисний дріт, система легування, газшлакоутворююча система, формування зварного шва, зварювально-технологічні властивості, газонасиченість наплавленого металу, механічні властивості.

ABSTRACT

Kakhovskyi M. Y. Self-shielding flux-cored wire for underwater welding of high-alloy chromium-nickel steels type 18-10. – Manuscript.

Thesis for scientific degree of philosophy doctor on specialty 05.03.06 «Welding and related processes and technologies». – Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv, 2021.

Arc underwater welding is widely used in the repair of pipelines and equipment of offshore oil and gas fields and the repair of spent nuclear fuel storage pools at nuclear power plants or other elements made of high-alloy corrosion-resistant chromium-nickel steels. The thesis is devoted to the development of self-shielded flux-cored wire for mechanized and automated wet underwater welding of these steels.

Physics-metallurgical features of the influence of the water environment during wet underwater welding of steel Cr18Ni10Ti on the interaction of filler metal with gases, the degree of oxidation of alloying elements, the stability of the arc combustion process, as well as the probability of hot cracks and pores in the weld metal.

Using the mathematical method of experiment planning, the slag system of the powder wire core and the required number of gas-slag-forming components and deoxidizers were determined and optimized.

The main factors of destabilizing influence of the aquatic environment are determined and the methods of increasing the stability of the arc combustion process by adding stabilizing components into the core of the wire are investigated.

The advantages of the developed self-protective flux-cored wire over the existing manual arc underwater welding technology are the increased productivity of repair works, providing economic effect from shorter downtime of the NPP production cycle, shorter contact of divers-welders and personnel with radioactive environment and capabilities for further automation to exclude human participation in works under dangerous conditions.

Key words: high-alloy corrosion-resistant steel, wet mechanized arc welding, self-shielding flux-cored wire, alloying system, gas- and slag-forming system, weld formation, welding and technological properties, gas saturation of deposited metal, mechanical properties.

Підписано до друку 15.03.2021 р. Формат 60×84/16. Пап. офс. №1. Офс. друк.
Ум. друк. арк. 0,7. Ум. фарбо-відб. 0.9. Тираж 100 прим. Зам. № 385
ПОД ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України, 03150, Київ-150, МПС, вул. Антоновича, 69