

**Л.М. Лобанов<sup>1</sup>, Н.М. Махлін<sup>2</sup>, В.Є. Водолазський<sup>2</sup>, О.Є. Коротинський<sup>1</sup>,  
А.М. Жерносеков<sup>1</sup>, В.Є. Попов<sup>2</sup>, М.І. Скопюк<sup>1</sup>, С.І. Лавров<sup>3</sup>, В.Б. Кудряшев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. К. Малевича, 11, Київ, 03680, Україна,  
+380 44 200 2455, +380 44 205 2036, office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup> ДП «Науково-інженерний центр зварювання та контролю в галузі атомної енергетики України  
Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України», вул. К. Малевича, 11, Київ, 03680, Україна,  
+380 44 287 1066, +380 44 287 3019, electro@paton.kiev.ua

<sup>3</sup> Відокремлений підрозділ «Атоменергомаш» ДП «НАЕК «Енергоатом» (ВП «Атоменергомаш»),  
а/с 306, Енергодар, Запорізька обл., 71503, Україна,  
+380 6139 6 4701, +380 6139 6 4648, lavrov@aem.zp.ua

## СУЧАСНЕ ВІТЧИЗНЯНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МЕХАНІЗОВАНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТРУБОПРОВІДІВ ВИСОКОГО ТИСКУ ДРУГОГО КОНТУРУ ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС УКРАЇНИ



**Вступ.** Принципово необхідними складовими другого контуру ядерних енергетичних реакторів з водою під тиском є підігрівачі високого тиску (ПВТ). Спіралі ПВТ призначено для підігрівання живильної води до необхідної температури з подальшою подачею її на теплообмінник — парогенератор (ПГ). Пара, що утворюється у ПГ, надходить до турбіни, яка приводить у дію електрогенератори енергоблоку АЕС.

**Проблематика.** Основним чинником, що суттєво обмежує продуктивність створення зварних з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ при їх виробництві й ремонті та викликає утворення в них дефектів, є спосіб їх зварювання, що до сьогодні застосовується у вітчизняній практиці — спосіб ручного зварювання неплавким електродом у середовищі інертних газів (далі — TIG) з подачею присадного дроту.

**Мета.** Дослідження способів підвищення продуктивності зварювання з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ та рівня стабільності їх якості, а також розробка сучасного вітчизняного технологічного обладнання для впровадження відпрацьованих процесів.

**Матеріали й методи.** Для виконання досліджень було використано зразки — імітатори трубних елементів спіралей ПВТ зі сталі 20. Використано методи математичного та комп'ютерного моделювання, натурального макетування, дослідних зварювань, неруйнівного та руйнівного контролю, машинного проектування.

**Результати.** Досліджено можливість застосування різних способів дугового зварювання з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ, визначено найоптимальніший з них, а також встановлено максимально ефективні параметри режимів зварювання та технічних вимог до вітчизняного комплексу технологічного обладнання для виконання цього процесу, розроблено технічне завдання (ТЗ) на виконання дослідно-конструкторських робіт з ескізного проектування такого комплексу та його основних складових частин, напрацьовано інноваційні технічні пропозиції (ТП) щодо їх складу, побудови, конструктивних та інших технічних рішень.

**Висновки.** Встановлено, що для виконання чинних вимог нормативних документів та погодженого і затвердженого ТЗ щодо якості й продуктивності виконання зварних з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ зі сталі 20, найбільш ефективним та раціональним є спосіб багатопрохідного зварювання MIG + MAG — плавким електродом (електродним дротом суцільного перерізу) у середовищі суміші захисних газів. Розроблено та погоджено ТП щодо схеми-конструктивних рішень з побудови основних функціональних вузлів та механізмів обладнання для реалізації цього способу.

*Ключові слова:* ПВТ, спіралі ПВТ, механізоване зварювання, зварювальний обертач.

Характерні особливості спіралей ПВТ полягають у наявності зварних з'єднань трубних елементів спіралей та їх хвостовиків, а також у параметрах рухомого через спіраль ПВТ середовища, тобто живильної води, яка подається за номінального тиску 12,0 МПа (120 кгс/см<sup>2</sup>) до спіралі, де вона нагрівається до температури +235 °С. Тому проектування, виготовлення та відновлювальний ремонт спіралей ПВТ мають свою специфіку, яка визначає технічні вимоги до матеріалу, конструкції та зварних з'єднань ПВТ [1–6]. Зовнішній вигляд одного з найбільш розповсюджених варіантів спіралі ПВТ наведено на рис. 1.

Конструктивно спіраль ПВТ складається з трьох трубних елементів, з'єднаних між собою двома зварними стиковими швами. Заготовки для них слугують відрізки труби з номінальним діаметром 32 мм та номінальною товщиною стінки 4,0 мм з вуглецевої сталі 20. Довжина одного з прямих відрізків («центрального»), що використовуються як заготовки для трубних елементів спіралі ПВТ, становить 7000 мм, двох інших прямих відрізків — 5980 та 5403 мм відповідно. Всі зазначені відрізки в торцях мають V-подібне розкриття 1-24-1 (С-24-1), яке формується у ході попередньої верстатної обробки. Досі у вітчизняній практиці всі зварні з'єднання спіралей ПВТ виконують тільки як неповоротні і виключно вручну способом аргоно-дугового зварювання

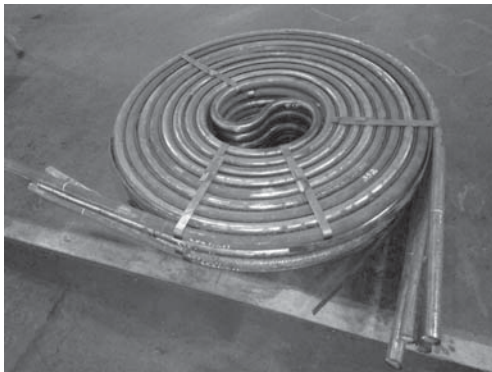


Рис. 1. Загальний вигляд одного з найпоширеніших варіантів спіралей ПВТ

неплавким електродом (TIG). При цьому тривалість циклу зварювання становить щонайменше 30–32 хвилини на одне зварне з'єднання, що не лише обмежує продуктивність зварювання, а й негативно впливає на стабільність їх якості й вимагає підготовки й залучення висококваліфікованих зварювальників.

На відміну від TIG, механізоване дугове зварювання дозволяє забезпечити стабільно високу якість та експлуатаційну надійність зварних з'єднань, оскільки при механізованому зварюванні рівень дефектності при здаванні з першого пред'явлення не перевищує 5 %, тоді як при ручних способах зварювання цей показник становить 15–45 %. Також цей тип зварювання підвищує продуктивність зварювальних робіт щонайменше у 5–6 разів. Виходячи з цього та зважаючи на масштаби розвитку атомної енергетики України, слід визнати, що застосуванню механізованого зварювання для виконання зварних з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ енергоблоків АЕС альтернативи немає.

Оскільки комплексне технологічне обладнання для механізованого зварювання трубних елементів спіралей ПВТ, так само, як і відповідні вітчизняні технологічні процеси, в Україні раніше не розроблялись і до сьогодні відсутні, організації й підприємства низки галузей економіки України були змушені застосувати технології та обладнання для механізованого дугового зварювання розробки й виробництва іноземних фірм. Проте їх використання далеко не повною мірою забезпечують виконання вимог чинних Правил і Норм, що діють в атомній енергетиці України (ПН АЭ), оскільки характеризуються відсутністю деяких необхідних опцій. Окрім того вони високовартісні, мають недостатню ремонтпридатність і потребують значних експлуатаційних витрат.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона та його спеціалізованому підрозділі НІЦ ЗКАЕ накопичено певний досвід розв'язання завдань автоматизації широкомасштабних зварювальних робіт при мон-

тажі й ремонті енергоблоків АЕС, напрацьовано розробки сучасних вітчизняних технологій автоматичного й механізованого зварювання та технології виготовлення і впровадження відповідного обладнання. Так, протягом 2008—2012 рр. в ІЕЗ ім. Є.О. Патона разом з НІЦ ЗКАЕ вперше в Україні було відпрацьовано технологічні процеси та створено сучасне конкурентоздатне обладнання для автоматичного орбітального зварювання неплавким електродом у середовищі інертних газів (GTAW) неповоротних стиків трубопроводів діаметром 7—76 мм з товщиною стінки до 3,0 мм та діаметром 76—219 мм з товщиною стінки до 12,0 мм [7], виготовлено та випробувано дослідні зразки цього обладнання, проведено комплексну підготовку його промислового (серійного) виробництва на підприємствах України, виконано впровадження промислових зразків автоматів для GTAW — при зварюванні трубопроводів діаметром 7—42 мм у відокремлених підрозділах ДП «НАЕК «Енергоатом» [8, 9]. У 2015 р. в ІЕЗ ім. Є.О. Патона разом з НІЦ ЗКАЕ вперше в Україні було досліджено та відпрацьовано технологічні процеси та створено сучасне високоефективне інноваційне обладнання для підготовки неповоротних стиків до зварювання — торцювачі ТРЦ 38 УЗ.1 для металевих труб діаметром 14—38 мм з товщиною стінки до 5,0 мм та ТРЦ 76 УЗ.1 для металевих труб діаметром 38—76 мм з товщиною стінки до 7,0 мм, а також труборіз ТТЦ 660 УЗ.1 для металевих труб необмеженої довжини діаметром 108—159 мм з товщиною стінки до 15,0 мм [10, 11]. Було виготовлено та випробувано дослідні зразки цього обладнання та проведено комплексну підготовку його промислового (серійного) виробництва на підприємствах України. Початок впровадження цього обладнання в діяльність галузі атомної енергетики заплановано на 2018 рік.

З метою вирішення завдання відпрацювання технологій механізованого зварювання з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ та створення ефективного вітчизняного обладнання

для реалізації цих технологій в ІЕЗ ім. Є.О. Патона разом з НІЦ ЗКАЕ протягом 2017 року було проведено дослідження, пошукові, дослідно-технологічні та дослідно-конструкторські роботи в таких напрямках:

- ✦ експериментальні та технологічні дослідження щодо визначення впливу різних способів дугового механізованого зварювання на продуктивність створення зварних з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ та їх якість, яка має відповідати вимогам чинних Правил і Норм побудови та безпечної експлуатації обладнання і трубопроводів атомних енергетичних установок (ПН АЭ), зокрема ПН АЭ Г-7-009-89;
- ✦ визначення і оптимізація вимог до технологічного обладнання для механізованого зварювання трубних елементів спіралей ПВТ енергоблоків АЕС України;
- ✦ розробка й обґрунтування основних схемоконструктивних рішень щодо технологічного обладнання для механізованого зварювання трубних елементів спіралей ПВТ;
- ✦ розробка й відпрацювання комплектів конструкторської та іншої технічної документації ескізного проекту технологічного обладнання для механізованого зварювання трубних елементів спіралей ПВТ та для основних складових цього обладнання.

Відповідно до ПН АЭ та інших чинних в Україні нормативних документів, 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 виконуються з граничним підсиленням  $2,0 \pm 1,0$  мм та опуклістю кореневого зварного шва не більше 1,5 мм або його вгнутістю, що не перевищує 0,6 мм. При цьому зміщення крайок трубних елементів спіралей ПВТ не повинні перевищувати 0,4 мм, а зварні з'єднання цих трубних елементів можуть бути віднесені до категорії III (підкатегорія IIIc) за ПН АЭ Г-7-010-89 та не повинні мати дефектів, окрім тих, що припускаються зазначени-

ми ПН АЭ та іншими чинними у галузі атомної енергетики України нормативними документами.

Згідно з чинною конструкторською документацією (КД) на ПВТ, зварні з'єднання трубних елементів їх спіралей підлягають 100 %-му неруйнівному контролю та вибірково-руйнівному для виконання металографічних досліджень та механічних випробувань.

Серед неруйнівних методів контролю передбачено застосування візуально-інструментального контролю (ВІК) та радіографічного контролю (РГК). Вибірковий руйнівний контроль зварних з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ проводять згідно з чинною виробничо-технічною документацією (ВТД) та вимогами чинної КД на ці вироби. При цьому здійснюють перевірку хімічного складу металу зварного шву та визначення механічних властивостей зварних з'єднань, а також проводять металографічні дослідження.

Виходячи з цього, при проведенні експериментальних та технологічних досліджень застосовували неруйнівні та руйнівні методи контролю, при виконанні яких методами ВІК та РГК, металографічних досліджень, механічних випробувань та визначення хімічного складу металу шву й зони термічного впливу було залучено персонал відділу головного зварника й служби контролю металів ВП «Атомenergомаш» ДП «НАЕК «Енергоатом» та наявні в них атестовані стандартні засоби контролю.

Для виконання експериментальних та технологічних досліджень було використано зразки — імітатори трубних елементів спіралей ПВТ зі сталі 20 з номінальним зовнішнім діаметром 32 мм і номінальною товщиною стінки 4,0 мм, крайки яких було механічно оброблено відповідно до вимог ПН АЭ Г-7-009-89, ПН АЭ Г-7-010-89 та ОСТ 24.125.02-89.

В НІЦ ЗКАЕ було проведено дослідження щодо визначення можливості отримання зварних з'єднань елементів спіралей ПВТ шляхом застосування автоматичного орбітального зварювання неплавким електродом у середовищі

інертних газів (GTAW) методами автоопресування або послідовного проплавлення, розробленими в Науково-дослідному та конструкторському інституті монтажних технологій (НИКИМТ, м. Москва) ще в 1970—1980 рр. [12, 13]. До переваг методу автоопресування можна віднести порівняно просту конструкцію зварювальної головки (без подачі присадного дроту) та потребу у найбільш простій підготовці крайок — розкриття 1-21-2 (С-39) — звичайне торцювання, але з обов'язковою фаскою розміром  $0,3 \times 45^\circ$  на внутрішній крайці труби, що пов'язано з труднощами здійснення РГК. Перший прохід при автоопресуванні виконують з наскрізним проплавленням стінки труб, причому для труб зі співвідношенням  $S/D_{mp} > 0,1$  ( $S$  — товщина стінки труби, а  $D_{mp}$  — її номінальний зовнішній діаметр). Після цього виконують декілька додаткових проходів без наскрізного проварювання. Спосіб зварювання автоопресуванням ефективний при зварюванні труб з товщиною стінки до 3,0 мм з матеріалів, що мають високий коефіцієнт лінійного розширення та низьку теплопровідність, що є характерним для корозійностійких сталей аустенітного класу (наприклад, для сталі 08X18H10T) [12, 13]. Різновидом зварювання методом автоопресування є метод послідовного проплавлення. Його перевага полягає в тому, що зварні з'єднання отримують при незмінних параметрах режиму кожного проходу. Режим зварювання обирають з умови неповного (до  $2/3$  товщини стінки) проплавлення при першому проході. При подальших проходах відбувається послідовне збільшення глибини проплавлення стінки з одночасним зростанням підсилення шву ззовні та з середини труби [12, 13]. Дослідженнями в НИКИМТ та НІЦ ЗКАЕ доведено, що метод послідовного проплавлення найдоцільніше використовувати при зварюванні труб діаметром до 40,0 мм з товщиною стінок менше 3,0 мм.

Проведеними в НІЦ ЗКАЕ експериментальними та технологічними дослідженнями, виконаними шляхом численних дослідних зварю-



вань зразків — імітаторів трубних елементів спіралей ПВТ з використанням обладнання для GTAW, у тому числі й дослідних зразків вітчизняного обладнання (автомата АДЦ 625 УЗ.1 для GTAW) [7, 9], переконливо доведено, що досягти стабільної належної якості зварних з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ за допомогою GTAW методами автоопресування або послідовного проплавлення неможливо через електрофізичні властивості матеріалу трубних елементів спіралі ПВТ та їх геометричні розміри.

На рис. 2 наведено приклад застосування дослідного зразка автомата АДЦ 625 УЗ.1 для виконання GTAW зварювання зразків — імітаторів трубних елементів спіралей ПВТ.

По-перше, вуглецеві сталі (до яких належить й сталь 20) порівняно зі сталями аустенітного класу мають значно нижчий коефіцієнт лінійного розширення та суттєво вищу теплопровідність. Це унеможливує забезпечення достатніх стискуючих зусиль для здійснення необхідних при GTAW методами автоопресування або послідовного проплавлення термопластичних деформацій. По-друге, номінальна товщина стінки трубних елементів спіралі ПВТ становить 4,0 мм, а  $S/Dmp$  — лише 0,125, тобто воно є близьким до граничної нижньої межі застосування GTAW методами автоопресування або послідовного проплавлення.

В результаті низки експериментів встановлено, що сукупність цих чинників у поєднанні з реальними умовами тепловідведення при зварюванні не дозволяє у разі застосування GTAW забезпечити ані регламентоване нормативною та конструкторською документацією повне проплавлення зварних з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ, ані стабільність якості формування їх зварних швів.

Разом з тим, численними багаторічними дослідженнями (у тому числі раніше проведеними в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України), а також практикою застосування доведено, що значно (у 2—3 рази) збільшити глибину проплавлення й одночасно забезпечити належну

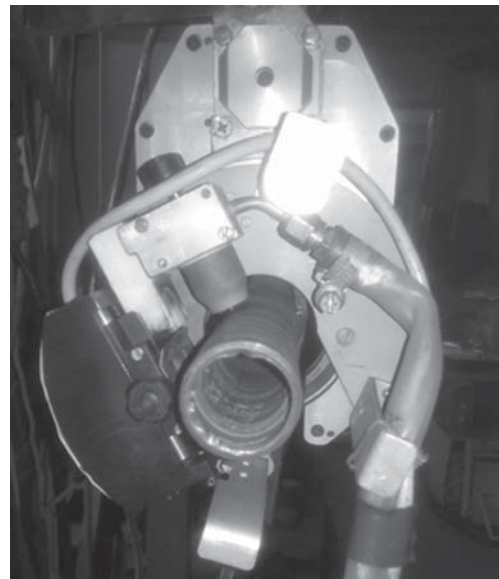


Рис. 2. Застосування дослідного зразка автомата АДЦ 625 УЗ.1 для виконання досліджень щодо GTAW зразків — імітаторів трубних елементів спіралей ПВТ

геометрію зварного шву при TIG або GTAW можливо шляхом використання активуючих флюсів [14—19] — наприклад, розробленого в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України оксидного флюсу ВС-2э. Переваги способів зварювання TIG або GTAW з використанням активуючих флюсів (далі — ATIG та GTAW-А відповідно) — це відсутність необхідності у розкритті крайок (потрібне лише торцювання) при зварюванні сталей товщиною 4—16 мм, значне скорочення (порівняно з TIG або GTAW) необхідної кількості проходів дуги і, відповідно, тривалості сумарного часу процесу зварювання, суттєве зменшення витрат зварювальних матеріалів та електроенергії, низька питома витрата активуючого флюсу зумовили успішне застосування способів зварювання ATIG й GTAW-А при виготовленні балонів високого тиску, зварюванні елементів шасі та корпусів двигунів аерокосмічної техніки й низки інших виробів [16]. Також накопичено позитивний досвід застосування технологій, побудованих на використанні ATIG і GTAW-А, у дослідно-експериментальних зварюваннях кільцевих

поворотних та неповоротних стиків трубопроводів у тепловій та атомній енергетиці [16, 19]. Проте властиві способам зварювання АТІГ і GTAW-A недоліки, зокрема відсутність засобів механізованого нанесення шару активуючого флюсу, складність контролю рівномірності його нанесення (яка значною мірою залежить від антропогенного чинника), відсутність стандартних і атестованих засобів вимірювань для здійснення такого контролю, наявність обмежень тривалості інтервалів часу між моментами нанесення цього шару й моментами початку здійснення процесу зварювання, а також використання за можливості активуючих флюсів у вигляді аерозолів, — є найбільш вірогідною причиною того, що до цього часу АТІГ і GTAW-A у вітчизняній атомній енергетиці практично не застосовуються, а можливість використання цих способів зварювання не передбачається чинною в галузі атомної енергетики України нормативною документацією та вимагає спеціальних дозволів, передбачених ПН АЕ.

Зважаючи на притаманні АТІГ й GTAW-A недоліки, є всі підстави стверджувати, що ці способи зварювання для виконання з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ не можуть бути перспективними.

Одним з найбільш поширених та розповсюджених технологічних процесів при різних видах виробництва (одиночному, дрібносерійному та серійному) є механізоване зварювання плавким електродом у середовищі активних газів (MAG). Сутність способу MAG полягає в тому, що і електрична зварювальна дуга, і розплавлений метал зварюваного виробу, захищені від впливу оточуючого повітря активним, наприклад, вуглекислим газом ( $\text{CO}_2$ ). Цей газ має відносно металу зварювальної ванни окислювальну дію та виконує насичення його вуглецем за рахунок зіткнення з сумішшю газів, які утворюються при дисоціації  $\text{CO}_2$  в дузі [20, 21]. При зварюванні у середовищі  $\text{CO}_2$  дротами будь-якого діаметру можливі два види масопереносу — з періодичними замиканнями

дугового проміжку та перенос без коротких замикань. Для процесу MAG характерні висока концентрація енергії дуги й більша, порівняно з ручним дуговим зварюванням, спроможність до проплавлення, що забезпечує високу продуктивність цього способу зварювання.

Спосіб MAG має і низку недоліків, основними з яких є підвищене розбрикування при найбільш продуктивних режимах зварювання, що призводить до необхідності додаткових трудовитрат на зачищення виробів, що зварюються, та сопла зварювального пальника; відносно низька якість поверхні зварного шву — нерівності та груба лускоподібність; низька сталість процесу дугового зварювання при значній кількості коротких замикань дугового проміжку.

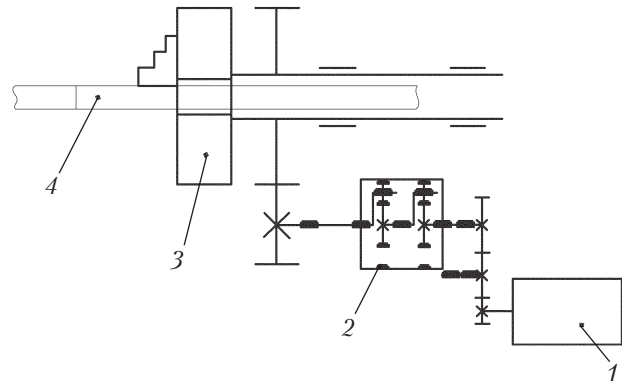
Експериментальними та технологічними дослідженнями встановлено, що при зварюванні поворотних з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ спосіб MAG без будь-яких ускладнень забезпечує високу продуктивність процесу зварювання та необхідну глибину проплавлення, але при цьому дещо ускладнюється належне формування зварного шву. Тому слід вважати, що для виконання зварних з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ цей спосіб зварювання може бути придатним з певними застереженнями та за умови забезпечення можливості відтворення відпрацьованих режимів зварювання і стабільності параметрів таких режимів під час здійснення всього зварювального циклу.

У той же час в усіх промислово розвинених країнах та в Україні широкого розвитку набуло механізоване зварювання у сумішах захисних газів на основі аргону (MIG + MAG) [22—24]. Суть способу MIG + MAG полягає в тому, що зварювання плавким електродом здійснюються у середовищі, в якому до аргону, який складає 80—95 % від загального об'єму суміші, додають невелику кількість кисню або іншого окислюючого газу (частіше за все  $\text{CO}_2$ ), що суттєво підвищує сталість горіння дуги, значно покращує якість формування зварних швів та практично виключає область режимів зва-

рювання з короткими замиканнями дугового проміжку. При цьому існує область режимів зварювання, що характеризуються краплинним переносом електродного металу, та область зі струминним (дрібнокраплинним) переносом. Порівняно з MAG такий характер масопереносу обумовлює низку технологічних переваг, серед яких найбільш суттєвими є задовільні значення коефіцієнтів розплавлення, наплавлення, розбризкування та набризкування на основний метал і сопло зварювального пальника, зміни маси переплавленого основного металу та форми провару, а також помітно більш низька інтенсивність хімічного впливу на метал зварювальної ванни. І хоча при зварюванні у середовищі сумішей захисних газів на основі аргону (MIG + MAG) порівняно з MAG спроможність до проплавлення дуги на 10–20 % знижується і для досягнення тієї ж глибини проплавлення потрібно дещо збільшувати зварювальний струм. При (MIG + MAG) забезпечуються:

- ✦ вища якість зварного шву (гладка поверхня з плавним переходом до основного металу);
- ✦ зменшення у кілька разів витрат електродного металу на розбризкування;
- ✦ помітне зниження трудомісткості зачищення основного металу від бризок;
- ✦ створення сприятливих умов для застосування імпульсних процесів [23, 24];
- ✦ зростання значень показників механічних властивостей металу шву;
- ✦ надання можливості зварювання при подовженому (збільшеному) вильоті електродного дроту.

Зважаючи на властиві способу зварювання (MIG + MAG) переваги, а також на результати проведених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона спільно з НІЦ ЗКАЕ пошукових та експериментально-технологічних робіт, є всі підстави стверджувати, що для виконання поворотних зварних з'єднань трубних елементів ПВТ енергоблоків АЕС України механізоване зварювання плавким електродом у середовищі суміші захисних газів (переважно аргону та вуглекислого газу)



**Рис. 3.** Спрощена кінематична схема макету горизонтального обертача для експериментально-технологічних робіт: 1 – електродвигун постійного струму з регульованою швидкістю обертання, 2 – двоступеневий планетарний редуктор; 3 – шпиндель з рухомими затисками; 4 – трубний виріб, що підлягає зварюванню

є одним з найбільш ефективних та раціональних способів виконання цих з'єднань.

Для проведення експериментально-технологічних робіт щодо виконання поворотних зварних з'єднань трубних елементів ПВТ енергоблоків АЕС України за допомогою MAG та MIG + MAG було створено макет зварювальної установки. До його складу входили: випрямляч зварювальний ВС-300Б, напівавтомат А-547 з дослідно-експериментальними зразками пульту керування та пальника, що розрахований на подачу електродного дроту номінальним діаметром 1,0 та 1,2 мм, а також макет обертача (який було складено, змонтовано, налагоджено та випробувано в НІЦ ЗКАЕ), в якому, зокрема, було використано електродвигун DC 110 Вт, 24 В, тип 13.120.45.1.2.1, енкодер 05.2420.1112.0100,  $U_{\text{жив}} = 5-24 V_{dc}$ , блок живлення NES – 200–24 та модуль контролера приводу обертання ІЦ 616.20.11.000. Дещо спрощену кінематичну схему макету обертача наведена на рис. 3, електричну принципову схему – на рис. 4, а параметри макету – у таблиці 1.

Підготовлені до зварювання відповідно до вимог нормативних документів та КД зразки – імітатори трубних елементів спіралей ПВТ номінальним діаметром 32 мм та з номінальною товщиною стінки 4,0 мм з V-подібним роз-

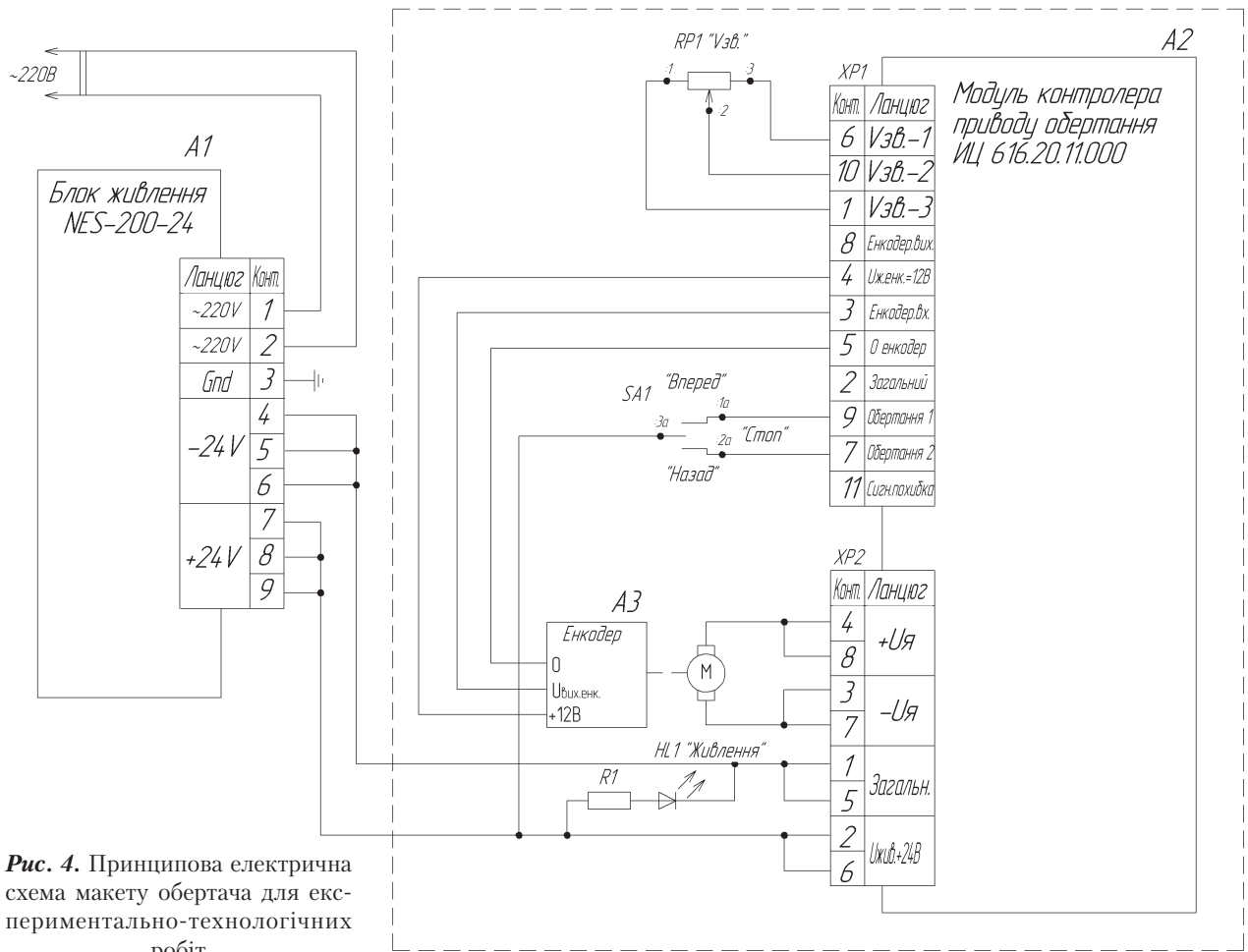


Рис. 4. Принципова електрична схема макету обертача для експериментально-технологічних робіт

криттям крайок зі сталі 20 піддавали механізованому зварюванню – MAG та MIG + MAG. Попередньо методом TIG виконували 2–3 прихватки для кожного шву у середовищі аргону на зварювальному струмі 80–100 А, для чого використовували дослідний зразок спеціалізованого джерела живлення ИЦ 617 УЗ.1 для TIG. За результатами виконання декількох серій дослідних зварювань встановлено, що:

- зварні з'єднання, виконані способом MAG з примусовими короткими замиканням тонкого електродного дроту, забезпечували необхідну глибину провару, але вимагали ретельного вибору режиму зварювання та підтримування у процесі зварювання параметрів цього режиму з точністю не гірше  $\pm 5\%$ ,

при цьому у деяких зразків – імітаторів трубних елементів спіралей ПВТ спостерігались дефекти зварних швів, найбільш характерними з яких є просідання шву, підрізи, відсутність плавного переходу до основного металу, груба лускоподібність лицьовальної поверхні;

- зварні з'єднання, виконані способом MIG + MAG, не тільки забезпечували необхідну глибину провару, але й практично не містили неприпустимих дефектів. При цьому спостерігався сприятливий перенос електродного металу, за якого майже відсутні розбризкування та забризкування виробу, який зварюється, бризками електродного металу, а якість зварних з'єднань повністю відпові-



дає вимогам ПН АЭ Г-7-009-89. Це підтверджено результатами випробувань зі застосуванням ВІК та інших методів неруйнівного і руйнівного контролю зварних з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ, здійсненими спеціалізованою, незалежною й атестованою лабораторією служби контролю металів ВП «Атоменергомаш» ДП «НАЕК «Енергоатом».

В підсумку проведених в НІЦ ЗКАЕ експериментально-технологічних досліджень було визначено та оптимізовано основні вимоги до технологічного обладнання для механізованого зварювання (способом MIG + MAG) з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ. Саме ці вимоги склали основу для розробки Технічного завдання (ТЗ) на виконання дослідно-конструкторської роботи (ДКР) «Розробка ескізного проекту технологічного обладнання для механізованого зварювання трубопроводів високого тиску енергоблоків АЕС України». Значення основних оптимізованих параметрів технологічного обладнання для механізованого зварювання з'єднань трубних елементів

Таблиця 1

**Параметри макету обертача для проведення експериментально-технологічних робіт щодо виконання поворотних зварних з'єднань трубних елементів ПВТ енергоблоків АЕС України**

Найменування параметру макету обертача	Значення
Номінальний діаметр трубних елементів спіралей ПВТ, мм	32
Номінальна товщина стінки трубних елементів спіралей ПВТ, мм	4,0
Межі регулювання швидкості обертання (швидкості зварювання) виробу, що зварюється, обертів/хв	≥1,0–7,0
Номінальна напруга однофазної мережі живлення частотою 50 Гц, В	220
Потужність блоку живлення (перетворювача АС–DC) реверсивного електроприводу обертача, Вт	≥200
Номінальна вихідна напруга постійного струму реверсивного електроприводу обертача, В	+24

тів спіралей ПВТ (способом MIG + MAG) наведено у таблиці 2.

Також встановлено, що крім відповідності вимогам, наведених в табл. 2, технологічне обладнання для механізованого зварювання трубних елементів спіралей ПВТ у процесі зварювання має забезпечувати стабільність таких параметрів як зварювальний струм, робоча напруга зварювальної дуги, швидкість обертання (швидкість зварювання) з точністю не гірше ±4 %, швидкість подачі плавкого електроду (електродного дроту) з точністю не гір-

Таблиця 2

**Основні оптимізовані параметри технологічного обладнання для механізованого зварювання способом MIG + MAG з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ**

Найменування параметру	Значення
Номінальний діаметр трубних елементів спіралей ПВТ, мм	32
Номінальна товщина стінки трубних елементів спіралей ПВТ, мм	4,0
Діапазон регулювання зварювального струму, А, в межах	110–130
Діапазон регулювання робочої напруги дуги, В, в межах	20–24
Номінальний діаметр плавкого електроду (електродного дроту переважно марки Св-08ГС або Св-08Г2С), мм	1,0
Діапазон регулювання швидкості обертання (швидкості зварювання) виробу, що зварюється, обертів/хв, в межах	1–7
Діапазон регулювання швидкості подачі плавкого електроду (електродного дроту переважно марки Св-08Г2С або Св-08Г20Н9Г7Т), м/год, в межах	120–160
Зміщення осі плавкого електроду (електродного дроту) відносно вертикалі («зеніту»), град. кутових, в межах	15–20
Зміщення осі плавкого електроду (електродного дроту) відносно вертикалі («зеніту»), мм, в межах	10–15
Кількість повнокільцевих проходів при виконанні одного зварного з'єднання	2
Тривалість циклу зварювання одного з'єднання, с	5,0
Охолодження пальника	Газове

ше  $\pm 5\%$ , тривалість циклу зварювання — з точністю не гірше  $\pm 10\%$ , а також надійне затискання й центрування обох трубних елементів, що підлягають зварюванню між собою, з метою забезпечення їх синхронного обертання та усунення необхідності застосування попередніх прихваток.

Відповідно до визначених й оптимізованих вимог та ТЗ на виконання ДКР «Розробка ескізного проекту технологічного обладнання для механізованого зварювання трубопроводів високого тиску енергоблоків АЕС України» було розроблено й погоджено Технічну пропозицію (ТП) щодо основних схемо-конструктивних рішень комплексу такого обладнання. Саме ці рішення лягли в основу розробленого в НІЦ ЗКАЕ ескізного проекту комплексу технологічного обладнання для механізованого зварювання трубних елементів спіралей ПВТ та складових частин цього комплексу.

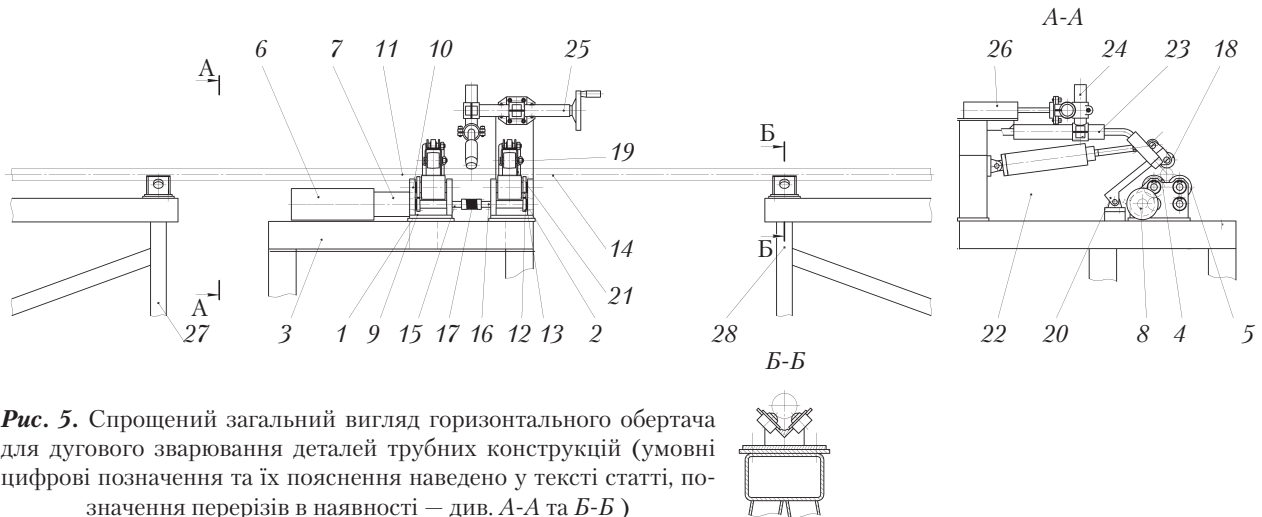
Однією з найважливіших основних складових частин комплексу технологічного обладнання для механізованого зварювання трубних елементів спіралей ПВТ є його горизонтальний обертач, який забезпечує надійну фіксацію трубних елементів, що підлягають зварюванню, їх самоцентрування, практично синхронне їх обертання в процесі зварювання навколо спільної повздовжньої осі зі зварювальною швидкістю.

На рисунку 5 схематично зображено загальний вигляд горизонтального обертачу.

Згідно з його ескізним проектом, горизонтальний обертач для дугового зварювання деталей трубних конструкцій містить дві нерухомі стійки — приводну 1 та ведену 2, які змонтовано на загальній рамі 3. Кожна зі стійок оснащена приводним 4 та опорним 5 роликками. На приводній стійці 1 розміщено привід, який складається з електродвигуна 6 та редуктора 7, розташованих на одній осі. Приводна стійка 1 споряджена набором шестерень. Першу з них (8) встановлено на вихідному валі редуктора 7 і зачеплено з «паразитною» шестернею 9, яка, у свою чергу, знаходиться у за-

чепленні з шестернею 10. Остання знаходиться на одному валі з приводним роликом 4, котрий приводить до руху зі зварювальною швидкістю трубну заготовку 11. Набір шестерень веденої стійки складається з «паразитної» шестерні 12 та шестерні 13, які зачепленні одна з одною. Шестерня 13 знаходиться на одному валі з привідним роликом веденої стійки. Цей ролик призводить до руху зі зварювальною швидкістю другу трубну заготовку 14. Паразитні шестерні обох стійок з'єднані між собою валами 15 та 16 через компенсаційну муфту 17. Трубні заготовки спираються на приводні та опорні ролики і притискаються до них притискними роликами 18 і 19, які встановлені на важелях 20 і 21. Важелі змінюють своє просторове положення за допомогою двосторонніх пневмоциліндрів 22, що забезпечує необхідне зусилля зчеплення приводних роликів з трубними заготовками. Робочий інструмент (пальник) 23 закріплено в затискачі 24, який фіксується в коректорі 25, що забезпечує можливість корегування встановлення пальника відносно зварного стику. Підведення пальника в робочу позицію та відведення його в позицію для завантаження заготовок виконується двостороннім пневмоциліндром 26 із вбудованою напрямною. Стійки віддалені одна від одної на відстань, що дозволяє виконати зварне з'єднання трубних заготовок та уникнути впливу температури, яка утворюється в процесі зварювання. Обертач споряджено ложементами 27 і 28 з кульовими опорами для розміщення та пересування довгомірних трубних заготовок.

Обертач працює наступним чином. Для завантаження трубних заготовок пальник 23 за допомогою пневмоциліндра 26, а притискні ролики 18 і 19 за допомогою пневмоциліндрів 22, відводяться у вихідну позицію. Заготовки 11 і 14 знімаються зі стелажу, встановленому на робочому місці, де вони попередньо розміщуються, і укладаються на ложементи 27 та 28, а їх торці встановлюються в зоні проектного зварювання. Після цього лівий притискний ролик 18 за допомогою пневмоциліндра



**Рис. 5.** Спрощений загальний вигляд горизонтального обертача для дугового зварювання деталей трубних конструкцій (умовні цифрові позначення та їх пояснення наведено у тексті статті, позначення перерізів в наявності – див. А-А та Б-Б)

22 притискає трубку заготовку 11 до ведучого 4 та опорного 5 роликів. Сила притискання регулюється зміною тиску робочого стисненого повітря. Надалі торець трубної заготовки 14 стикається з торцем трубної заготовки 11 і притискається роликом 19 до ведучого й опорного роликів веденої стійки 2. Таким чином заготовки стають відцентрованими відносно одна одної.

Робочий інструмент (пальник) 23 підводиться до зони зварювання, після чого, за необхідності, коригується його орієнтація відносно зварювального шва за допомогою коректора 25, а також поворотами затискача 24 відносно коректора та переміщенням пальника відносно затискача. Після цього відбувається цикл зварювання за попередньо обраним режимом та алгоритмом. Обертання заготовок виконується за рахунок їх фрикційного зв'язку з приводними роликами 4, рух яких забезпечує електродвигун 6 через редуктор 7 і зубчасту передачу, причому частота обертання (а відтак і швидкість зварювання та швидкість неробочих переміщень) регулюється електричним приводом. Момент обертання передається обом трубним заготовкам, що запобігає небажаному зміщенню крайок. При цьому кінематичні похибки, що виникають за рахунок неспівпадання дійсних розмірів елементів передачі

компенсуються еластичною муфтою 27. Після виконання циклу зварювання пальник 23, а потім притискні ролики 18 та 19 відводяться у вихідну позицію. Для виконання наступного зварного з'єднання зварені трубні заготовки пересуваються у напрямку їх поздовжньої осі вздовж ложементів 27 та 28, спираючись на кульові опори цих ложементів, доки необхідний торець не опиниться на позиції для зварювання. Далі завантажуються наступні трубні заготовки і процес повторюється.

Як електропривод в обертачі застосовано мотор – редуктор постійного струму (з двома виходами валу) потужністю 200 Вт Lenze SPL62-6PVCР–056N21, розрахований на номінальне значення напруги живлення 24 В. За номінального значення напруги живлення він забезпечує момент обертання  $50 \text{ Н} \times \text{м}$ , число обертів вихідного валу редуктора становить 24 оберти/хв, а коефіцієнт редукції – 123,97. Наявність у складі обертачу мотор-редуктора зумовлена тим, що для забезпечення реальних режимів механізованого зварювання поворотних стиків трубних елементів спіралей ПВТ має відбуватися їх обертання зі значно меншою швидкістю порівняно з швидкістю обертання вихідного валу двигуна електроприводу.

Стабілізація швидкості обертання вихідного валу електродвигуна мотор-редуктора забез-

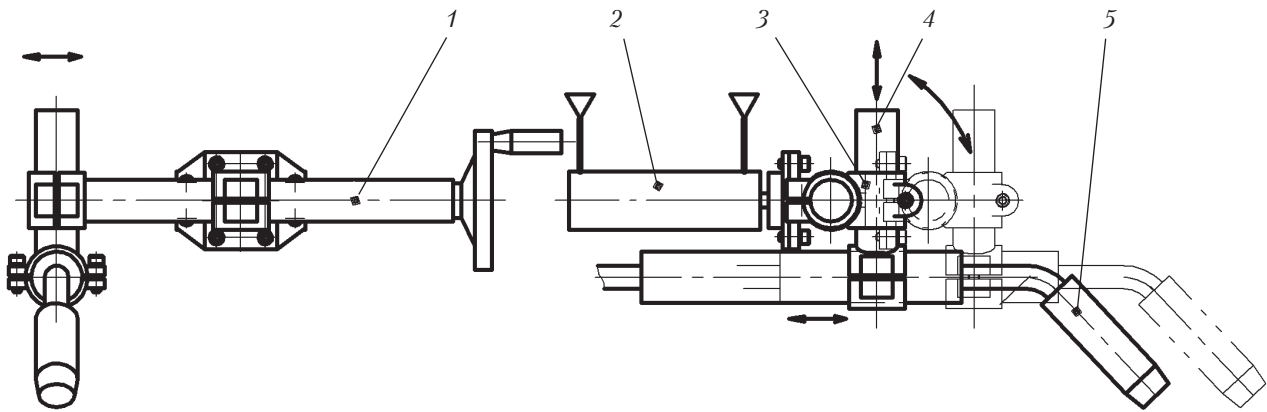
печується використанням вихідних інформаційних імпульсів енкодера 05.2420.1112.0100,  $U_{жив} = 5-24 V_{dc}$ , який співвісно з'єднано з вільним виходом валу електродвигуна. При цьому стабілізація, керування швидкістю та напрямком обертання мотор-редуктора здійснюються за допомогою уніфікованого й розробленого в НІЦ ЗКАЕ модуля контролера приводу обертання ІЦ 616.20.11.000 та його зовнішніх засобів керування (резистора змінного струму « $V_{CB}$ » та перемикача «Вперед – Стоп – Назад»). Живлення ланцюгів (в тому числі й силових ланцюгів електропривода) постійним струмом забезпечується за допомогою блока живлення NES–200–24, який є компактним інвертором АС–DC зі стабілізацією вихідної напруги постійного струму. В процесі розробки ескізного проекту горизонтального обертачу визнано за доцільне розмістити модуль контролера приводу обертання ІЦ 616.20.11.000 та блок живлення ланцюгів електроприводу обертачу в моноблочному конструктиві – блоці керування приводу обертачу.

Вихідний вал мотор-редуктора армовано зубчастою шестернею з  $Z_1 = 17$ , яка приводить до обертання «паразитну» шестерню. За рахунок зубчастої передачі одночасно з обертанням цієї «паразитної» шестерні відбувається обертання і шестерні зі  $Z_2 = 51$ , що закріплена на валі приводного ролика. Крім цього, ця «паразитна» шестерня своїм валом співвісно пов'язана з валом іншої «паразитної» шестерні, яка за рахунок зубчастої передачі забезпечує обертання шестерні, закріпленої на валі приводного ролика веденої стійки. Наявність приводного й опорного, а також керованого окремим пневмоциліндром притискного роликів веденої стійки обертачу забезпечує встановлення та затискання другого прямого відрізка труби та його центрування відносно першого прямого відрізка. Вали «паразитних» шестерень приводної та веденої стійок обертачу пов'язані між собою елементом гнучкого кінематичного зв'язку (муфтою компенсаційною), що дає можливість практично синхрон-

ного обертання обох прямих відрізків труби, які підлягають зварюванню. Саме це можна трактувати як одну з інноваційних особливостей запропонованого горизонтального обертачу для дугового зварювання деталей трубних конструкцій [25].

Інша особливість запропонованого обертачу технологічного обладнання для механізованого зварювання поворотних стиків трубних елементів спіралей ПВТ полягає в тому, що виконання зварювання поворотних стиків трубних елементів не вимагає виконання попередніх «прихваток», які можуть негативно впливати на якість зварних з'єднань.

Відповідно до розроблених в процесі виконання зазначеної ДКР ТЗ, ТП та ескізного проекту обертачу з урахуванням необхідності надання можливості зміщення осі плавкого електроду (наконечника пальника) відносно вертикалі («зеніту») передбачено наявність в конструкції обертачу двопозиційного вузла підводу пальника. Саме він забезпечує в одній позиції (неробочій) таке просторове розташування пальника, яке б жодним чином не заважало швидкому й безперешкодному встановленню, затисканню та центруванню прямих відрізків труби, що підлягають зварюванню між собою, а в іншій позиції (робочій) – таке його просторове розташування, яке б відповідало технологічно обґрунтованим значенням вильоту електродного дроту, напруги (довжини) дуги та зміщенню осі плавкого електроду відносно вертикалі («зеніту») для здійснення якісного процесу зварювання. З метою досягнення цього до складу конструкції двопозиційного вузла підводу пальника входить коректор робочого просторового положення пальника. Керування функціонуванням двопозиційного вузла підводу пальника здійснюється засобами пневмоавтоматики з блокуванням дій оператора, які не відповідають заданому циклу зварювання. Наявність в конструкції обертачу та алгоритм дії двопозиційного вузла підводу пальника також може вважатися інноваційним рішенням.



**Рис. 6.** Схема побудови вузла конструкції обертача, яка забезпечує встановлення пальника у просторовому положенні, що відповідає певній стадії циклу зварювання: 1 – коректор поперечний; 2 – пневмоциліндр з направляючою; 3 – затискач поворотний; 4 – стійка з затискачем для пальника; 5 – пальник

Схему вузла конструкції обертача, за допомогою якої відбувається встановлення пальника у просторове положення, що відповідає тій чи іншій стадії циклу зварювання, наведено на рис. 6.

Ескізним проектом обертача технологічного обладнання для механізованого зварювання трубних елементів спіралей ПВТ передбачено, що для живлення пневмопристроїв, які містять у собі компоненти пневмоавтоматики, використовується блок підготування стисненого повітря (БПСП) розробки та виробництва фірми *Camozzi*, який надійно функціонує, якщо рівень тиску стисненого повітря, що надходить від його цехової магістралі, становить від 0,40 до 0,63 МПа (від 4,0 до 6,3 кгс/см<sup>2</sup>).

Виходячи з результатів досліджень, виконаних в ІЕЗ ім. Є.О. Патона спільно з НІЦ ЗКАЕ експериментальних та технологічних досліджень, вимог ТЗ та напрацювань ТП, зварювальна частина технологічного обладнання для механізованого зварювання трубних елементів спіралей ПВТ має містити у собі блок керування циклом зварювання (БКЦЗ), зварювальне джерело живлення інверторного типу з жорсткими або пологоспадними зовнішніми вольтамперними характеристиками (ВАХ), пальник для MIG/MAG з газовим охолодженням та блок пуско-захисної апаратури (БПЗА).

БКЦЗ призначено для керування процесом

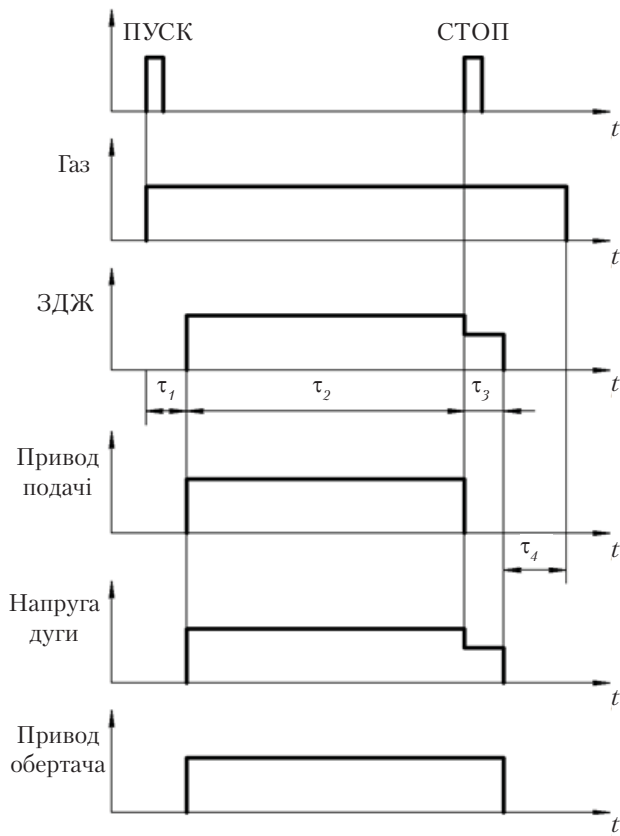
зварювання, циклограму якого наведено на рис. 7.

В момент надходження до БКЦЗ переднього фронту сигналу (імпульсу) «ПУСК» в зварювальному джерелі живлення (ЗДЖ) вмикається газовий клапан і починається витік захисного газу (або суміші газів) через робочий отвір сопла пальника. З цього ж моменту починається тривалість заздалегідь визначеного (встановленого) та плавно регульованого інтервалу часу  $\tau_1$  «ГАЗ ДО ЗВАРЮВАННЯ» («Pre-gas»), який триває до моменту одночасного вмикання ЗДЖ, приводу подачі електродного дроту й приводу обертача технологічного обладнання для механізованого зварювання трубних елементів спіралей ПВТ, що спричиняє збудження зварювальної дуги торканням. Почнеться зварювання, що триватиме протягом також заздалегідь визначеного (встановленого) та плавно регульованого інтервалу часу  $\tau_2$ , тривалість якого визначається за виразом:

$$\tau_2 = T_{np1} + k \times T_{np2} = \pi \times (d_1 + k \times d_2) / V_{св},$$

де  $T_{np1}$  – тривалість першого повнокільцевого проходу зварювальної дуги;  $k = (1,10–1,15)$  – коефіцієнт, який враховує тривалість «перекриття»;  $T_{np2}$  – тривалість другого (лицувального) повнокільцевого проходу зварювальної дуги;  $d_1$  – номінальний внутрішній діаметр трубних елементів спіралей ПВТ;  $d_2$  – номінальний зовнішній діаметр трубних елементів





**Рис. 7.** Циклограма процесу зварювання трубних елементів спіралей ПВТ: ЗДЖ – зварювальне джерело живлення;  $\tau_1$  – інтервал часу «ГАЗ ДО ЗВАРЮВАННЯ» («Pregas»);  $\tau_2$  – інтервал часу, протягом якого відбувається власне зварювання без перерви між першим та другим проходимами дуги;  $\tau_3$  – інтервал часу, протягом якого відбувається розтягування зварювальної дуги до моменту її повного обриву та заварювання «кратеру»;  $\tau_4$  – інтервал часу «ГАЗ ПІСЛЯ ЗВАРЮВАННЯ» («Postgas»)

тів спіралей ПВТ. В момент надходження до БКЦЗ переднього фронту сигналу (імпульсу) «СТОП» вимикається привод подачі електродного дроту, при цьому на 25–30 % зменшуються значення зварювального струму та на 1,5–2,0 В напруги дуги й починається процес «розтягування» дуги тривалістю  $\tau_3$  – до моменту її природного обриву внаслідок обгорання електродного дроту. Протягом інтервалу часу  $\tau_3$  відбувається «заварювання кратеру» зварювальної ванни з'єднання трубних елементів спіралей ПВТ. В момент закінчення тривалості

інтервалу часу  $\tau_3$  повністю вимикаються ЗДЖ та привод обертача технологічного обладнання для механізованого зварювання трубних елементів спіралей ПВТ й починається тривалість заздалегідь визначеного (встановленого) та плавно регульованого інтервалу часу  $\tau_4$  «ГАЗ ПІСЛЯ ЗВАРЮВАННЯ» («Postgas»), протягом якого відбувається обдування зони зварювання захисним газом (або сумішшю газів). В момент закінчення тривалості інтервалу часу  $\tau_4$  вимикається газовий клапан й на цьому цикл зварювання завершується.

Як видно з циклограми (рис. 7), БКЦЗ забезпечує:

- ✦ два способи керування роботою складових частин та виконавчих механізмів технологічного обладнання для механізованого зварювання трубних елементів спіралей ПВТ – ВРУЧНУ і АВТОМАТИЧНО при двох видах функціонування цього обладнання – НАЛАГОДЖЕННЯ та ЗВАРЮВАННЯ;
- ✦ плавне регулювання та попереднє встановлення значень швидкості подачі електродного дроту, тривалості інтервалів часу «ГАЗ ДО ЗВАРЮВАННЯ» («Pregas»), процесу власне зварювання (до моменту надходження переднього фронту сигналу (імпульсу) СТОП), «ГАЗ ПІСЛЯ ЗВАРЮВАННЯ» («Postgas») та автоматичну стабілізацію цих значень у процесі налагодження або зварювання.

Конструктивно БКЦЗ виконано у вигляді друкованої плати, на якій встановлено всі його елементи за винятком органів керування, що можуть бути додатково розміщені або на панелі керування ЗДЖ, або на панелі блоку керування приводу обертача технологічного обладнання для механізованого зварювання трубних елементів спіралей ПВТ, або ж (за необхідності) на панелі виносного пульта керування (пульту оператора). При цьому БКЦЗ має відповідні вилки й розетки для під'єднання ланцюгів ЗДЖ з газовим клапаном і механізмом подачі електродного дроту, а також ланцюгів виносного пульта керування (пульту

оператора) та обертача технологічного обладнання для механізованого зварювання трубних елементів спіралей ПВТ.

В результаті експериментально-технологічних досліджень було визначено, що для досягнення виконання якісних багатопрхідних зварних з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ методом MIG + MAG оптимальна сфера режимів зварювання повинна мати такі параметри: зварювальний струм — в межах 110–130 А; робоча напруга дуги — в межах 21–23 В; швидкість зварювання — в межах 1–6 обертів/хв. При цьому як плавкий електрод має використовуватися електродний дріт (переважно марки Св-08ГС або Св-08Г2С) з номінальним діаметром 1,0 мм, а швидкість його подачі повинна бути 120–160 м/год. Також було встановлено, що серед множини ЗДЖ інверторного типу, які представлено на вітчизняному ринку, для виконання вищезазначених вимог та вимог ТЗ і напрацювань ТП найбільш доцільним є застосування поширеного в Україні зварювального джерела живлення інверторного типу MIG/MAG/TIG/MMA 303 розробки й виробництва фірми *Tesla Weld*, що містить у собі напівавтомат для дугового зварювання MIG 303 зі стандартним механізмом подачі електродного дроту та пальником для напівавтоматичного дугового зварювання MB 15AK з газовим охолодженням розробки й виробництва фірми *ABICOR BINZEL*.

Основні технічні характеристики джерела живлення MIG/MAG/TIG/MMA 303 наведено у таблиці 3.

З аналізу основних технічних характеристик джерела живлення MIG/MAG/TIG/MMA 303 випливає, що вони, а також ВАХ цього ЗДЖ придатні для задоволення технічних вимог, визначених ТЗ та проведеними експериментально-технологічними роботами, за винятком тривалості інтервалів часу «Pregas» та «Postgas». Крім цього, відповідно до алгоритму роботи цього джерела живлення, визначеного його розробником, природне обгорання електродного дроту при завершенні

циклу зварювання з автоматичним вимкненням зварювального струму й припиненням подачі електродного дроту та вимкнення газового клапану відбуваються майже одночасно. Для усунення зазначених недоліків джерела живлення MIG/MAG/TIG/MMA 303 (власних й інших його аналогам, які присутні на ринку України) в НІЦ ЗКАЕ було виконано розробку БКЦЗ та доопрацювання системи керування цього ЗДЖ, що обумовило необхідність передбачити встановлення на його задній панелі (стінці) відповідного з'єднувача для зв'язку з БКЦЗ — для випадку, якщо БКЦЗ конструктивно неможливо вбудувати у ЗДЖ.

При застосуванні як ЗДЖ джерела живлення MIG/MAG/TIG/MMA 303 для забезпечення програмування (попереднього встановлення) значень режиму зварювання — напруги

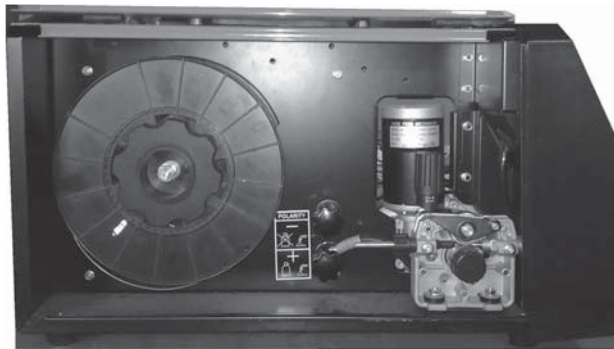
Таблиця 3

**Основні технічні характеристики джерела живлення MIG/MAG/TIG/MMA 303**

Найменування параметру	Значення
Основні технічні характеристики джерела живлення MIG/MAG/TIG/MMA 303	32
Тривалість навантаження при найбільшому зварювальному струмі, %	80
Діапазон регулювання робочої напруги дуги, В, в межах	14–28
Діапазон діаметрів електродного дроту, мм, в межах	0,8–4,0
Діапазон незалежного регулювання швидкості подачі електродного дроту, м/год, в межах	60–600
Тривалість інтервалу часу «Pregas» («газ до зварювання»), с, в межах	0,8–1,0
Можливі режими роботи при зварюванні способом MIG + MAG	2Т, 4Т
Тривалість інтервалу часу «Postgas» («газ після зварювання»), с, в межах	1,0–1,5
Напруга однофазної мережі живлення частотою 50 Гц, В, в межах	200–240
Найбільша електрична потужність, що споживається, кВт	5,0
Маса, кг	15,5



**Рис. 8.** Зовнішній вигляд передньої панелі (панелі керування) зварювального джерела живлення інверторного типу MIG/MAG/TIG/MMA 303



**Рис. 9.** Зовнішній вигляд механізму подачі електродного дроту джерела живлення MIG/MAG/TIG/MMA 303

дуги та швидкості подачі електродного дроту — використовуються штатні засоби керування та світлодіодні одиничні індикатори цього ЗДЖ, розташовані на його передній панелі (панелі керування) зовнішній вигляд якої наведено на рисунку 8.

На рис. 9 наведено зовнішній вигляд механізму подачі електродного дроту джерела живлення MIG/MAG/TIG/MMA 303.

Виготовлення та випробування макетів вузлів БКЦЗ та доопрацьованої системи керування джерела живлення MIG/MAG/TIG/MMA 303 дозволило встановити, що у такому варіанті це доопрацьоване джерело живлення, при збереженні його технічних характеристик, здатне забезпечити виконання циклу зварювання, наведеного на рис. 7. При цьому діапазон регулювання тривалості інтервалу часу «Pregas» («Газ до зварювання») становить що-

найменше від 1,0 до 10,0 с, а діапазон регулювання тривалості інтервалу часу «Postgas» («Газ після зварювання») — щонайменше від 10,0 до 30,0 с.

З метою спрощення під'єднання складових технологічного обладнання для механізованого зварювання трубних елементів спіралей ПВТ до мережі живлення, надання можливості здійснення режиму «АВАРІЙНИЙ СТОП» з практично миттєвим та повним знеструмленням всіх без винятку його складових та введення їх додаткового автоматичного захисту від тривалого перевантаження за струмом споживання, а також від сталого короткого замикання, в НІЦ ЗКАЕ розроблено й спроектовано БПЗА.

Наявність у схемі БПЗА автоматичного однопольового вимикача з незалежним роз'єднувачем забезпечує:

- ✦ вмикання та вимикання напруги живлення комплексу технологічного обладнання для механізованого зварювання поворотних стиків трубних елементів спіралей ПВТ;
- ✦ тепловий захист комплексу технологічного обладнання для механізованого зварювання поворотних стиків трубних елементів спіралей ПВТ від тривалих струмових перевантажень, тобто від перевищення більше, ніж в 1,45 рази, струмом живлення свого номінального значення, та електромагнітний захист від струмів короткого замикання (перевищення величини струму живлення в 3–12 разів) у разі їх виникнення в складових комплексу технологічного обладнання для механізованого зварювання поворотних стиків трубних елементів спіралей ПВТ;
- ✦ швидкісне (практично миттєве,  $t_{\text{спрац}} \leq 2$  мс) дистанційне відключення вимикача автоматичного, тобто повне знеструмлення комплексу технологічного обладнання для механізованого зварювання поворотних стиків трубних елементів спіралей ПВТ та всіх його складових, за командою оператора «АВАРІЙНИЙ СТОП» або ж автоматично у разі виникнення струмових перевантажень

чи струмів короткого замикання в складових комплексу технологічного обладнання для механізованого зварювання поворотних стиків трубних елементів спіралей ПВТ.

## ВИСНОВКИ

1. В результаті виконаних в ІЕЗ ім. Є.О. Патона спільно з НІЦ ЗКАЕ експериментальних і технологічних досліджень визначено, що для виконання вимог нормативних документів, які чинні в галузі атомної енергетики України, та погодженого і затвердженого ТЗ щодо якості й продуктивності виконання зварних з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ діаметром 32 мм з товщиною стінки 4,0 мм та V-подібним розкриттям крайок 1-24-1 (С-24-1) зі сталі 20 серед відомих та поширених у вітчизняній практиці способів механізованого дугового зварювання найбільш ефективним, раціональним та доцільним є спосіб багатопрохідного зварювання MIG + MAG – плавким електродом (електродним дротом суцільного перерізу) у середовищі суміші захисних газів (аргон – 80–85 %, вуглекислий газ – 15–20 %). При використанні способу багатопрохідного зварювання MIG + MAG забезпечуються:

- ✦ якісне формування зварного шву – гладка поверхня з плавним переходом до основного металу;
- ✦ зменшення, порівняно з розповсюдженим способом зварювання MAG, у 3–4 рази втрат електродного металу на розбрикування, зниження у 8–10 разів трудомісткості зачищення основного металу від бризок, зростання значень показників механічних властивостей металу шву;
- ✦ створення сприятливих умов для застосування імпульсних процесів [23, 24];
- ✦ надання можливості зварювання при подовженому (збільшеному) вильоті електродного дроту [21].

Також встановлено, що ефективність технологічного процесу багатопрохідного зварювання MIG + MAG стиків трубних елементів спіралей ПВТ суттєво залежить від якості під-

готовки цих елементів до зварювання, яка має відповідати вимогам чинних в галузі атомної енергетики України нормативних документів, у тому числі ПН АЭ Г-7-008-89, ПН АЭ Г-7-009-89 та ОСТ 24.125.02 – 89 стосовно зварних з'єднань з розкриттям крайок 1-24-1 (С-24-1).

2. При проведенні експериментально-технологічних досліджень визначено, що для оцінювання якості зварних з'єднань, отриманих шляхом механізованого зварювання стиків трубних елементів спіралей ПВТ цілком достатньо застосування методів неруйнівного (ВІК та РГК) та вибіркового руйнівного контролю, які передбачені чинними КД, ВТД та іншими нормативними документами галузі атомної енергетики України (зокрема, ПН АЭ Г-7-010-89). При цьому забезпечується повнота, достовірність та точність контролю, необхідного для визначення відповідності зварних з'єднань стиків трубних елементів спіралей ПВТ вимогам ПН АЭ Г-7-009-89, ПН АЭ Г-7-010-89 та ОСТ 24.125.02 – 89, інших нормативних документів, чинних в галузі атомної енергетики України, а також вимогам та нормам національних та міжнародних стандартів (наприклад, європейських стандартів EN 12062, EN 25817, EN 13972). Виконання операцій контролю має бути розраховане на застосування стандартних атестованих засобів вимірювань, які поширені в галузі атомної енергетики та в інших галузях економіки України та допущені до використання Держспоживстандартом України.

3. За результатами проведених експериментальних і технологічних досліджень та випробувань макетів окремих вузлів та механізмів технологічного обладнання для механізованого зварювання стиків трубних елементів спіралей ПВТ визначено та оптимізовано основні вимоги до цього обладнання та сукупність основних оптимізованих параметрів режиму зварювання MAG та MIG + MAG електродним дротом (переважно марки Св-08ГС або Св-08Г2С) з номінальним діаметром 1,0 мм. При цьому встановлено, що для отримання якісних звар-



них з'єднань трубних елементів спіралей ПВТ достатньо двох проходів зварювальної дуги.

4. Для функціонування вузлів і механізмів, які забезпечують швидке й безперешкодне встановлення, затискання і самоцентрування трубних елементів спіралей ПВТ (у стані прямих відрізків труби) перед зварюванням та їх вилучення після автоматичного завершення циклу зварювання, важливе значення має електропривод, що може містити у собі мотор-редуктор з безпечною напругою живлення (наприклад, до 27 В) та подвійним виходом силового валу і енкодер, що виробляє сталу кількість вихідних імпульсів за один повний оберт валу електродвигуна мотор-редуктора, та систему керування (регулювання швидкості обертання, тобто швидкості зварювання). Встановлено, що такий мотор-редуктор повинен мати потужність щонайменше 100 Вт та за рахунок застосування редуктора забезпечувати швидкість обертання обох прямих відрізків труби в межах від 1,0 до 7,0 обертів/хв, при цьому базою системи керування електроприводом може слугувати уніфікований модуль приводу обертача ИЦ 616.20.11.000.

5. У процесі проведення експериментально-технологічних досліджень, випробувань макетів окремих вузлів та механізмів технологічного обладнання для механізованого зварювання стиків трубних елементів спіралей ПВТ та розробки ТП також встановлено, що для функціонування вузлів і механізмів, які забезпечують швидке й безперешкодне встановлення, затискання та самоцентрування трубних елементів спіралей ПВТ (у стані прямих відрізків труби) необхідна обов'язкова наявність двопозиційного вузла підводу пальника. Цей вузол має принаймні у напівавтоматичному режимі забезпечувати в одній позиції (неробочій) таке просторове розташування пальника, яке б жодним чином не заважало швидкому й безперешкодному встановленню, затисканню та центруванню прямих відрізків труби перед їх зварюванням між собою та їх вилученню після повного завершення циклу зварювання,

а в іншій позиції (робочій) таке просторове розташування пальника, яке б відповідало технологічно вмотивованим значенням вильоту електродного дроту, напруги (довжини) дуги та зміщенню осі плавкого електроду відносно вертикалі («зеніту») для здійснення якісного процесу зварювання. З метою досягнення цього до складу конструкції двопозиційного вузла підводу пальника має входити коректор (або коректори) робочого просторового положення пальника.

6. З урахуванням результатів аналізу можливостей, побудови, показників надійності, технічних та економічних характеристик та показників наявних на ринку України кращих вітчизняних і іноземних зразків, вимог нормативних документів, які чинні в галузі атомної енергетики України, та ТЗ встановлено, що у повному обсязі виконанню завдань створення вітчизняного комплексу обладнання для механізованого зварювання трубних елементів спіралей ПВТ не відповідає жоден з цих зразків і найбільш раціональним за техніко-економічними показниками є використання зварювального джерела живлення MIG/MAG/TIG/MMA 303 інверторного типу (розробки й виробництва фірми *Tesla Weld*), яке конструктивно поєднує у собі придатне для здійснення MIG + MAG електродним дротом суцільного перерізу власне зварювальне джерело живлення та зварювальний напівавтомат MIG 303 для дугового зварювання зі стандартним механізмом подачі електродного дроту. Проте і це джерело живлення потребує доопрацювання його системи керування з метою забезпечення необхідних значень складових циклу зварювання та параметрів оптимізованої області режимів зварювання. Тому при розробці ТП та ескізного проекту стосовно зварювальної складової технологічного обладнання для механізованого зварювання стиків трубних елементів спіралей ПВТ було запропоновано та прийнято схемо-конструктивні рішення щодо доопрацювання системи керування зварювального джерела живлення MIG/MAG/TIG/MMA 303.



7. В процесі розробки ТП щодо комплексу технологічного обладнання для механізованого зварювання стиків трубних елементів спіралей ПВТ запропоновано схемотехнічне та конструктивне рішення стосовно БПЗА, які базуються на відпрацьованих раніше розробках НІЦ ЗКАЕ та дозволяють повністю задовольнити визначені в ТЗ вимоги безпеки та вимоги до системи керування зазначеного комплексу.

8. Проведення експериментально-технологічних досліджень, випробувань макетів окремих вузлів та механізмів комплексу технологічного обладнання для механізованого зварювання стиків трубних елементів спіралей ПВТ, розробка ТЗ, ТП та ескізного проекту цього комплексу та його основних складових частин забезпечують всі необхідні передумови для створення не тільки у потрібному обсязі комплектів технічної документації (з робочою конструкторською та експлуатаційною документацією включно), а й виготовлення, налагодження випробувань й передпродажного тестування промислових зразків складових вітчизняного комплексу технологічного облад-

нання для механізованого зварювання стиків елементів спіралей ПВТ енергоблоків АЕС України та впровадження цього обладнання у виробництво. В дослідженнях та відпрацьованні технологічних процесів активну й безпосередню участь взяли інженери І.В. Вертецька та М.П. Драченко, у створенні й випробуваннях макетів окремих вузлів і механізмів комплексу технологічного обладнання для механізованого зварювання стиків трубних елементів спіралей ПВТ та розробці ескізного проекту цього комплексу і його основних складових частин — інженери В.Ю. Буряк, Д.С. Оліяненко й А.О. Муха, у відпрацьованні ТЗ та ТП — інженери О.В. Ковалюк, В.Г. Притика, В.Г. Курнішов.

*Роботу виконано в рамках науково-технічного проекту НАН України у 2017 році «Відпрацювання технології механізованого зварювання плавким електродом у середовищі суміші захисних газів трубопроводів високого тиску енергоблоків АЕС та створення дослідного зразка імпортозамінюючого обладнання для реалізації цієї технології».*

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Камерон И. *Ядерные реакторы*. Москва, 1987. 320 с.
2. Широков С.В. *Фізика ядерних реакторів*. Київ, 1993. 288 с.
3. Vuongio J. *PWR Description*. Massachusetts Institute of Technology, 2010.
4. Воронин Л.М. *Особенности проектирования и сооружения АЭС*. Москва, 1980. 192 с.
5. НП — 045-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды для объектов использования атомной энергии. Москва, 2003. 49 с.
6. Марушкин В.М., Иващенко С.С., Вакуленко Б.Ф. *Подогреватели высокого давления турбоустановок ТЭС и АЭС*. Москва, 1985. 136 с.
7. Махлин Н.М., Коротынский А.Е., Богдановский В.А., Омельченко И.А., Свириденко А.А. Одно- и многопостовые системы для автоматической сварки неповоротных стыков трубопроводов атомных электростанций. *Автомат. сварка*. 2011. № 11. С. 34–44.
8. Богдановский В.А., Гавва В.М., Махлин Н.М., Чередник А.Д., Ткаченко А.В., Кудряшев В.Б., Куликов А.П., Ковалюк А.В. Применение автоматической орбитальной сварки при изготовлении поглощающих вставок контейнеров хранения отработавшего ядерного топлива. *Автомат. сварка*. 2011. № 12. С. 41–45.
9. Махлин Н.М., Попов В.Е., Федоренко Н.С., Бурба А.В., Пышный В.М., Дюков В.А., Гонтарев В.Б. Применение автоматической орбитальной сварки при изготовлении чехлов каналов нейтронных измерительных ядерных реакторов. *Автомат. сварка*. 2013. № 6. С. 29–34.
10. Лобанов Л.М., Махлин Н.М., Смоляков В.К., Свириденко А.О. Обладнання для підготування неповоротних стиків трубопроводів до зварювання. *Наука innov*. 2015. Т. 11, № 5. С. 50–67.
11. *Патент України на корисну модель № 102582*. Лобанов Л.М., Смоляков В.К., Водолазський В.Є., Махлін Н.М. Портативний пристрій для обробки торців та крайок труб при їх підготуванні до зварювання.

12. Букаров В.А. Технология дуговой автоматической сварки в защитных газах. *Сварка в атомной промышленности и энергетике: Труды НИКИМТ*. Москва, 2002. Т. 1. С. 149–210.
13. Ищенко Ю.С. Физико-технологические основы формирования швов в процессе дуговой сварки. *Сварка в атомной промышленности и энергетике: Труды НИКИМТ*. Москва, 2002. Т. 2. С. 204–240.
14. Савицкий М.М., Кушниренко Б.М., Олейник О.И. Особенности сварки сталей вольфрамовым электродом с активирующими флюсами (АТИГ-процесс). *Автомат. сварка*. 1999. № 12. С. 20–28.
15. Байич Д.Р., Савицкий М.М., Мельничук Г.М., Лупан А.Ф. Сварка АТИГ конструкционных сталей, применяемых в энергетическом оборудовании. *Автомат. сварка*. 2002. № 9. С. 35–38.
16. Байич Д.Р., Мельничук Г.М., Лупан А.Ф., Савицкий М.М. Техника и режимы аргоно-дуговой сварки сталей с активирующими флюсами. *Автомат. сварка*. 2002. № 10. С. 34–37.
17. Gordon J.R. Perspectives on welding research and development in the USA. *Weld. Review Intern.* 1995. № 9. P. 95–108.
18. Станкевич И.Я., Дмитриев В.И., Корида В.Л. и др. Применение активирующего флюса при автоматической сварке трубопроводов АЭС. *Энергетическое строительство*. 1982. № 10. С. 19–20.
19. Потапьевский А.Г. *Сварка в защитных газах плавящимся электродом*. Москва, 1974. 240 с.
20. Кононенко В.Я. *Сварка в среде защитных газов плавящимся и неплавящимся электродом*. Киев, 2007. 266 с.
21. Свединский В.Г., Римский С.Т., Галинич В.И. Сварка сталей в защитных газовых смесях на основе аргона в промышленности Украины. *Автомат. сварка*. 1994. № 4. С. 41–44.
22. Римский С.Т., Свединский В.Г., Шейко П.П., Павшук В.М., Жерносеков А.М. Импульснодуговая сварка низколегированных сталей плавящимся электродом в смеси аргона с углекислым газом. *Автомат. сварка*. 1993. № 2. С. 38–41.
23. Aichele G. Use of the pulsed technique — active gas metal — arc welding. *Schweissen und Schneiden*. 1990. № 4. P. E62–E63.
24. *Заявка а 2017 11752 від 01.12.2017*. Лобанов Л.М., Водолазський В.Є., Махлін Н.М., Коротинський О.Є., Жерносеков А.М., Попов В.Є., Скопюк М.І. Горизонтальный обертач для дугового зварювання деталей трубних конструкцій.

Стаття надійшла до редакції 07.12.17

#### REFERENCES

1. Kameron, I. (1987). *Jadernye reaktory*. Moskva. 320 s.
2. Shirokov, S.V. (1993). *Fizika jadernih reaktoriv*. Kyiv. 288 s.
3. Buongiorno, J. (2010). *PWR Description*. Massachusetts Institute of Technology.
4. Voronin, L. M. (1980). *Osobennosti proektirovaniya i sooruzheniya AJeS*. Moskva. 192 s.
5. NP — 045-03. Pravila ustrojstva i bezopasnoj jekspluatacii truboprovodov para i gorjachej vody dlja ob#ektov ispol'zovaniya atomnoj jenerгии. Moskva. 2003. 49 s.
6. Marushkin, V. M., Ivashhenko, S. S., Vakulenko B. F. (1985). *Podogrevateli vysokogo davlenija turbostanovok TJeS i AJeS*. Moskva. 136 s.
7. Makhlyn, N. M., Korotynskiy, A. E., Bohdanovskiy, V. A., Omelchenko, Y. A., Svyrydenko, A. A. (2011). Odnno- i mnogopostovoye sistemy dlja avtomaticheskoy svarki nepovorotnyh stykov truboprovodov atomnyh jelektrostantsij. *Avtomat. svarka*, 11, 34–44.
8. Bohdanovskiy, V. A., Havva, V. M., Makhlyn, N. M., Cherednyk, A. D., Tkachenko, A. V., Kudriashev, V. B., Kulykov, A. P., Kovaliuk, A. V. (2011). Primenenie avtomaticheskoy orbital'noj svarki pri izgotovlenii pogloshhajushhijh vstavok kontejnerov hranenija otrabotannogo jadernogo topliva. *Avtomat. svarka*, 12, 41–45.
9. Makhlyn, N. M., Popov, V. E., Fedorenko, N. S., Burba, A. V., Pyshnyi, V. M., Diukov, V. A., Hontarev, V. B. (2013). Primenenie avtomaticheskoy orbital'noj svarki pri izgotovlenii chehlov kanalov nejtronnyh izmeritel'nyh jadernyh reaktorov. *Avtomat. svarka*, 6, 29–34.
10. Lobanov, L. M., Mahlin, N. M., Smoljakov, V. K., Sviridenko, A. O. (2015). Obladnannja dlja pidgotuvannja nepovorotnih stikov truboprovodiv do zvarjuvannja. *Nauka innov.*, 11(5), 50–67.
11. *Patent Ukraini na korisnu model' № 102582*. Lobanov L. M., Smoljakov V. K., Vodolaz'skij V. E., Mahlin N. M. Porativnij pristrij dlja obrobki torciv ta krajok trub pri ih pidgotuvanni do zvarjuvannja.
12. Bukarov, V. A. (2002). Tehnologija dugovoj avtomaticheskoy svarki v zashhitnyh gazah. *Svarka v atomnoj promyshlennosti i jenergetike: Tr. NIKIMT*. Moskva. 1, 149–210.
13. Ishhenko, Ju. S. Fiziko- tehnologicheskie osnovy formirovaniya shvov v processe dugovoj svarki. *Svarka v atomnoj promyshlennosti i jenergetike: Tr. NIKIMT*. Moskva. 2, 204–240.

14. Savickij, M. M., Kushnirenko, B. M., Olejnik, O. I. (1999). Osobennosti svarki stalej vol'framovym jelektrodom s aktivirujushhimi fljusami (ATIG-process). *Avtomat. svarka*, 12, 20–28.
15. Bajich, D. R., Savickij, M. M., Mel'nichuk, G. M., Lupan, A. F. (2002). Svarka ATIG konstrukcionnyh stalej, primenjaemyh v jenergeticheskom oborudovanii. *Avtomat. svarka*, 9, 35–38.
16. Bajich, D. R., Mel'nichuk, G. M., Lupan, A. F., Savickij, M. M. (2002). Tehnika i rezhimy argono-dugovoj svarki stalej s aktivirujushhimi fljusami. *Avtomat. svarka*, 10, 34–37.
17. Gordon, J. R. (1995). Perspectives on welding research and development in the USA. *Weld. Review Intern.*, 9, 95–108.
18. Stankevich, I. Ja., Dmitriev, V. I., Korida, V. L. i dr. (1982). Primenenie aktivirujushhego fljusa pri avtomaticheskoi svarke truboprovodov AJeS. *Jenergeticheskoe stroitel'stvo*, 10, 19–20.
19. Potap'evskij, A. G. (1974). *Svarka v zashhitnyh gazah plavjashhimsja jelektrodom*. Moskva. 240 s.
20. Kononenko, V. Ja. (2007). Svarka v srede zashhitnyh gazov plavjashhimsja i neplavjashhimsja jelektrodom. Kyiv. 266 s.
21. Svecinskij, V. G., Rimskij, S. T., Galinich, V. I. (1994). Svarka stalej v zashhitnyh gazovyh smesjah na osnove argona v promyshlennosti Ukrainy. *Avtomat. svarka*, 4, 41–44.
22. Rimskij, S. T., Svecinskij, V. G., Shejko, P. P., Pavshuk, V. M., Zhernosekov, A. M. (1993). Impul'snodugovaja svarka nizkolegirovannyh stalej plavjashhimsja jelektrodom v smesi argona s uglekislym gazom. *Avtomat. svarka*, 2, 38–41.
23. Aichele, G. (1990). Use of the pulsed technique – active gas metal – arc welding. *Schweissen und Schneiden*, 4: E62–E63.
24. *Zajavka a 2017 11752* vid 01.12.2017. Lobanov L. M., Vodolazs'kij V.Є., Mahlin N. M., Korotins'kij O. Є., Zhernosekov A. M., Popov V. Є., Skopjuk M. I. Gorizonta'l'nij obertach dlja dugovogo zvarjuvannja detalej trubnih konstrukcij.

Received 07.12.17

Lobanov, L.M.<sup>1</sup>, Makhlin, N.M.<sup>2</sup>, Vodolazskij, V.Ye.<sup>2</sup>, Korotynskij, O.Ye.<sup>1</sup>,  
Zhernosekov, A.M.<sup>1</sup>, Popov, V.Ye.<sup>2</sup>, Skopiuk, M.I.<sup>1</sup>, Lavrov, S.I.<sup>3</sup>, and Kudriashev, V.B.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Paton Electric Welding Institute, the NAS of Ukraine, 11, K. Malevich St., Kyiv, 03680, Ukraine,  
+380 44 200 2455, +380 44 205 2036, office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup> Research and Engineering Center for Welding and Control in the Field of Power Engineering  
of Ukraine under Paton Electric Welding Institute, the NAS of Ukraine,  
11, K. Malevich St., Kyiv, 03680, Ukraine,  
+380 44 287 1066, +380 44 287 3019, electro@paton.kiev.ua

<sup>3</sup> Separated Structural Unit of Atomenergoproekt of Enerhoatom NAEC  
(Atomenergoproekt Manufacturing Corporation),  
P.O.B. 306, Enerhodar, Zaporizhia Oblast, 71503, Ukraine,  
+380 6139 6 4701, +380 6139 6 4648, lavrov@aem.zp.ua

#### STATE-OF-THE-ART UKRAINIAN EQUIPMENT FOR MACHINE WELDING OF HIGH-PRESSURE PIPELINES OF THE SECOND LOOP OF NPP UNITS OF UKRAINE

**Introduction.** High-pressure heaters (HPH) are principal components of the second loop of nuclear reactors with pressured water. HPH coils are used to heat water up to required temperature with its further supply to heat exchanger, steam generator (SG). Steam generated by SG is fed to turbines and triggers power generators of NPP unit.

**Problem Statement.** The main factor that significantly constraints the performance of weld joints of HPH coil tubeworks while manufacturing and repairing and causes their defects is manual TIG welding method (hereinafter referred to as the TIG method) that has been used in the domestic practice so far.

**Purpose.** To study ways of raising efficiency and performance of weld joints of HPH coil tubeworks and improving their stability and quality, as well as to develop domestic equipment for implementation of elaborated techniques.

**Materials and Methods.** Steel 20 simulators of HPH tubeworks have been used for the purpose of the study. The used methods are as follows: mathematical and computer simulation full-scale modelling, trial welding, nondestructive and destructive control techniques, and CAD.

**Results.** The use of various arc welding techniques for welding HPH coil tubeworks has been studied, the most optimal method of them, the most effective parameters of welding regimes, and requirements for domestic welding equipment have been identified, technical specifications for the equipment and its main components and respective research and pre-design works have been developed, innovative technical proposals concerning its composition, configuration, structure, and other technical solutions have been elaborated.

**Conclusions.** MIG + MAG welding method with the use of fused electrode (solid-section electrode wire) in protective gases mix has been established to be the most effective and cost-efficient in terms of compliance with the requirements of

applicable norms and standards and approved technical specifications with respect to quality and performance of weld joints of НРН coil tubeworks made of steel 20. Manufacturing processes for the design solutions on the major functional nodes and mechanisms of the equipment for implementing the mentioned method have been developed and approved.

*Keywords:* НРН, НРН coils, machine welding, and welding manipulator.

Л.М. Лобанов<sup>1</sup>, Н.М. Махлин<sup>2</sup>, В.Є. Водолазский<sup>2</sup>, А.Е. Коротинский<sup>1</sup>,  
А.М. Жерносеков<sup>1</sup>, В.Є. Попов<sup>2</sup>, М.И. Скоток<sup>1</sup>, С.И. Лавров<sup>3</sup>, В.Б. Кудряшев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины,  
ул. К. Малевича, 11, Киев, 03680, Украина,  
+380 44 200 2455, +380 44 205 2036, office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup> ГП «Научно-инженерный центр сварки и контроля в отрасли атомной энергетики Украины  
Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины»,  
ул. К. Малевича, 11, Киев, 03680, Украина,  
+380 44 287 1066, +380 44 287 3019, electro@paton.kiev.ua

<sup>3</sup> Обособленное подразделение «Атомэнергомаш» ГП «НАЭК «Энергоатом»  
(ОП «Атомэнергомаш»), а/я 306, Энергодар, Запорожская обл., 71503, Украина,  
+380 6139 6 4701, +380 6139 6 4648, lavrov@aem.zp.ua

#### СОВРЕМЕННОЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ ТРУБОПРОВОДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ВТОРОГО КОНТУРА ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС УКРАИНЫ

**Введение.** Принципиально необходимыми составляющими второго контура ядерных энергетических реакторов с водой под давлением являются подогреватели высокого давления (ПВД). Спирали ПВД предназначены для подогрева питательной воды до необходимой температуры с последующей подачей ее на теплообменник — парогенератор (ПГ). Образующийся в ПГ пар поступает в турбину, приводящую в действие электрогенераторы энергоблока АЭС.

**Проблематика.** Важным фактором, существенно ограничивающим производительность создания сварных соединений трубных элементов спиралей ПВД при их производстве и ремонте и вызывающих образование в них дефектов, является способ их сварки, доньше применяемый в отечественной практике — способ ручной сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов (далее — TIG) с подачей присадочной проволоки.

**Цель.** Исследование способов повышения производительности сварки соединений трубных элементов спиралей ПВД и уровня стабильности их качества, а также разработки современного отечественного технологического оборудования для внедрения отработанных процессов.

**Материалы и методы.** Для выполнения исследований использовались образцы — имитаторы трубных элементов спиралей ПВД из стали 20. Использовались методы математического и компьютерного моделирования, натурно-макетирования, опытных сварок, неразрушающего и разрушающего контроля, машинного проектирования.

**Результаты.** Исследована возможность применения разных способов дуговой сварки соединений трубных элементов спиралей ПВД, определен наиболее оптимальный из них, а также установлены максимально эффективные параметры режимов сварки и технических требований к отечественному комплексу технологического оборудования для выполнения этого процесса, разработано техническое задание (ТЗ) на выполнение опытно-конструкторских работ по эскизному проектированию такого комплекса и его основных составных частей, наработаны инновационные технические предложения (ТП) в отношении их состава, построения, конструктивных и других технических решений.

**Выводы.** Установлено, что для удовлетворения действующих требований нормативных документов, и согласованного и утвержденного ТЗ касательно качества и производительности выполнения сварных соединений трубных элементов спиралей ПВД со стали 20 наиболее эффективным и рациональным является способ многопроходной сварки MIG + MAG плавящимся электродом (электродной проволокой сплошного сечения) в среде смеси защитных газов (аргон — 80–85 %, углекислый газ — 15–20 %). Разработаны и согласованы ТП по схемно-конструктивным решениям построения функциональных узлов и механизмов оборудования для реализации этого способа.

*Ключевые слова:* ПВД, спирали ПВД, механизированная сварка, сварочный вращатель.