

АВТОМАТИЧНЕ ДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ТА ВІДНОВЛЮВАЛЬНОМУ РЕМОНТІ ТРУБНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СПІРАЛЕЙ ПВТ ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС

Л.М. Лобанов¹, Н.М. Махлін², В.Є. Попов², Д.С. Оліяненко², О.В. Ковалюк^{3*}

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

²ДП «НІЦ ЗКАЕ ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України». 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: electro@paton.kiev.ua

³ВП «Атоменергомаш» ДП «НАЕК «Енергоатом». 71503, м. Егоргодар, вул. Промислова, 52, п/с 306.

E-mail: office@aem.zp.ua

В роботі розглянута можливість застосування для отримання зварних з'єднань трубних елементів спіралей високого тиску підігрівачів високого тиску автоматичного орбітального зварювання неплавким електродом у середовищі гелію або за допомогою плазмового зварювання методами автоопресування або послідовного проплавлення. Наведено результати відпрацювання цієї технології й оптимальні режими виконання неповоротних зварних з'єднань трубних елементів спіралей підігрівачів високого тиску енергоблоків АЕС. Представлено опис технічних пропозицій щодо створення вітчизняного зварювального обладнання для реалізації запропонованої технології. Показано, що застосування розробленої технології з використанням вітчизняного обладнання дозволяє значно підвищити продуктивність праці при виконанні зварних з'єднань трубних елементів спіралей підігрівачів високого тиску та суттєво підвищити їх якість. Бібліогр. 13, рис. 3.

Ключові слова: підігрівачі високого тиску, спіралі підігрівачів високого тиску, автоматичне орбітальне зварювання, неплавкий електрод, автоопресування або послідовне проплавлення, стиснена дуга, гелієдугове або плазмове зварювання, неповоротні стики трубопроводів, плазмотрон

Трубопроводи (у тому числі високого тиску) енергоблоків АЕС з легководними реакторами ВВЕР, як і з реакторами з киплячою водою, експлуатуються, як правило, в умовах одночасного впливу на них високих температур, підвищеного тиску, значних мас води і/або водяної пари, а також прониклої радіації. До трубопроводів високого тиску можна віднести й трубні конструкції спіралей підігрівачів високого тиску (ПВТ) – важливих, принципово необхідних та відповідальних елементів другої контуру енергоблоків АЕС. Живильна вода, яка під тиском надходить до спіралей ПВТ, підігрівається до необхідної температури, після чого ця вода надходить до теплообміннику – парогенератору (ПГ), де вона перетворюється у пару, яка подається на турбіну, що приводить у дію електрогенератори енергоблоку АЕС [1–3]. Характерними особливостями спіралей ПВТ є наявність зварних з'єднань трубних елементів спіралей, а також параметри середовища – живильної води, яка подається за номінального тиску 12,0 МПа (120 кгс/см²) у спіраль, де ця вода нагрівається до температури 235 °С, внаслідок чого у процесі експлуатації ПВТ зварні з'єднання їх спіралей зазнають корозійно-ерозійного зношення. Тому проектування, виготовлення та віднов-

лювальний ремонт спіралей ПВТ мають свою специфіку [3, 4], яка визначає технічні вимоги до матеріалу, конструкції та зварних з'єднань ПВТ. Існують одно- та двошпальні конструкції спіралей ПВТ, проте найбільше розповсюдження отримали одношпальні спіралі.

Конструктивно спіраль ПВТ складається з трьох трубних елементів, з'єднаних між собою двома зварними стиковими швами. Заготівками для цих елементів слугують довгомірні відрізки труби з номінальним діаметром 32 мм та номінальною товщиною стінки 4,0 мм з вуглецевої сталі 20. Довжина одного з прямих відрізків («центрального»), які використовуються у якості заготовок для трубних елементів спіралей ПВТ, складає 7000 мм, двох інших прямих відрізків – 5980 і 5403 мм відповідно, при цьому «центрального» відрізка має дільницю з S-подібним вигином, який, згідно з КД, виконується до зварювання, що приводить до різних просторових положень повздовжніх осей різних дільниць цього відрізка. Усі згадані вище відрізки з боку своїх торців мають V-подібне розкриття 1-24-1 (С-24-1), яке утворюється за допомогою попередньої верстатної обробки. Після виконання зварних з'єднань трубних елементів, їх термооброб-

*У дослідженнях та підготовці цієї роботи активну участь взяли А.М. Жерносков, О.Є. Коротинський, Л.І. Ниркова (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України), В.Є. Водолазський, В.Ю. Буряк, Л.П. Муценко (НІЦ ЗКАЕ), М.І. Скопюк (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України), С.І. Лавров, О.О. Кириленко та В.Г. Курнішов (ВП «Атоменергомаш»).

Л.М. Лобанов – <http://orcid.org/0000-0001-9296-2335>

© Л.М. Лобанов, Н.М. Махлін, В.Є. Попов, Д.С. Оліяненко, О.В. Ковалюк, 2020

ки та неруйнівного контролю з отриманої таким чином трубної конструкції за допомогою спеціальної приспособи формують власне спіральну конструкцію. До прямих вхідної та вихідної ділянок цієї конструкції приварюють хвостовики й здійснюють термообробку та неруйнівний контроль її зварних з'єднань.

Дотепер при виготовленні та відтворювальному ремонті спіралей ПВТ навіть у заводських умовах для виконання зварних з'єднань цих спіралей у вітчизняній практиці використовують виключно способи ручного багатопрхідного аргонодугового зварювання (TIG) з подачею присадного дроту, основними проблемами яких є недостатня продуктивність цих технологічних процесів, неможливість підтримування стабільності якості зварних з'єднань через її залежність від «людського» чиннику, необхідність підготовки та залучення досвідчених висококваліфікованих зварників. Тому забезпечення зростання продуктивності зварювання та стабільності якості зварних з'єднань спіралей ПВТ при їх виготовленні та відтворюючому ремонті на вітчизняних підприємствах шляхом застосування автоматичного або механізованого зварювання представляє собою актуальну науково-технічну задачу.

Для рішення цієї задачі раніше досліджувались та аналізувались можливості застосування різних способів дугового зварювання, у тому числі автоматичного орбітального зварювання неплавким електродом у середовищі аргону (GTAW), ручного та автоматичного орбітального зварювання неплавким електродом у середовищі аргону з активуючими флюсами (ATIG та GTAW-A відповідно) та механізованого (автоматичного) зварювання плавким електродом у середовищі суміші захисних газів [4]. При проведенні цих досліджень враховувалось, що згідно з Правилами та Нормами у атомній енергетиці (ПН АЕ) й іншими нормативними документами в Україні, зварні з'єднання трубних елементів спіралей ПВТ у стані прямих відрізків труб з номінальним діаметром 32 мм, номінальною товщиною стінки 4,0 мм та розкриттям крайок 1-24-1 (С-24-1) зі сталі 20 мають виконуватись з повним (100 %-м) проваром з граничним підсиленням $(2,0 \pm 1,0)$ мм та опуклістю кореневого зварного шву не більше 1,5 мм або його вгнутістю, яка не перевищує 0,6 мм. При цьому зміщення крайок трубних елементів спіралей ПВТ має бути не більше 0,4 мм, а зварні з'єднання цих трубних елементів можуть бути віднесені до категорії III (підкатегорія IIIc) по ПН АЕ Г-7-010-89. У відповідності до результатів проведених раніше досліджень експериментально встановлена принципова неможливість досягнути за допомогою автоматичного орбітального аргонодугового зва-

рювання неплавким електродом (GTAW) потрібної стабільної якості зварних з'єднань спіралей ПВТ та їх 100 %-го провару розробленими ще у 1970–1980 рр. у Науково-дослідницькому та конструкторському інституті монтажних технологій (НИКИМТ) методами автоопресування або послідовного проплавлення [5, 6]. Скоріше за все, це пояснюється тим, що, по-перше, сталі перлітного класу (до яких належить і сталь 20) у порівнянні зі сталями аустенітного класу характеризуються значно більш низьким коефіцієнтом лінійного розширення та суттєво більш високою теплопровідністю, що унеможливує забезпечення достатніх стискуючих зусиль для необхідних термопластичних деформацій. По-друге, номінальна товщина стінки трубопроводу спіралі ПВТ становить 4,0 мм, а відношення товщини стінки S до номінального зовнішнього діаметру трубопроводу $D_{\text{тр}}$ складає всього 0,125, тобто близьке до нижньої межі застосовності GTAW методами автоопресування або послідовного проплавлення [5, 6]. Також було встановлено, що найефективнішим способом отримання зварних з'єднань спіралей ПВТ, як і інших трубопроводів високого тиску енергоблоків АЕС, є механізоване багатопрхідне дугове зварювання плавким електродом у середовищі суміші захисних газів (при цьому встановлено, що для одержання якісних з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ достатньо двох зварювальних проходів) [4]. Проте слід зазначити, що запропонована технологія може бути здійснена тільки у випадку нерухомого пальника, поворотних стиків виробів, які зварюються, та інноваційного технологічного обладнання.

Згідно з вимогами чинної КД на ПВТ, зварні з'єднання трубних елементів їх спіралей підлягають 100 %-му неруйнівному та вибірково-руйнівному контролю. Серед неруйнівних методів контролю передбачається застосування візуально-інструментального контролю (ВІК) та радіографічного контролю (РГК) [7]. При вибірково-руйнівному контролі зварних з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ згідно відповідним вимогам чинної виробничо-технічної документації (ВТД) та КД на ці вироби, здійснюється перевірка хімічного складу металу зварного шву та визначення механічних властивостей зварних з'єднань, а також виконуються металографічні дослідження.

Виходячи з цього, при проведенні експериментальних та технологічних досліджень застосовувались саме такі неруйнівні та руйнівні методи контролю, при цьому для виконання контролю методами ВІК і РГК, металографічних досліджень, механічних випробувань та визначення хімічного складу металу шву й зони термічного впливу залучався персонал відділу головного зварника та

служби контролю металів ВП «Атоменергомаш» ДП «НАЕК «Енергоатом», а також атестовані стандартні засоби контролю, які вони мають.

Аналіз запропонованих раніше технічних рішень та практика переконливо довели, що здійснення механізованого дугового зварювання плавким електродом у середовищі суміші захисних газів поворотних зварних з'єднань спіралей ПВТ – досить складна й у переважній більшості випадків задача, яку важко виконати, бо вона вимагає для своєї реалізації складного та високовартісного комплексу технологічного обладнання, однією з найважливіших основних складових частин якого є інноваційний горизонтальний обертач [8].

Тому у ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України спільно з НІЦ ЗКАЕ були проведені додаткові дослідження по визначенню можливості використання способів зварювання стисненою дугою для автоматичного орбітального зварювання неповоротних стиків методами автоопресування або послідовного проплавлення.

Спосіб гелієдугового зварювання є різновидом зварювання неплавким електродом й має багато спільного з аргонодуговим зварюванням неплавким (вольфрамовим) електродом (TIG). Основний недолік аргонодугового TIG, а, відтак, й GTAW, – дуга, що вільно горить, для якої (особливо на малих струмах) характерні низька стабільність у часі та просторі й низька щільність струму у анодній плямі. Зі збільшенням струму зростає діаметр стовпа дуги, що вільно горить, й спадає концентрація теплової потужності на виробі, який зварюється, що викликає збільшення ширини зварного шву та зони термічного впливу. Крім цього, по мірі віддалення від вольфрамового електроду температура стовпа дуги, що вільно горить, різко знижується, через що її здатність до проплавлення помітно зменшується [9–12]. Тому у випадку TIG, а, відтак й GTAW, для досягнення стабільності якості зварних швів необхідно чітко підтримувати незмінними заздалегідь задані значення довжини зварювальної дуги, що обумовлює обов'язкову наявність у конструкції головок зварювальних для GTAW пристроїв та механізмів або механічних систем стабілізації довжини дуги (СДД) або електронних пристроїв та механізмів, які забезпечують автоматичне регулювання напруги дуги (АРНД).

Зазначені недоліки аргонової дуги, що вільно горить, виключаються при інтенсивному стисненні (контракції) зварювальної дуги, що може бути досягнуто різноманітними способами. Найпоширеніші серед них є використання у якості захисного газу гелія або спеціального пальника – плазмотрону з окремою подачею плазмоутворюючого та захисного газів й обов'язковою наявністю малопотужної допоміжної («чергової») дуги, яка го-

рить між електродом и соплом плазмотрону [11, 12]. Процес зварювання стисненою за допомогою плазмотрону дугою отримав назву «плазмове зварювання». Стовп стисненої плазмової дуги, який має температуру 20000 К і більше, жорстко стабілізований по осі неплавкого електроду. Висока концентрація теплового потоку цього стовпа на виробі, що зварюється, дозволяє отримувати зварні з'єднання з глибоким проплавленням та відносно невеликою шириною зварного шву та зони термічного впливу при підвищенні швидкості зварювання, внаслідок чого зростає якість зварних з'єднань. Підвищення у декілька раз гарантованої глибини проплавлення – у порівнянні з дугою, що вільно горить, – дозволяє за один прохід з'єднувати метали товщиною до 30 мм (при відповідних значеннях струму основної дуги та витрат плазмоутворюючого та захисного газів), а значно більша, ніж у дуги, що вільно горить, просторова стійкість стисненої дуги, – спростити обладнання для автоматичного зварювання, бо у випадку стисненої дуги виключається обов'язковість наявності пристроїв та механізмів, що в процесі зварювання підтримують незмінними задані значення довжини або напруги дуги – СДД або АРНД [11, 12]. Окрема подача плазмоутворюючого та захисного газів надає можливість використовувати при зварюванні різноманітні суміші газів (у тому числі зі збагаченими хімічно активними газами, що включено у випадку дуги, яка вільно горить). Використання малопотужної допоміжної («чергової») дуги забезпечує стійкість процесу зварювання у надзвичайно широкому діапазоні зварювальних струмів, включно з їх досить малими значеннями – до 0,1 А, що дозволяє здійснювати зварювання металів таких малих товщин, які недосяжні при TIG, – до товщин 0,01 мм.

У переважній більшості гелієдугове та плазмове зварювання виконується дугою прямої полярності («мінус» на електроді) у безперервному або імпульсному режимах або режимі модуляції зварювального струму, яка горить між вольфрамовим електродом пальника для TIG або GTAW чи плазмотрону та виробом, що зварюється (при плазмовому зварюванні – струмені плазмоутворюючого газу – як правило, аргону). В залежності від фізико-хімічних властивостей металу, що зварюється, у випадку плазмового зварювання для запобігання взаємодії розплавленої ванни рідкого металу та біляшовної зони з атмосферою по периферії дуги подають захисний газ: аргон, гелій, CO₂, суміші аргону з воднем, аргону з гелієм, аргону з азотом та інші суміші [11, 12]. У якості джерела струму основної (зварювальної) дуги використовується випрямляч, що регулюється, інверторного або тиристорного типу з крутоспадними (бажано

з «вертикальними») зовнішніми вольт-амперними характеристиками (ВАХ) та керуванням способом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), а у якості джерела струму малопотужної допоміжної («чергової») дуги – як правило, малопотужний випрямляч, що не регулюється або регулюється ступінчато (також з крутоспадними ВАХ), який виконано у вигляді діодного випрямлячу або перетворювачу – або типу АС – DC або типу DC – DC – потужністю (250...500) В·А.

Послідовність стадій циклу автоматичного орбітального гелієдугового або плазмового зварювання, яку відображено на рис. 1, наступна.

Цикл цих способів зварювання при встановленій на виробі, що зварюється, та зафіксованою на ньому головці зварювальної автомату для орбітального гелієдугового або плазмового зварювання за сигналом ПУСК починається з інтервалу часу «газ до зварювання» («pregas»), протягом якого забезпечується подача в пальник для гелієдугового зварювання захисного газу або подача у плазмотрон плазموутворюючого та захисного газів та їх вільний ламінарний витік з них.

По закінченню вказаного інтервалу часу за допомогою спеціального пристрою (збудника) відбувається безконтактний підпал основної дуги (у випадку гелієдугового зварювання), або допоміжної («чергової») дуги (у випадку плазмового зварювання), яка горить між неплавким (вольфрамовим) електродом та соплом плазмотрону (з виникненням цих дуг, тобто з встановленням сталого дуго-

вого розряду, збудник автоматично вимикається), що викликає або збудження основної дуги (у випадку гелієдугового зварювання) або видування з плазмотрону плазмового факелу. Одночасно з цим в установці для плазмового зварювання вмикається напруга неробочого ходу джерела струму основної (зварювальної) дуги, яка збуджується на найменшому значенні діапазону регулювання зварювального струму при торканні поверхні виробу, що зварюється, факелом, який видувається з плазмотрону.

Протягом інтервалу часу «плавне наростання» зварювальний струм плавно зростає від найменшого значення діапазону регулювання до його заздалегідь встановленого (запрограмованого) робочого значення, що виключає електродинамічний удар на неплавкий електрод пальника для гелієдугового зварювання або плазмотрону («шок» електроду).

У момент завершення інтервалу часу «плавне наростання» починається інтервал часу «прогрів», протягом якого забезпечується утворення розплавленої ванни рідкого металу на виробі, що зварюється, причому тривалість цього інтервалу часу значно менша у порівнянні з дугою, яка вільно горить. У момент завершення інтервалу часу «прогрів» на електропривід обертача головки зварювальної автомату надходить сигнал дозволу і планшайба цієї головки і закріпленим на ній пальником або плазмотроном починає з заздалегідь заданою (запрограмованою) та стабілізованою швидкістю (швидкістю зварювання) обертатися навколо неповоротного стику трубопроводу

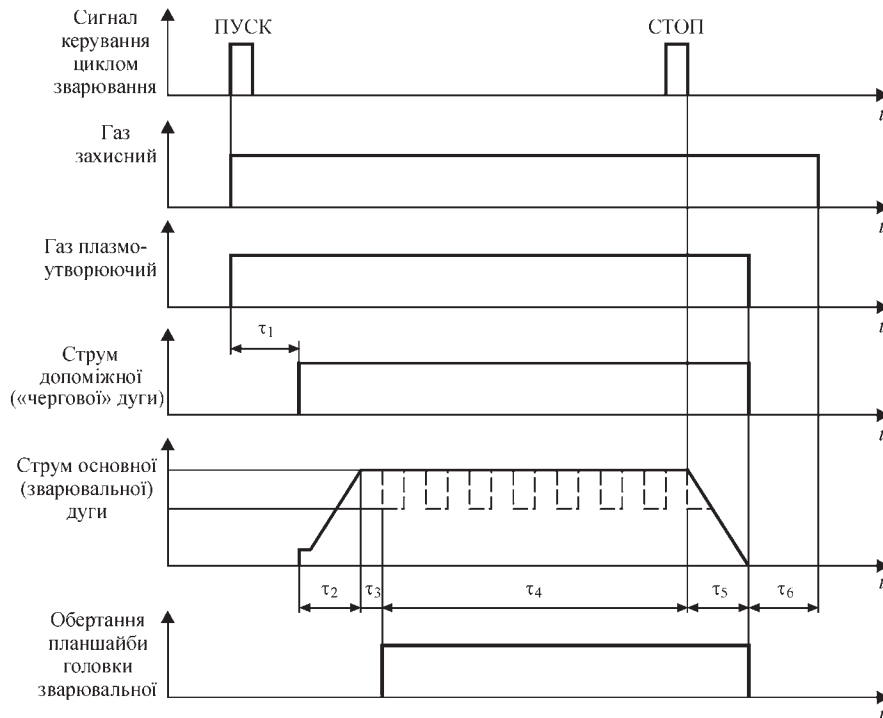


Рис. 1. Циклограма процесу автоматичного орбітального гелієдугового або плазмового зварювання неповоротних стиків трубних елементів спіралей ПВТ енергоблоків АЕС: t_1 – інтервал часу «газ дозварювання» («pregas»); t_2 – інтервал часу «плавне наростання» струму основної (зварювальної) дуги; t_3 – інтервал часу «прогрів»; t_4 – інтервал часу, протягом якого відбувається власне зварювання; t_5 – інтервал часу «плавне гасіння»; t_6 – інтервал часу «газ після зварювання» («postgas»)

високого тиску, при цьому зварювальний струм або залишається незмінним або змінюється у відповідності до заздалегідь заданого (запрограмованого) імпульсного режиму, причому у останньому випадку у момент закінчення інтервалу часу «прогрів» починається пауза зварювального струму.

З моменту закінчення власне зварювання автоматично (або вручну) подається сигнал СТОП і починається плавне спадання зварювального струму від робочого до практично нульового значення протягом інтервалу часу «плавне гасіння», при цьому, якщо передбачено імпульсний режим або режим з модуляцією зварювального струму, то, починаючи з моменту досягнення рівності значень зварювального струму у імпульсі та паузі, зварювальний струм спадатиме синхронно. При цьому забезпечуються як заварювання кратеру, так і «перекриття» початкової ділянки зварювання, а у момент закінчення інтервалу часу «плавне гасіння» при плазмовому зварюванні автоматично вимикається й струм допоміжної («чергової») дуги, а також припиняються обертання планшайби головки зварювальної та подача у плазмотрон плазмоутворюючого газу. Крім цього, починається інтервал часу «газ після зварювання» («postgas»), протягом якого зона зварювання обдувається захисним газом. У момент скінчення цього інтервалу часу цикл зварювання повністю завершується.

Функціонально-блочна схема установки для автоматичного орбітального плазмового зварювання, розробленої у НІЦ ЗКАЕ, наведена на рис. 2. Установка створена на базі раніше розроблених у ІЕЗ ім. Є.О. Патона спільно з НІЦ ЗКАЕ вітчизняних автоматів АДЦ 625 УЗ.1 та АДЦ 628 УХЛ4 для GTAW. Функціонально-блочна схема апаратно-програмного комплексу для автоматичного орбітального гелієдугового зварювання наведена у роботі [13] й не відрізняється від схеми комплексу для автоматичного орбітального аргонодугового зварювання.

При проведенні у ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України спільно з НІЦ ЗКАЕ додаткових досліджень по визначенню можливості застосування для зварювання неповоротних стиків трубних елементів спіралей ПВТ енергоблоків АЕС стисненою дугою використовувались зразки-імітатори трубних елементів спіралей ПВТ зі сталі 20 з номінальними зовнішнім діаметром 32,0 мм та товщиною стінки 4,0 мм, торці яких були оброблені у відповідності з вимогами до зварних з'єднань типу 1 – 21 – 1 (С – 21 – 1) та 1 – 21 – 2 (С – 39), які регламентовані ПН АЭ Г – 009 – 89, ПН АЭ Г – 010 – 89 та ОСТ 24.125.02 – 89.

Для проведення досліджень на зразках-імітаторах трубних елементів ПВТ (32,0×4,0) мм був створений макет експериментальної установки, яка містила у своєму складі модернізований дослідний

зразок автомату АДЦ 625 УЗ.1 для GTAW, блок автономного охолодження дослідного зразка автомату АДЦ 628 УХЛ4 для GTAW, дослідно-експериментальний зразок установки УМПДС – 0605 УХЛ4 для дугового та мікроплазмового зварювання неплавким електродом та два датчика струму – основної та допоміжної («чергової») дуги, що базуються на ефекті Холла. При цьому модернізації зазнали силова частина джерела живлення (джерела струму основної (зварювальної) дуги), головка зварювальна АДЦ 625.03.00.000 (де у випадку плазмового зварювання замість штатного пальника для зварювання неплавким електродом у середовищі інертних газів було встановлено плазмотрон Ю7М3.045.011-01 з рідинним (водяним) охолодженням), система керування дослідного зразка автомату АДЦ 625 УЗ.1 для GTAW та дослідний зразок блоку автономного охолодження БВА-02. Основні параметри автомату АДЦ 625 УЗ.1 для GTAW наведені у [13].

Підготовлені до дослідних зварювань згідно з вимогами нормативних документів торці зразків-імітаторів трубних елементів спіралей ПВТ зі сталі 20 піддавали автоматичному орбітальному гелієдуговому та плазмовому зварюванню методами автоопресування або послідовного проплавлення. Попередньо способом TIG виконували дві–три прихватки для кожного шва, для чого використовували дослідний зразок спеціалізованого джерела живлення ІЦ 617 УЗ.1 для GTAW або TIG. Для дослідних зварювань неповоротних стиків зразків-імітаторів трубних елементів високого тиску (32×4) мм спіралей ПВТ застосовували модернізовані дослідні зразки установки УМПДС – 0605 УХЛ4 та джерела живлення ІЦ 617 УЗ.1, а також автоматів АДЦ 625 УЗ.1 та АДЦ 626 УЗ.1 для GTAW, систем керування цих пристроїв та дослідного зразка плазмотрону Ю7М3.045.011-01.

За результатами виконання декількох серій дослідних зварювань встановлено:

– стикові зварні з'єднання зразків-імітаторів трубних елементів високого тиску спіралей ПВТ енергоблоків АЕС з реакторами типу ВВЕР, які виконувались способом автоматичного орбітального гелієдугового або плазмового зварювання, забезпечують необхідну глибину провару (рис. 3) та практично не мають неприпустимих дефектів, при цьому відсутні розбризкування й забризкування виробу, що зварюється, що дозволяє не тільки суттєво (як мінімум, у 6...8 раз) підвищити продуктивність праці (у порівнянні з існуючою технологією), але й значно спростити та здешевити як підготовку до зварювання, так і технологічне обладнання для отримання згаданих вище зварних з'єднань (у порівнянні з технологічним обладнанням для механізованого дугового зварювання плавким електродом у середовищі суміші захисних

газів), причому зварювання стисненою дугою повністю відповідає вимогам ПН АЭ Г – 009 – 89. ПН АЭ Г- 010 – 89 та ОСТ 24.125.02 – 89;

– використання автоматичного орбітального гелієдугового або плазмового зварювання для виконання зварних з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ енергоблоків АЕС з реакторами типу ВВЕР є енергозощаджуючим процесом, бо для реалізації згаданих вище способів зварювання потрібний зварювальний струм (струм основної

дуги) у 1,3...2,0 рази менший, ніж при зварюванні аргоновою дугою, що вільно горить;

– для одержання якісних зварних з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ енергоблоків АЕС за допомогою автоматичного орбітального гелієдугового або плазмового зварювання методами автоопресування або послідовного проплавлення оптимальна сфера режимів зварювання повинна мати наступні значення параметрів: у випадку зварювання неповоротних стиків трубних елементів спіра-

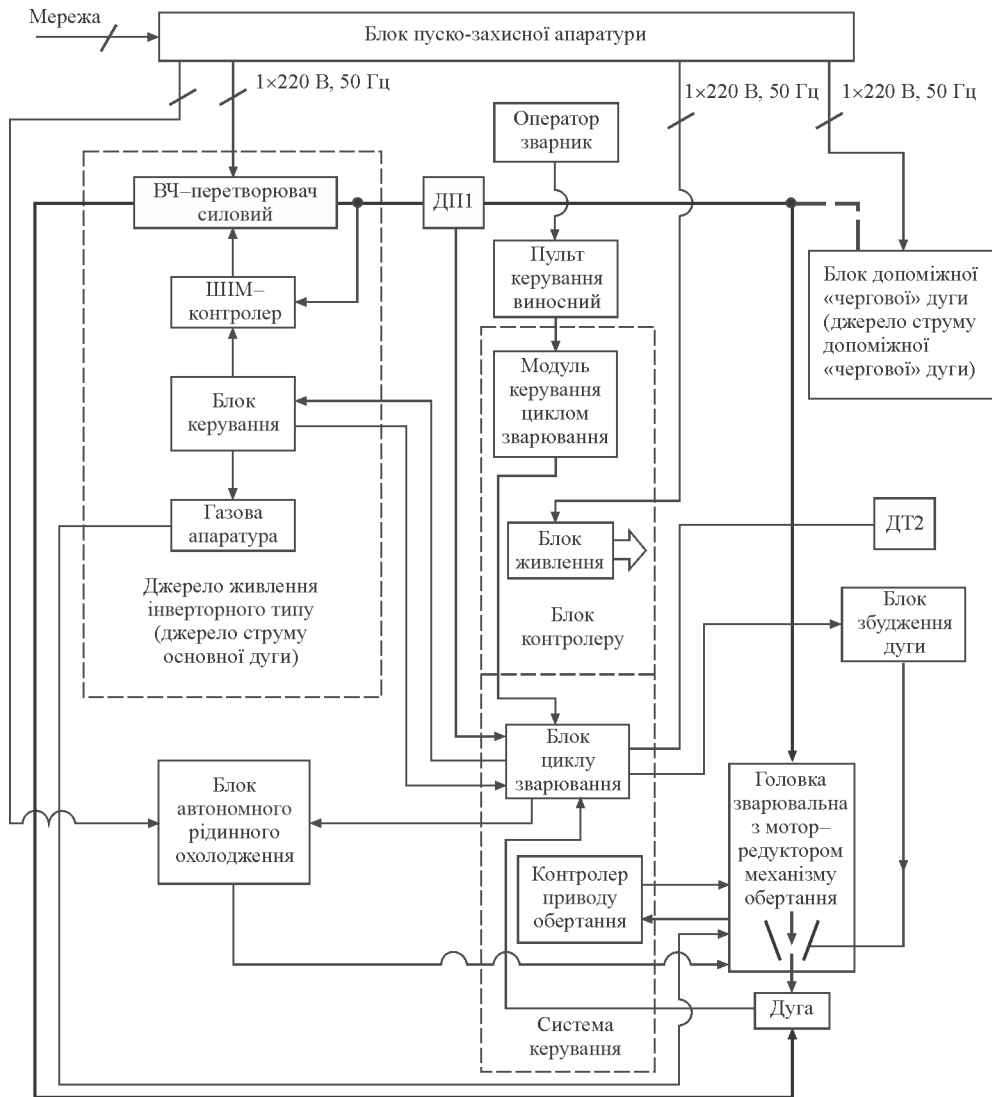


Рис. 2. Функціонально-блочна схема розробленої у НІЦ ЗКАЕ установки для автоматичного орбітального плазмового зварювання неповоротних стиків трубопроводів високого тиску енергоблоків АЕС

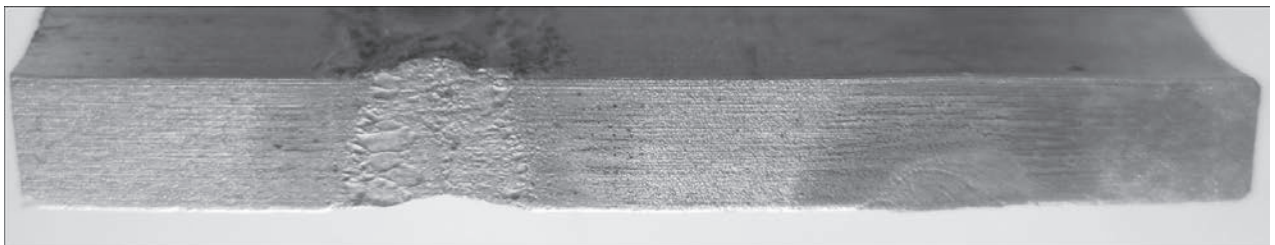


Рис. 3. Макроструктура зварного з'єднання зразка-імітатора трубних елементів спіралей ПВТ (неповоротних стиків), отриманого за допомогою автоматичного орбітального гелієдугового зварювання методом автоопресування, де ліворуч представлено шов, сформований за один прохід автоматичним орбітальним гелієдуговим зварюванням методом автоопресування, а праворуч – шов, сформований автоматичним орбітальним аргонодуговым зварюванням тим же методом

лей ПВТ (32×4) струм основної дуги (зварювальний струм) має бути у межах від 65 до 80 А, струм допоміжної («чергової») дуги при плазмовому зварюванні – у межах від 3 до 7 А, напруга на дузі – у межах від 14 до 16 В при гелієдугуговому зварюванні та від 9 до 11 В при плазмовому зварюванні, довжина основної дуги – у межах від 0,5 до 1,1 мм при гелієдугуговому зварюванні та від 3 до 6 мм при плазмовому зварюванні, швидкість обертання планшайби головки зварювальної – від 7 до 10 об/хв, кількість повнокільцевих проходів – 1...2. До складу установки (комплексу) для автоматичного орбітального гелієдугугового зварювання з'єднань трубних елементів тиску спіралей ПВТ енергоблоків АЕС мають, щонайменше, входити джерело струму основної дуги (переважно інверторного типу) з крутоспадними (бажано «вертикальними») ВАХ, палик, який закріплено на планшайбі головки зварювальної, модернізовані головки зварювальні АДЦ 625.03.00.000 (зі своїми обертачем та його контролером), блок керування циклом зварювання (БУЦС) для керування процесом зварювання, циклограма якого наведена на рис. 1, блок інтерфейсу (блок контролеру) для зв'язку з усіма іншими складовими автоматів для орбітального зварювання та блок пуско-захисної апаратури (БПЗА), що надає можливість здійснення «АВАРІЙНИЙ СТОП» за командою оператора або автоматично з практично миттєвим та повним обезструмленням усіх без виключення складових апаратно-програмного комплексу для автоматичного орбітального зварювання та введення їх додаткового захисту від тривалого перевантаження за струмом споживання та від стійкого короткого замикання, а у випадку автоматичного орбітального плазмового зварювання – вбудований або окремий блок допоміжної («чергової») дуги з крутоспадними ВАХ та блоком її збудження, плазмотрон, розрахований на найбільше значення струму основної дуги, блок автономного охолодження плазмотрону, БУЦС, блок інтерфейсу (блок контролеру) та БПЗА;

– у процесі автоматичного орбітального зварювання з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ енергоблоків АЕС повинна забезпечуватися стабільність з точністю не гірше $\pm 5\%$ таких параметрів, як струм основної дуги (зварювальний струм) при її довжині до 1,5 мм у випадку гелієдугугового та від 3 до 8 мм при плазмовому зварюванні, а також швидкість обертання планшайби головки зварювальної (швидкість зварювання); тривалість стадій, з яких складається цикл зварювання, має забезпечуватися з точністю не гірше $\pm 10\%$, причому необхідність застосування попередніх прихваток виключається;

– тривалість циклу зварювання при гелієдугуговому чи плазмовому зварюванні складає (максимально) від 4 до 5 хв проти (30...32) хв за існуючою технологією ручного аргонодугугового зварювання з подачею присадного дроту.

уючою технологією ручного аргонодугугового зварювання з подачею присадного дроту.

Висновки

1. Автоматичне орбітальне гелієдугугове або плазмове зварювання неповоротних стиків трубних елементів спіралей ПВТ (32×4) є перспективними та економічно найефективнішими способами зварювання при виготовленні та відтворювальному ремонті цих зварних конструкцій.

2. Застосування автоматичного орбітального гелієдугугового або плазмового зварювання неповоротних стиків трубних елементів ПВТ енергоблоків АЕС дозволяє не тільки суттєво (як мінімум, у 6...8 раз) підвищити продуктивність зварювання (у порівнянні з існуючою технологією) та значно покращити якість зварних з'єднань згаданих трубних елементів, що значно спрощує та здешевлює як підготовку до зварювання, так і технологічне обладнання для отримання згаданих вище зварних з'єднань (порівняно з технологічним обладнанням для механізованого дугугового зварювання плавким електродом у середовищі суміші захисних газів).

3. Обладнання для автоматичного орбітального гелієдугугового зварювання має більш просту структуру у порівнянні з обладнанням для автоматичного орбітального плазмового зварювання, тому автоматичне орбітальне гелієдугугове зварювання більш переважне.

4. Розроблено технічні пропозиції щодо побудови установок (комплексів) для автоматичного орбітального гелієдугугового та плазмового зварювання неповоротних стиків трубних елементів спіралей ПВТ енергоблоків АЕС.

5. Визначено сферу основних оптимізованих параметрів режимів автоматичного орбітального гелієдугугового або плазмового зварювання з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ.

6. Встановлено, що значення параметрів режимів автоматичного орбітального гелієдугугового або плазмового зварювання (таких, як струм основної дуги (зварювальний струм) при її довжині до 2,5 мм у випадку гелієдугугового та від 3 до 8 мм при плазмовому зварюванні, а також швидкість зварювання – швидкість обертання планшайби головки зварювальної), які відповідають сферам основних оптимізованих параметрів режимів автоматичного орбітального гелієдугугового або плазмового зварювання з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ з номінальним зовнішнім діаметром 32 мм та номінальною товщиною стінки 4,0 мм неплавким (вольфрамовим) електродом діаметром 2,0 мм мають у процесі зварювання підтримуватися незмінними з точністю не гірше $\pm 5\%$, а тривалість стадій, з яких складається цикл зварювання, повинна забезпечуватися з точністю не гірше $\pm 10\%$.

Список літератури

1. Єфімов О.В., Пилюпенко М.М., Потаніна Т.В. та ін. (2017) *Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС: схеми, процеси, матеріали, конструкції, моделі*. Єфімов О.В. (ред.). Харків, ТОВ «В справі».
2. Buongiorno J. (2010) *PWR Description*. Massachusetts Institute of Technology.
3. НП-045-03 (2003) *Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды для объектов использования атомной энергии* (Утверждены Постановлением Госатомнадзора России № 3 и Госгортехнадзора России № 100 от 19.06.2003 г. Москва, НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России).
4. Махлін Н.М., Водолазський В.Е., Попов В.Е. и др. (2018) Выбор технологии сварки при изготовлении и восстановительном ремонте спиралей подогревателей высокого давления энергоблоков АЭС. *Автоматическая сварка*, **4**, 37–43.
5. Букаров В.А. (2002) Технология дуговой автоматической сварки в защитных газах. *Сварка в атомной промышленности и энергетике. Тр. НИКИМТ*. Москва, Изд-во АТ, Т.1, сс. 149–210.
6. Ищенко Ю.С. (2002) Физико-технологические основы формирования швов в процессе дуговой сварки. *Там же*, Т.2, сс. 204–240.
7. Троицкий В.А. (2006) *Краткое пособие по контролю качества сварных соединений*. Киев, Феникс.
8. Лобанов Л.М., Водолазський В.Є., Махлін Н.М. та ін. (2017) *Горизонтальний обертач для дугового зварювання деталей трубних конструкцій*. Позитивне рішення щодо заявки а2017 11752 від 01.12.2017.
9. Кривцун І.В., Демченко В.Ф., Крикент І.В. и др. (2019) Влияние тока и длины дуги на характеристики дугового разряда при сварке неплавящимся электродом. *Автоматическая сварка*, **5**, 6–17.
10. Бой У., Кривцун І.В. (2019) *Процеси сварки неплавящимся электродом с модуляцией сварочного тока*. Ч.1. Особенности горения дуги нестационарных дуг с туполапким катодом. *Там же*, **11**, 29–39.
11. Голошубов В.І. (2005) *Зварювальні джерела живлення. Навчальний посібник*. Київ, Арістей.
12. Патон Б.Е., Григоренко Г.М., Шейко І.В. и др. (2013) *Плазменные технологии и оборудование в металлургии и литейном производстве*. Киев, Наукова думка.
13. Махлін Н.М., Коротинський О.Є., Свириденко А.О. (2013) Апаратно-програмні комплекси для автоматичного зварювання неповоротних стиків трубопроводів атомних електростанцій. *Наука та інновації*, **9**, 6, 31–45.

References

1. Efimov, O.V., Pylypenko, M.M., Potanina, T.V. et al. (2017) *Reactors and steam generators of NPP power units: schemes, processes, materials, structures, models*. Ed. by O.V. Efimov. Kharkiv, LLC «V spravi» [in Ukrainian].
2. Buongiorno, J. (2010) *PWR Description*. Massachusetts Institute of Technology.
3. *Rules for device and safe operation steam and hot water pipelines for objects of atomic energy* (Approved by Resolution Gosatomnadzor of Russia, No. 3 and Gosgortekhnadzor of Russia, No. 100, June 19,2003). Moscow, Gosatomnadzor of Russia [in Russian].
4. Makhlin, N.M., Vodolazsky, V.E., Popov, V.E. et al. (2018) Selection of welding technology in manufacture and restoration repair of spirals of high-pressure heaters of NPP power units. *The Paton Welding J.*, **4**, 37–43.
5. Bukarov, V.A. (2002) Technology of automatic shielded-arc welding. In: *Welding in nuclear industry and power engineering. Trans. of NIKIMT*. Moscow, Izd-vo AT, 1, 149-210 [in Russian].
6. Ishchenko, Yu.S. (2018) Physico-technological principles of weld formation in arc welding process. *Ibid.*, Vol. 2, 204-240 [in Russian].
7. Troitsky, V.A. (2006) *Brief manual on quality control of welded joints*. Kiev, Feniks [in Russian].
8. Lobanov, L.M., Vodolazsky, V.E., Makhlin, N.M. et al. (2017) *Horizontal manipulator for arc welding of pipe structure parts*. Positive decision on the application a2017 11752 from 01.12.2017 [in Russian].
9. Krivtsun, I.V., Demchenko, V.F., Krikent, I.V. et al. (2019) Effect of current and arc length on characteristics of arc discharge in nonconsumable electrode welding. *The Paton Welding J.*, **5**, 2-12.
10. Boyi, Wu, Krivtsun, I.V. (2019) Processes of nonconsumable electrode welding with welding current modulation (Review). Pt 1. Peculiarities of burning of nonstationary arcs with refractory cathode. *Ibid.*, **11**, 23-32.
11. Golosubov, V.I. (2005) *Welding power sources*. In: *Manual*. Kyiv, Aristei [in Ukrainian].
12. Paton, B.E., Grigorenko, G.M., Shejko, I.V. (2013) *Plasma technologies and equipment in metallurgy and foundry*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
13. Makhlin, N.M., Korotynskyi, O.E., Svyrydenko, A.O. (2013) Hardware and software complexes for automatic welding of permanent joints of pipelines of nuclear power plants. *Nauka ta Innovatsii*, **9**(6), 31–45 [in Ukrainian].

AUTOMATIC ARC WELDING IN MANUFACTURE AND RENOVATION REPAIR OF PIPE ELEMENTS OF SPIRALS OF HIGH-PRESSURE HEATERS OF NPP POWER UNITS

L.M. Lobanov¹, N.M. Makhlin², V.Ye. Popov², D.S. Oliyanenko², O.V. Kovalyuk³

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²SE «Scientific and engineering center of welding and control in the field of nuclear energy of Ukraine of E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: electro@paton.kiev.ua

³SE «Atomenergomash» of the SE NNEGC «Energoatom», 52 Promyslova Str., PO Box 306, 71503, Energodar, Ukraine. E-mail: office@aem.zp.ua

The paper considers the possibility for applying automatic orbital welding using non-consumable electrode in helium environment or plasma welding using the methods of autopressing or successive penetration to produce welded joints of pipe elements of high-pressure spirals in high-pressure heaters. The results of testing this technology and the optimal modes of producing stationary welded joints of pipe elements in spirals of high-pressure heaters of NPP power units are presented. A description of technical proposals on creation of domestic welding equipment for implementation of the proposed technology was presented. It is shown that the use of the developed technology applying domestic equipment can significantly increase the labour efficiency when producing welded joints of pipe elements in spirals of high-pressure heaters and significantly improve their quality. 13 Ref., 3 Fig.

Keywords: high-pressure heaters, spirals of high-pressure heaters, automatic orbital welding, non-consumable electrode, autopressing or sequential penetration, constricted arc, helium arc or plasma welding, stationary butts of pipelines, plasmatron

Надійшла до редакції 22.03.2020