

**Н.М. Махлін<sup>1</sup>, О.Є. Коротинський<sup>1</sup>, А.О. Свириденко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

<sup>2</sup> ПАТ «ЧЕЗАРА», Чернігів

## **АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ КОМПЛЕКСИ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО ЗВАРЮВАННЯ НЕПОВОРОТНИХ СТИКІВ ТРУБОПРОВІДІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**



*Наведено результати доробку ІЕЗ ім. Є.О. Патона по створенню вітчизняних зразків обладнання з елементами адаптивного керування для автоматичного зварювання неповоротних стиків трубопроводів при монтажі і ремонті енергоблоків атомних та теплових електростанцій, в суднобудуванні, хімічному машинобудуванні, на підприємствах нафтогазового комплексу та в інших галузях промисловості.*

*Ключові слова: неповоротні стики трубопроводів, автоматичне орбітальне зварювання, неплавкий електрод, присадковий дріт, системи керування.*

При монтажі і ремонті енергоблоків атомних електростанцій (АЕС) зварювання стиків трубопроводів є найбільш складним, відповідальним та трудомістким технологічним процесом, до чого долучаються ще й тіснота в місцях проведення зварювальних робіт та обмеженість доступу до трубопроводів.

В процесі роботи на АЕС трубопроводи зазнають впливу (в більшості випадків — одночасного) високих температур, підвищеного тиску, корозійної і радіаційної активності теплоносія та інших середовищ. Залежність надійності та безпеки енергоблоків АЕС від стану трубопроводів, а також складність умов їх експлуатації обумовлюють високі вимоги до якості, службових властивостей і корозійної стійкості зварних з'єднань таких трубопроводів [1–3]. Трудовитрати на зварювання переважно неповоротних стиків трубопроводів складають до 40 % усіх трудовитрат на монтаж АЕС та до 60 %

загальних трудовитрат на зварювальні роботи при монтажі енергоблоків. Основний обсяг робіт (до 80 %) припадає на зварювання стиків трубопроводів, діаметр яких менше 159 мм. До 60 % від загальної кількості стиків складають стики трубопроводів з аустенітних сталей [4–7].

Для отримання зварних з'єднань трубопроводів енергоблоків АЕС використовують способи ручного аргонодугового зварювання з додаванням присадкового дроту (ручного ТІГ-зварювання) та ручного дугового зварювання плавкими електродами з покриттям (ММА-зварювання), а також автоматичного орбітального зварювання неплавким електродом у середовищі інертних газів (GTAW-зварювання). Через низку чинників основними методами зварювання в монтажних умовах неповоротних стиків трубопроводів енергоблоків АЕС є реакторами типу ВВЭР донині залишаються способи ручного ТІГ- і ММА-зварювання [1, 4–6].

Способам ручного ТІГ- та ММА-зварювання притаманна певна технологічна гнучкість, проте вони не забезпечують необхідної продуктив-

ності (напр., машинний час при ручному TIG-зварюванні зазвичай складає не більше 20 %) і стабільності відповідності вимогам до якості зварних з'єднань трубопроводів (рівень дефектності стиків при здаванні з першого пред'явлення складає від 15 до 45 %). Крім того, при монтажі енергоблоків АЕС ручні способи зварювання вимагають великої кількості зварників високої кваліфікації. Виконання вимог, яким повинні задовольняти зварні з'єднання трубопроводів, ускладнюється ще й тим, що через особливості та умови монтажу і ремонту енергоблоків АЕС для реалізації процесів ручного TIG- і MMA-зварювання здебільшого застосовують багатопостові зварювальні системи (БЗС). В таких системах енергозабезпечення індивідуальних зварювальних постів, в яких для регулювання зварювального струму використовують баластні реостати, здійснюється від магістральних розводок з напругою неробочого ходу не більше 80 В. Крім низької енергоефективності подібних БЗС (їх ККД при MMA-зварюванні не перевищує 45 %, а при TIG-зварюванні – 23 %) суттєвими недоліками БЗС з баластними реостатами є взаємний вплив індивідуальних зварювальних постів при їх одночасній роботі і дуже значна залежність зварювального струму від коливань напруги мережі живлення багатопостового зварювального випрямляча, падіння напруги в магістральних розводках та змін довжини дугового проміжку.

На відміну від ручного TIG-зварювання спосіб автоматичного орбітального зварювання неплавким електродом (GTAW) дозволяє забезпечувати стабільно високу якість і експлуатаційну надійність зварних з'єднань трубопроводів (при GTAW-зварюванні без присадкового дроту рівень дефектності при здаванні з першого пред'явлення не перевищує 4 %, з присадковим дротом – 7 %), підвищення щонайменше в 4 рази продуктивності зварювальних робіт, значне скорочення тривалості навчання оператора автоматичного зварювання (кілька місяців) у порівнянні з тривалістю підготовки

висококваліфікованого зварника ручного TIG-зварювання (декілька років) [1, 4–7].

З урахуванням масштабів розвитку атомної енергетики шляхом модернізації та подовження ресурсу діючих і будівництва нових енергоблоків АЕС з реакторами типу ВВЕР застосування GTAW-зварювання для виконання більше 120 000 зварних з'єднань трубопроводів на кожному енергоблоці видається як безальтернативне. Проте досі рівень автоматизації процесів зварювання монтажних стиків трубопроводів енергоблоків АЕС з реакторами типу ВВЕР вкрай низький, що пояснюється, зокрема, відсутністю або недокомплектном сучасного вітчизняного обладнання для GTAW-зварювання. Наразі ринок пропонує обладнання для GTAW-зварювання виробництва фірм з країн далекого зарубіжжя, яке має високу вартість і вимагає значних експлуатаційних витрат. При цьому, на думку провідних фахівців у сфері автоматичного зварювання, це обладнання помітно поступається навіть орбітальним автоматам, що раніше (у 70-і – 90-і роки минулого сторіччя) серійно вироблялись за розробками НІКІМТ'у як по ресурсу машинного часу, адаптованості до розмірів та міжтрубних відстаней трубопроводів вітчизняних енергоблоків, ремонтпридатності складових частин автоматів, так і по можливості реалізації ефективних способів зварювання стиків тонкостінних трубопроводів методами автоопресування та послідовного проплавлення, які вже давно і успішно застосовуються в Росії і Україні [1, 8, 9].

З аналізу викладених вище обставин випливає висновок, що розробка вітчизняних технологій та створення і освоєння промислового виробництва сучасного вітчизняного обладнання для GTAW-зварювання стиків трубопроводів, особливо малих діаметрів (до 219 мм), та оснащення таким обладнанням монтажних організацій і ремонтних підрозділів АЕС є досить актуальною задачею.

Значну частину цієї задачі дає можливість вирішити обладнання для GTAW-зварювання стиків трубопроводів діаметром від 7 до 76 мм з

товщиною стінки до 4,0 мм зі сталей аустенітного або перлітного класів та високолегованих сплавів — орбітальні автомати АДЦ 627 УЗ.1, АДЦ 625 УЗ.1 та АДЦ 626 УЗ.1, яке було розроблено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона в 2008 р. [10]. Відтоді почалося оснащення цими автоматами підприємств галузі атомної енергетики та ремонтних підрозділів АЕС. Прикладом успішного застосування автоматів цієї серії слугує їх використання для GTAW-зварювання у середовищі гелію герметизуючих з'єднань труби з наконечником та заглушкою при серійному виробництві у ВП «Атоменергомаш» ДП НАЕК «Енергоатом» поглинаючих елементів (ПЭЛ) для контейнерів системи сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива (СХОЯТ), а також для GTAW-зварювання у ВП «Енергоефективність» ДП НАЕК «Енергоатом» з'єднань деталей чохлів каналів нейтронних вимірювальних ядерних реакторів типу ВВЕР-1000 [11, 12].

Протягом 2010—2012 років в ІЕЗ ім. Є.О. Патона і його спеціалізованому підрозділі ДП «Науково-інженерний центр зварювання та контролю в галузі атомної енергетики України Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України» (НІЦ ЗКАЕ) були проведені дослідження, пошукові та дослідно-конструкторські і дослідно-технологічні роботи у напрямках:

- ✦ вивчення фізико-технологічних особливостей процесів автоматичного TIG-зварювання неповоротних стиків трубопроводів діаметром 76—219 мм з товщиною стінки до 12 мм та дослідження впливу параметрів процесів GTAW-зварювання з присадковим дротом на якість цих зварних з'єднань;
- ✦ пошук та визначення закономірностей, методів та засобів адаптивного керування технологічними процесами GTAW-зварювання і виконавчим обладнанням для його реалізації;
- ✦ розробка і оптимізація вимог до кожної осі адаптивного керування виконавчим обладнанням, а також формою зварного шва в залежності від просторового положення електрода, напрямку його переміщення, матеріа-

лу, діаметра, товщини стінок та типу розкриття крайок стиків трубопроводів;

- ✦ відпрацювання і оптимізація режимів та технологічних прийомів GTAW-зварювання з присадковим дротом неповоротних стиків трубопроводів діаметром 76—219 мм з товщиною стінки до 12 мм;
- ✦ розробка і відпрацювання схемотехнічних і конструктивних рішень та технічної документації на дослідні зразки обладнання для GTAW-зварювання з присадковим дротом неповоротних стиків трубопроводів діаметром 76—219 мм;
- ✦ розробка програмного забезпечення, виготовлення, налагодження та випробування дослідних зразків системи керування та виконавчого обладнання для GTAW-зварювання з присадковим дротом неповоротних стиків трубопроводів діаметром 76—219 мм з товщиною стінки до 12 мм.

В процесі проведення досліджень і дослідно-технологічних робіт, крім широко відомих стандартних лабораторних методів (металографічні дослідження, механічні випробування, спектральний аналіз, випробування на стійкість до міжкристалітної корозії тощо), застосовувалися методи математичного та комп'ютерного моделювання з використанням інтегрованих пакетів Матлаб [13], що дають можливість оперувати засобами штучного інтелекту, у тому числі на основі штучних нейронних мереж, евристичного програмування та нечіткої логіки. Також застосовувалися методи графічного програмування з використанням інтегрованих пакетів Lab VIEW та комп'ютерні системи САД/САЕ.

У результаті виконання зазначених дослідно-конструкторських робіт, при проведенні яких використовувалися методи комп'ютерного моделювання, макетування та випробувань окремих вузлів, блоків і механізмів, а також машинного проектування, в НІЦ ЗКАЕ розроблено автомати АДЦ 628 УХЛ4 та АДЦ 629 УХЛ4 для орбітального зварювання трубопроводів з товщиною стінки до 12 мм, створені, випробувані та відпрацьовані їх дослідні зраз-

ки, основні технічні характеристики яких наведено у таблиці.

Кожен з розроблених автоматів для орбітального зварювання є апаратно-програмним комплексом, що містить у собі джерело зварювального струму з крутоспадними («вертикальними») зовнішніми вольт-амперними характеристиками (ВАХ); систему керування на базі спеціалізованих контролерів, аналого-цифрових пристроїв та персонального комп'ютера (ПК); головку зварювальну з виконавчими механізмами, які приводяться до дії за допомогою мотор-редукторів постійного струму; блок (механізм) подавання присадкового дроту; блок (станцію) автономного охолодження.

Структурна схема апаратної частини розроблених автоматів для орбітального TIG-зварювання неповоротних стиків трубопроводів наведена на рис. 1.

Достеменно відомо [9, 14], що для одержання якісних зварних з'єднань при GTAW-зварюванні неповоротних стиків трубопроводів

необхідно застосовувати джерела зварювального струму (ДЗС), які мають крутоспадні ВАХ, широкий діапазон (щонайменше 30-кратний) регулювання зварювального струму, високі динамічні якості, здатність забезпечувати безконтактне збудження дуги при низькому (5–10 А) значенні зварювального струму, стабілізацію зварювального струму при зовнішніх збуреннях, виконання характерних для GTAW-зварювання циклів зварювання у режимах 2Т і 4Т, керування подаванням захисного газу (переважно аргону) у зону зварювання. Крім цього, ДЗС для GTAW-зварювання повинні забезпечувати формування напруг постійного та змінного струмів, необхідних для функціонування складових частин обладнання для GTAW-зварювання — системи керування, виконавчих механізмів тощо.

Зазначеним вимогам найбільше відповідають як ДЗС інверторного типу, так і ДЗС «чопперного» типу, які досить поширені у світовому зварювальному виробництві протягом остан-

Найменування параметра	Значення	
	Позначення автомата	
	АДЦ 628 УХЛ4	АДЦ 629 УХЛ4
Діаметр труб, що зварюються, мм	76–114	114–159
Найменша міжтрубна відстань, мм	160	180
Межі регулювання швидкості зварювання, м/год	(1,7–33,9; 4,0–79,0)	(4,0–39,6; 7,2–71,6)
Діаметр вольфрамового електрода (марки ВЛ, ВИ або ВТ), мм	3,0; 4,0	
Найбільше радіальне переміщення пальника, мм	35,5	
Найбільше переміщення пальника впоперек стику, мм	±12,0	
Охолодження пальника	рідинне	
Межі регулювання зварювального струму, А	8–250	
Межі регулювання напруги дуги, В	6–20	
Точність підтримання зварювального струму, %, не гірше	±2	
Точність підтримання напруги дуги, В, не гірше	±0,15	
Найбільша швидкість переміщення пальника відносно механізму АРНД, мм/с	10,0	
Розташування електроприводу обертання планшайби	Паралельне до осі труби	
Маса головки зварювальної (без маси шлангів й кабелів), кг, не більше	13,5	16,0
Електрична потужність, що споживається автоматом, кВА, не більше	6,0	

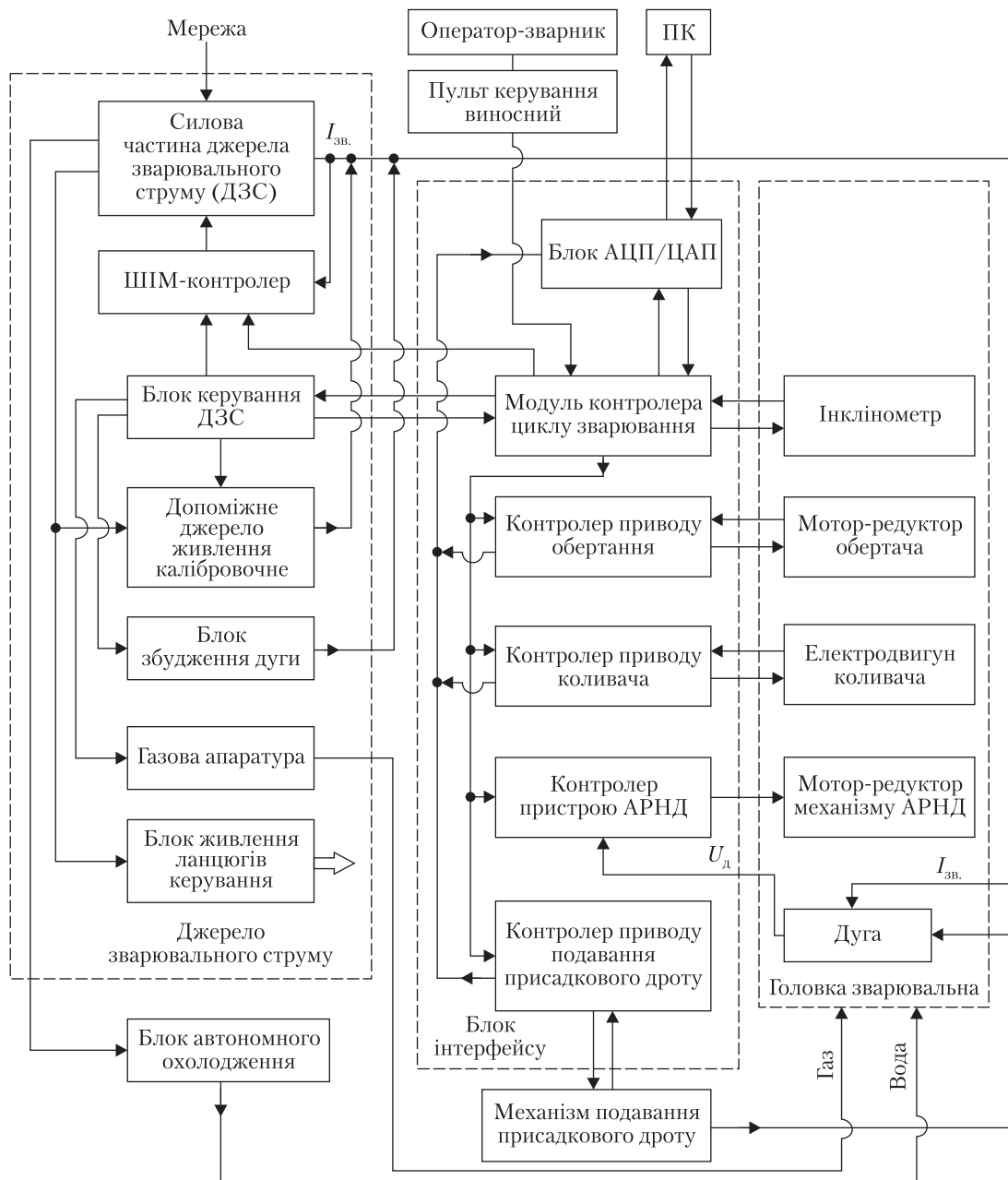


Рис. 1. Структурна схема апаратної частини комплексу обладнання для GTAW-зварювання з подаванням присадкового дроту

ніх (10–15) років завдяки досягненням сучасної силової електроніки та засобів керування. За час впровадження ДЗС інверторного типу у зварювальне виробництво поряд з перевагами проявились і їх вади, головними з яких є недо-

статня надійність і низька ремонтоздатність ДЗС цього типу порівняно з тиристорними ДЗС.

Одним з найбільш ефективних способів усунення недоліків і вад, притаманних джерелам інверторного типу, є така побудова ДЗС, за якої

керування (регулювання) зварювальним струмом здійснюється за допомогою перетворювача постійного струму «чопперного» типу (конвертора DC–DC) у вторинному контурі силового випрямляча, котрий не регулюється, має жорстку зовнішню ВАХ і гальванічно відокремлений від мережі живлення за допомогою мережевого трансформатора.

Конвертору DC–DC знижуючого типу властива тільки одна стадія перетворення, що здійснюється за низьких значень вхідної напруги (не більше 90 В) і напруги комутаційних перенавантажень (не більше 100 В), що обумовлює відсутність чинників зниження надійності, прияманних ДЗС інверторного типу. Робоча частота перемикачів силового транзисторного ключа конвертора складає щонайменше 18 кГц, що забезпечує таку ж швидкодію тракту керування, яку мають ДЗС інверторного типу і внаслідок цього такі ж можливості по стабілізації та діапазону регулювання параметрів режиму зварювання. Це дозволяє підтримувати запрограмовані значення параметрів режиму зварювання при коливаннях вхідної напруги (напр., в межах від 50 до 90 В) або інших зовнішніх збуреннях (напр., при коливаннях довжини зварювальної дуги).

Іншою важливою особливістю конверторів DC–DC знижуючого типу є їх нечутливість до змін опору навантаження у діапазоні від неробочого ходу до короткого замикання, при цьому в останньому випадку силовий транзисторний ключ, за допомогою якого здійснюється керування зварювальним струмом, має незначні струмові навантаження, що вигідно відрізняє режим його роботи від режимів роботи силових ключів зварювальних інверторів при короткому замиканні у навантаженні.

З урахуванням особливостей ДЗС «чопперного» типу, досвіду їх розробки, виготовлення та промислової експлуатації як ДЗС для функціонування складових частин автоматів АДЦ 628 УЗ.1 і АДЦ 629 УЗ.1 для GTAW-зварювання трубопроводів діаметром (76–219) мм з товщиною стінки до 12 мм було використано

джерело живлення ИЦ 617 УЗ.1 типу УДГ-257 УЗ.1, створеного на базі джерела живлення ИЦ 616 УЗ.1 типу УДГ-256 УЗ.1, застосовуваного у складі орбітальних комплексів для автоматичного ТІГ-зварювання неповоротних стиків трубопроводів діаметром 8–76 мм.

Джерело живлення ИЦ 617 УЗ.1 типу УДГ-257 УЗ.1 забезпечує:

- ✦ безконтактне збудження зварювальної дуги;
- ✦ виконання циклу зварювання в режимах 2Т, 4Т та 4Т-І;
- ✦ плавне зростання зварювального струму;
- ✦ плавне спадання зварювального струму у прикінцевій стадії зварювання;
- ✦ функціонування у режимі зварювання модульованим струмом;
- ✦ попереднє (до зварювання) встановлення значення зварювального струму;
- ✦ керування роботою газової апаратури (відсікача газу та давача витрат газу), а відтак й газовою складовою циклу зварювання;
- ✦ генерацію напруг живлення, необхідних для функціонування складових частин орбітального комплексу;
- ✦ функціонування допоміжного джерела живлення (відсутнього у джерелі живлення ИЦ 616 УЗ.1 типу УДГ-256 УЗ.1) для здійснення автоматичного визначення амплітуди коливання електрода пальника головки зварювальної, а також автоматичного визначення опору зварювального контуру з метою забезпечення належної точності автоматичного регулювання напруги дуги.

Крім того, схемотехнічні рішення джерела живлення ИЦ 617 УЗ.1 типу УДГ-257 УЗ.1 передбачають можливість як місцевого, так і дистанційного вмикання/вимикання циклу зварювання та дистанційного (у тому числі програмного) керування складовими цього циклу, що викликало необхідність суттєвого доопрацювання та модернізації тракту керування джерела живлення ИЦ 616 УЗ.1 типу УДГ-256 УЗ.1.

Зовнішній вигляд джерела живлення ИЦ 617 УЗ.1 наведено на рис. 2.

Система керування (СК) розробленого обладнання для GTAW-зварювання розрахована на спільну роботу зі спеціалізованим джерелом живлення ИЦ 617 УЗ.1 типу УДГ-257 УЗ.1 та виконавчими механізмами зварювальних автоматів АДЦ 628 УХЛ4 та АДЦ 629 УХЛ4 і призначена для керування їх функціонуванням для здійснення процесів GTAW-зварювання з додаванням присадкового дроту неповоротних стиків з U-подібним розкриттям крайок трубопроводів (переважно із сталей аустенітного класу) діаметром від 76 до 219 мм з товщиною стінки до 12 мм включно відповідно до запрограмованих алгоритмів процесів зварювання та значень параметрів циклу і режимів зварювання.

СК забезпечує:

- ✦ два різновиди функціонування зварювальних автоматів — налагодження та зварювання;
- ✦ два способи керування технологічними процесами та роботою складових частин зварювальних автоматів, тобто керування вручну і автоматичне;
- ✦ три різновиди (та варіанти їх виконання) режимів зварювання, у т.ч. зварювання сталим (безперервним) струмом, крокоімпульсне зварювання та зварювання з модуляцією зварювального струму чи швидкості зварювання або ж того і іншого одночасно;
- ✦ програмування та гарантоване відтворення і підтримання у процесі зварювання запрограмованих параметрів циклу і режимів зварювання при виконанні кореневих швів, «гарячого» проходу, заповнюючих та лицювального швів у всіх просторових положеннях електрода пальника.

Інноваційними особливостями розробленого обладнання для GTAW-зварювання і зокрема СК є можливості здійснення автоматичного визначення опору зварювального контуру з метою забезпечення належної точності автоматичного регулювання напруги дуги, а також автоматичного визначення амплітуди коливання електрода пальника головки зварювальної, тобто автоматичного калібрування, яке здійс-



Рис. 2. Джерело живлення ИЦ 617 УЗ.1 типу УДГ-257 УЗ.1

нюється при функціонуванні зварювальних автоматів у режимі налагодження [15–17].

До складу СК входять блок інтерфейсу АДЦ 628.20.00.000, пульт керування виносний АДЦ 628.30.00.000 та персональний комп'ютер.

Блок інтерфейсу (БІ) призначено для:

- ✦ формування сигналів керування вмиканням/вимиканням і тривалістю функціонування складових частин і механізмів автомата для GTAW у відповідності до запрограмованих алгоритмів здійснення автоматичного TIG-зварювання неповоротних стиків трубопроводів;
- ✦ забезпечення функціонування електроприводів обертача, коливача електрода, механізму подавання присадкового дроту, пристрою автоматичного регулятора напруги дуги (АРНД);
- ✦ забезпечення регулювання, обробки сигналів зворотних зв'язків та підтримки в процесі зварювання запрограмованих значень зварювального струму, довжини дугового проміжку (напруги дуги), швидкості зварювання (швидкості обертання планшайби головки зварювальної), амплітуди та частоти ко-

ливань електрода пальника та тривалості його затримок на крайках U-подібного розкриття стику трубопроводу;

- ✦ формування та автоматичного перетворення аналогових та аналого-цифрових сигналів, що є носіями інформації про поточні значення параметрів циклу зварювання та стан складових частин обладнання для GTAW-зварювання, в суто цифрові сигнали, які через швидкісний USB-канал надходять до відповідного USB-порту персонального комп'ютера (ПК), а також автоматичного зворотного перетворення цифрових сигналів, що надходять з ПК, в аналогові та аналого-цифрові;
- ✦ автоматичної зміни значень параметрів циклу зварювання (зварювального струму, швидкості обертання електрода і амплітуди та швидкості його коливань) в залежності від просторового положення електрода пальника відносно вектора гравітації, напрямку обертання електрода навколо трубопроводу, що зварюється, а також від стадії циклу зварювання.

БІ містить у собі контролери циклу зварювання, приводу обертача, приводу механізму подавання присадкового дроту, приводу коливача електрода та пристрою автоматичного регулювання напруги дуги (АРНД), а також модуль вводу/виводу (аналого-цифровий перетворювач).

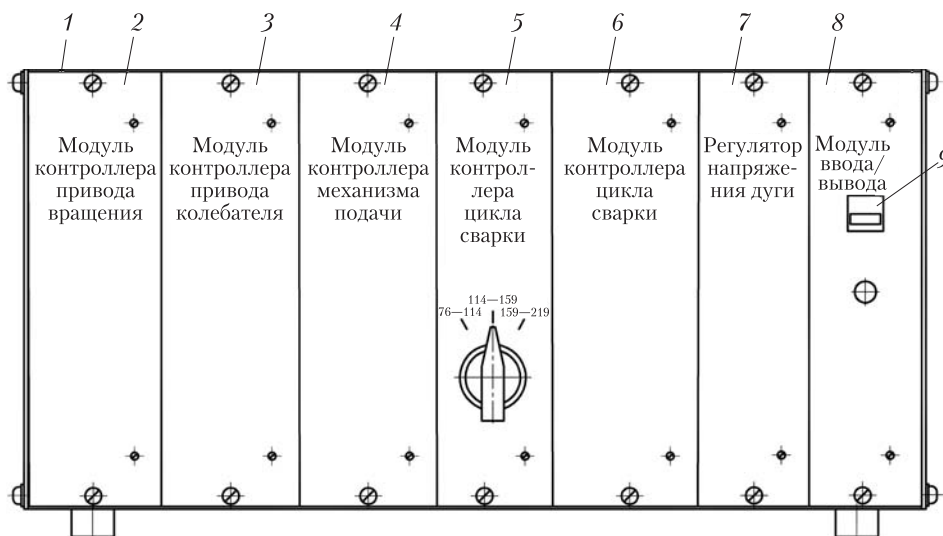
Контролер циклу зварювання (далі КЦЗ) забезпечує:

- ✦ роботу пульта керування виносного при всіх різновидах функціонування зварювальних автоматів (налагодження та зварювання), способах керування технологічними процесами та роботою складових частин зварювальних автоматів (тобто способах керування вручну і автоматичного), різновидах (та варіантах їх виконання) режимів зварювання, у тому числі зварювання сталим (безперервним) струмом, крокоімпульсне зварювання та зварювання з модуляцією зварювального струму чи швидкості зварювання або ж того і іншого одночасно;

- ✦ формування сигналів керування вмиканням/вимиканням і тривалістю функціонування складових частин і механізмів обладнання для GTAW-зварювання у відповідності до запрограмованих алгоритмів здійснення автоматичного TIG-зварювання неповоротних стиків трубопроводів;
- ✦ регулювання та підтримку в процесі зварювання запрограмованих значень параметрів циклу зварювання в залежності від діаметра і матеріалу трубопроводу, товщини його стінки та просторового положення електрода пальника відносно вектора гравітації;
- ✦ підтримку в процесі зварювання запрограмованих значень амплітуди та частоти коливань електрода уперек зварного шва та інтервалів часу затримки електрода на крайках стикового з'єднання в залежності від матеріалу, товщини стінки та геометрії розкриття стику (переважно U-подібного типу);
- ✦ первісну обробку сигналів, що відбивають поточні значення параметрів циклу зварювання, та сигналів зворотних зв'язків, а також нормування цих сигналів за рівнями, динамічний діапазон яких має відповідати регламентованому діапазону рівнів вхідних сигналів аналого-цифрового перетворювача (АЦП);
- ✦ зв'язок (за допомогою АЦП і ЦАП) об'єктів керування (складових частин і механізмів обладнання для GTAW) з персональним комп'ютером.

Контролери приводів обертача, механізму подавання присадкового дроту та коливача електрода виконано за аналогічними схемотехнічними та конструктивними рішеннями, що значно полегшує їх виготовлення, налагодження та обслуговування в процесі експлуатації. Передбачено, що ці контролери забезпечують функціонування реверсивних приводів зазначених виконавчих механізмів головок зварювальних у відповідності до алгоритмів, що програмуються стосовно конкретних діаметрів, матеріалів, товщини стінки трубопроводів та типу розкриття їх неповоротних стиків. Контролер пристрою АРНД призначено для керування мо-





**Рис. 3.** Блок інтерфейсу АДЦ 628.20.00.000: 1 – корпус; 2 – модуль контролера привода обертавання; 3 – модуль контролера привода коливача; 4 – модуль контролера привода механізму подавання присадкового дроту; 5, 6 – модулі контролера циклу зварювання; 7 – регулятор напруги (довжини) дуги; 8 – модуль вводу/виводу; 9 – USB-розетка

тор-редуктором механізму автоматичного регулятора напруги дуги з метою забезпечення підтримування у процесі зварювання сталої довжини дугового проміжку за рахунок автоматичної компенсації її відхилень від запрограмованого значення шляхом корекції положення електрода головки зварювальної автомата GTAW відносно виробу, що зварюється, відповідно до відхилень напруги зварювальної дуги.

Основою модуля вводу/виводу БІ є універсальний зовнішній модуль АЦП/ЦАП, сумісний з шиною USB 2.0, типу E14 – 440D розробки і виробництва фірми «L-Card». Цей зовнішній модуль АЦП/ЦАП особливо зручний для створення портативних вимірювальних систем на базі ноутбуку, має програмно-кероване налагодження параметрів збирання даних: кількості та послідовності опитування вхідних каналів, діапазонів вимірювання, частоти перетворення АЦП. Можлива синхронізація збирання даних по зовнішньому синхросигналу або ж за рівнем вхідного сигналу. Додатково наявні цифрові входи та виходи, а також передбачена наявність двоканального ЦАП. Застосування цифрового сигнального проце-

сора і можливість завантаження прикладних програм дозволяють реалізовувати різноманітні функціональні алгоритми та спеціалізовані режими роботи модуля E14–440D.

Зовнішній вигляд блока інтерфейсу АДЦ 628.20.00.000 наведено на рис. 3.

Пульт керування виносний АДЦ 628.30.00.000 дає можливість:

- ✦ формувати для кожного проходу сигнали вибору виду функціонування обладнання для GTAW-зварювання (налагодження або зварювання); сигнали вибору способу керування (ручне або автоматичне); сигнали вибору способу зварювання (з програмуванням значень зварювального струму в залежності від просторового положення неплавкого електрода при незмінних значеннях швидкості зварювання, з програмуванням значень швидкості зварювання в залежності від просторового положення неплавкого електрода при незмінних значеннях зварювального струму; з програмуванням значень зварювального струму і швидкості зварювання в залежності від просторового положення неплавкого електрода, методом крокоіпульсного зварюван-



Рис. 4. Пульти керування виносний АДЦ 628.30.00.000

ня або зварювання з модуляцією зварювального струму); сигнали вибору виду зварного шва (кореневий, «гарячий прохід», заповнюючий або лицювальний);

- ✦ попередньо встановлювати окремі значення кожного з параметрів процесу GTAW-зварювання зі здійсненням їх світлової та цифрової індикації в безпосередніх одиницях вимірювання (швидкість зварювання —  $\text{мм}^{-1}$ , швидкість зварювання в паузі —  $\text{мм}^{-1}$ , швидкість подавання присадкового дроту —  $\text{м/год}$ , запрограмовані значення зварювального струму та зварювального струму в паузі —  $\text{А}$  і напруги дуги —  $\text{В}$ , поточні значення зварювального струму та зварювального струму в паузі —  $\text{А}$  і напруги дуги —  $\text{В}$ , глибина можливого корегування значення зварювального струму —  $\%$ , частота коливань неплавкого електрода —  $\text{Гц}$ , тривалість затримки електрода біля крайок стику —  $\text{с}$ , амплітуда коливань неплавкого електрода —  $\text{мм}$ , витрата інертного газу —  $\text{л/хв}$ , поточні значення кута положення осі неплавкого електрода відносно вектору гравітації —  $\text{град}$ );
- ✦ формувати сигнали керування електроприводами виконавчих механізмів обладнання для GTAW-зварювання при виді його функціонування «Налагодження»;
- ✦ формувати сигнали (команди) щодо здійснення автоматичного визначення опору зва-

ривального контуру та автоматичного встановлення значень амплітуд коливань неплавкого електрода для кожного з заповнюючих та лицювального проходів;

- ✦ контролювати наявність охолоджуючої рідини та інертного газу;
- ✦ формувати сигнали пуску та припинення (у т. ч. аварійної зупинки) виконання циклу зварювання;
- ✦ формувати сигнали здійснення запису (реєстрації) фактичних значень параметрів процесу GTAW-зварювання за допомогою персонального комп'ютера протягом усієї його тривалості та наступного відтворення (читання) цієї інформації.

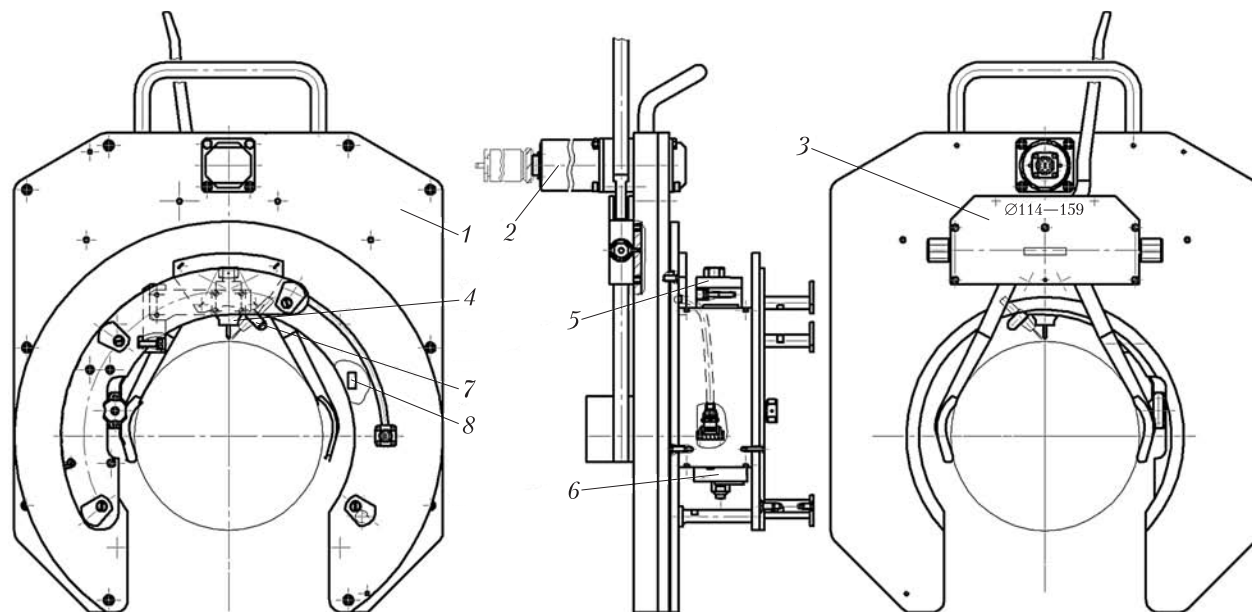
Зовнішній вигляд пульта керування виносного АДЦ 628.30.00.000 наведено на рис. 4.

Головки зварювальні АДЦ628.03.00.000 для автоматичного зварювання трубопроводів діаметром від 76 до 114 мм включно і АДЦ629.03.00.000 для автоматичного зварювання трубопроводів діаметром від 114 до 159 мм включно виконано за єдиною конструктивною схемою, характерною для головок накидного типу, на основі застосування переважно уніфікованих вузлів та механізмів та відповідно до вимог забезпечення показників призначення, високого рівня уніфікації, ремонтоздатності та специфічних умов експлуатації.

Загальний вигляд типового конструктивного виконання головки (на прикладі головки АДЦ629.03.00.000) наведено на рис. 5.

До складу кожної з цих головок входять такі основні вузли і механізми: корпус, механізм обертання, механізм затискання, пальник, механізм АРНД, механізм поперечного переміщення пальника, вузол каналу присадкового дроту, давач просторового положення електрода.

Механізм обертання забезпечує обертання планшайби головки навколо трубопроводу, що зварюється, і містить у собі редуктор, привод, приводну шестерню, вал, проставку і рукоятку. Як привід механізму обертання застосовано мотор-редуктор, до складу якого входять електродвигун постійного струму зі статором



**Рис. 5.** Головка зварювальна АДЦ629.03.00.000: 1 – корпус; 2 – механізм обертання; 3 – механізм затискання; 4 – пальник; 5 – механізм АРН; 6 – механізм поперечного переміщення; 7 – вузол каналу подавання присадкового дроту; 8 – давач просторового положення електрода

на постійних магнітах, редуктор, що забезпечує зниження числа обертів електродвигуна та енкодер, який виробляє 128 імпульсів за один повний оберт електродвигуна.

На корпусі механізму обертання закріплено механізм затискання, який призначено для забезпечення фіксації головки на трубі, що зварюється, та досягнення співвісності осі обертання планшайби головки і осі трубопроводу, що зварюється (тобто для центрування планшайби головки).

На вихідній шестерні редуктора механізму обертання встановлено планшайбу, на якій закріплено блок виконавчих механізмів. До складу цього блока входять пальник, механізм АРНД, механізм поперечного переміщення, вузол каналу присадкового дроту (вузол лайнера). Крім того, на планшайбі закріплено давач просторового положення електрода, при цьому його повздовжня вісь паралельна осі неплавкого електрода пальника.

Конструктивною базою пальника є його металевий корпус прямокутної форми з двома

внутрішніми порожнинами, одна з яких призначена для здійснення теплообміну корпусу з охолоджуючою рідиною, інша – для функціонування як камери інертного газу.

Інертний газ з магістралі газопостачання автомата GTAW надходить до внутрішньої (газової) порожнини корпусу пальника через відповідний патрубок і витікає з неї через 10 отворів діаметром 1,2 мм, що в поєднанні з газовим фільтром, який встановлено в нижній внутрішній частині корпусу пальника, забезпечує ламінарний витік інертного газу до зони зварювання через керамічне сопло.

Механізм АРНД призначено для забезпечення підтримування запрограмованої довжини зварювальної дуги шляхом відпрацювання у радіальному напрямку відносно повздовжньої осі труби переміщення пальника у відповідності до виникаючих відхилень від запрограмованих значень напруги дуги.

Механізм поперечного переміщення призначено для забезпечення можливості спрямування електрода пальника на стик і корегування

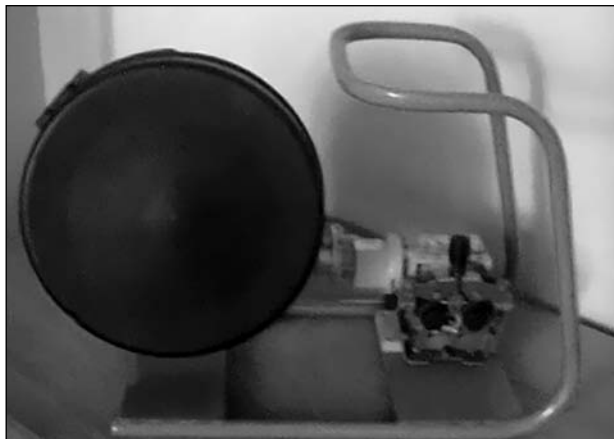


Рис. 6. Блок (механізм) подавання присадкового дроту  
АДЦ 628.04.00.000

просторового положення електрода впоперек цього стику, а також для здійснення коливань електрода впоперек стику відповідно до запрограмованих значень амплітуди та частоти коливань. Як привод механізму поперечного переміщення використовується також мотор-редуктор з вбудованим енкодером, що забезпечує не тільки можливість регулювання амплітуди та частоти коливань і підтримування сталими їх запрограмованих значень, але й визначення напрямку переміщення.

Вузол каналу присадкового дроту (вузол лайнера) забезпечує спрямування присадкового дроту до зварювальної дуги (зони зварювальної ванни), корегування просторового положення присадкового дроту відносно неплавкого електрода пальника, зміну та фіксацію просторового положення лайнера при зміні напрямку зварювання (напрямку обертання планшайби головки).

Трикоординатний давач просторового положення електрода дає можливість визначити кутове положення електрода у площині стику відносно вектора гравітації, що забезпечує можливість виконання запрограмованого циклу зварювання незалежно від первісного просторового положення електрода, а також отримати достовірну інформацію про кутове положення електрода для відпрацювання програми циклу

зварювання згідно з відповідними осями керування. Це виключає необхідність наявності реперних відзначень для виконання програми циклу зварювання, що характерно для переважної більшості автоматів GTAW.

Блок (механізм) подавання присадкового дроту забезпечує пересування з програмованою швидкістю присадкового дроту до зони зварювання. Як електропровод блока використано електродвигун постійного струму (зі статором на постійних магнітах і вбудованим оптоелектричним енкодером) потужністю 100 Вт, розрахований на номінальне значення напруги якоря 24 В. При номінальних значеннях напруги якоря та механічного навантаження швидкість обертання вала електродвигуна становить 2900 об./хв, що зумовлює необхідність застосування понижуючого редукціювання для досягнення регламентованого значення швидкості подавання присадкового дроту до 60 м /год. Одноступеневий циліндричний перший редуктор забезпечує первинну редукцію з коефіцієнтом 1 : 3, за допомогою другого редуктора черв'ячного типу здійснюється редукція з коефіцієнтом 1 : 100. Вихідний вал другого (черв'ячного) редуктора з'єднано з механізмом притискання, в якому забезпечується притиснення з підпруженням роликів подавання до присадкового дроту та його спрямування до каналу.

Керування швидкістю подавання присадкового дроту здійснюється контролером приводу подавання присадкового дроту (що входить до складу БІ), який формує напругу живлення якоря електродвигуна та забезпечує регулювання і підтримування сталого значення запрограмованої швидкості подавання присадкового дроту за рахунок зворотного зв'язку, що здійснюється шляхом обробки послідовності імпульсів, які надходять до цього контролера з виходу вбудованого в електродвигун оптоелектричного енкодера. Кількість таких імпульсів складає 500 імпульсів за один оберт вала електродвигуна.

Напруги живлення якоря електродвигуна і енкодера з КППД надходять через фільтр-об-

межувач, який забезпечує захист ланцюгів живлення від перевантажень за напругою або від її сплесків, а також захист вихідних (сигнальних) ланцюгів енодера.

Загальний вигляд блока (механізму) подавання присадкового дроту наведено на рис. 6.

Система водяного охолодження розроблених автоматів для GTAW-зварювання побудована за принципом замкненої системи рідинного охолодження і базується на основі застосування блока водоохолодження автономного БВА-02, який призначений для забезпечення охолодження і циркуляції робочої рідини в порожнинах пальників з водяним охолодженням установок для TIG-зварювання при зварювальному струмі до 500 А і серійно виготовляється в Україні.

Програмне забезпечення розроблених автоматів для GTAW-зварювання виконане на базі застосування інтегрованого середовища Lab VIEW і стандартного комп'ютера з операційною системою Windows XP –SP2.

Загальнотехнічні, функціональні і технологічні випробування дослідних зразків розробленого обладнання з елементами адаптивного керування для GTAW-зварювання довели, що таке обладнання забезпечує можливість досягнення стабільно високої якості зварних з'єднань при виконанні неповоротних стиків трубопроводів діаметром від 76 до 219 мм з товщиною стінки до 12 мм в умовах монтажу та ремонту об'єктів енергетики.

Крім того, встановлено, що для досягнення рівня автоматизації процесів GTAW-зварювання, який би не тільки повністю відповідав сучасним вимогам, а й випереджував існуючий світовий доробок у цій сфері, нагальною необхідністю є подальші дослідження та дослідно-конструкторські і дослідно-технологічні роботи у напрямку розробки систем активного технологічного контролю (на базі використання засобів технічного зору) як при підготованні неповоротних стиків до зварювання в процесі їх механічної обробки, так і в процесі їх GTAW-зварювання, вдосконалення апаратної частини орбітальних автоматів щодо більш глибо-

кого застосування мікропроцесорів, а також програмного забезпечення цих автоматів.

## ВИСНОВКИ

1. Розробка, виготовлення і випробування дослідних зразків автоматів АДЦ 628 УХЛ4 та АДЦ 628 УХЛ4 для орбітального зварювання з подаванням присадкового дроту та подальше освоєння їх промислового виробництва створюють усі необхідні передумови для оснащення монтажних організацій і ремонтних підрозділів та підприємств галузі енергетики вітчизняним сучасним обладнанням, яке забезпечує можливість реалізації як напрацьованих, так і нових технологій автоматичного зварювання неповоротних стиків з розкриттям крайок трубопроводів діаметром від 76 до 219 мм з товщиною стінки до 12 мм зі сталей аустенітного і перлітного класів та високолегованих сплавів, що, в свою чергу, надасть змогу суттєво підвищити якість, продуктивність, технологічну та економічну ефективність зварювальних робіт при монтажі і ремонті об'єктів енергетики.

2. Наявність у складі системи керування розроблених автоматів комп'ютера дає можливість здійснювати не тільки адаптивне керування процесами GTAW-зварювання та обладнанням для його реалізації, а й документувати поточні значення параметрів цих процесів та режимів зварювання, їх ретроспективного аналізу і порівняння з відпрацьованими комп'ютерними моделями, отримувати вихідну інформацію, необхідну для виконання неруйнівного контролю, діагностики та прогнозних розрахунків надійності зварних з'єднань неповоротних стиків трубопроводів.

3. Здійснення подальшого розвитку технологій GTAW-зварювання неповоротних стиків трубопроводів і обладнання для їх реалізації в напрямку підвищення ступеню автоматизації, наближеного до роботизації, можливе за рахунок застосування відеосенсорів, створення банку типових режимів зварювання, поглибленого використання сучасних (напр., сигнальних) мікропроцесорів та енергонезалежної пам'яті.

Автори вважають необхідним відзначити, що у розробці та конструюванні вищезгаданих апаратно-програмних комплексів і в створенні їх програмного забезпечення активно і безпосередньо були задіяні інженери *В.Ю. Буряк, М.С. Федоренко, В.Є. Водолазський, О.Г. Сіпаренко, М.І. Скопюк, О.Г. Скурта, Д.С. Оліяненко, Е.В. Кункіна, І.В. Вертецька, М.П. Драченко*, у відпрацюванні технологічних процесів GTAW-зварювання — інженери *В.Є. Попов, А.Д. Чередник, О.В. Бурба*, в освоєнні виробництва розроблених апаратно-програмних комплексів — інженери *М.М. Пасічний, О.І. Коркач, С.В. Абрамян, В.М. Андрійченко, В.Є. Іванов, А.У. Мнухін, В.П. Тищенко, Г.І. Писарев, В.М. Золотов, В.О. Нагорна, В.І. Венік, В.С. Павловський*.

*Робота виконана в рамках науково-технічного проекту НАН України (2012) «Розробка і виготовлення дослідних зразків імпортозамінюючих систем адаптивного керування та виконавчого обладнання для автоматичного орбітального зварювання трубопроводів діаметром 76 — 219 мм при спорудженні та ремонті АЕС України»*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *К вопросу об автоматизации сварки монтажных стыков трубопроводов атомных электростанций / В.И. Грищенко, В.В. Рошин, В.А. Хаванов, С.И. Полосков // Технология машиностроения. — 2008. — N 8. — С. 48—51.*
2. *ПНАЭ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Госатомнадзор СССР. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 168 с.*
3. *ПНАЭГ-7-009-90 и ПНАЭГ-7-010-90. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения / Госатомнадзор СССР. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 320 с.*
4. *Белкин С.А., Шефель В.В. Автоматическая аргодуговая сварка при монтаже трубопроводов АЭС // Энергетическое строительство. — 1985. — № 11. — С. 43—46.*
5. *Гальшев В.К. Применение автоматической сварки на монтаже трубопроводов Запорожской АЭС // Энергетическое строительство. — 1988. — № 3. — С. 9—10.*
6. *Белкин С.А. О ходе выполнения программы механизации работ по сварке стыков трубопроводов диаметром до 150 мм // Энергетическое строительство. — 1988. — № 3. — С. 3—4.*
7. *Шефель В.В. Состояние и перспективы разработки нового малогабаритного трубосварочного оборудования // Энергетическое строительство. — 1988. — № 12. — С. 3—4.*
8. *Рошин В.В., Хаванов В.А., Акулов Л.И., Букаров В.А. Сварка при монтаже оборудования и металлоконструкций реакторных установок // Сварка в атомной промышленности и энергетике. Труды НИКИМТ. — М.: Издат АТ, 2002. — Т. 1. — С. 81—118.*
9. *Букаров В.А. Технология дуговой автоматической сварки в защитных газах // Сварка в атомной промышленности и энергетике. Труды НИКИМТ. — М.: Издат АТ, 2002. — Т. 1. — С. 149—210.*
10. *Махлин Н.М., Коротынский А.Е., Богдановский В.А., Свириденко А.А. Одно- и многопостовые системы для автоматической сварки неповоротных стыков трубопроводов атомных электростанций // Автомат.сварка. — 2011. — № 11. — С. 34—44.*
11. *Богдановский В.А., Гавва В.М., Махлин Н.М. и др. Применение автоматической орбитальной сварки при изготовлении поглощающих вставок контейнеров хранения отработанного ядерного топлива // Автомат.сварка. — 2011. — № 12. — С. 41—45.*
12. *Махлин Н.М., Попов В.Е., Федоренко Н.С. и др. Применение автоматической орбитальной сварки при изготовлении чехлов каналов нейтронных измерительных ядерных реакторов // Автомат.сварка. — 2013. — № 6. — С. 29—34.*
13. *Вертецькая И.В., Коротынский А.Е. Оценка мощности сварочной дуги с использованием взаимнокорреляционной функции // Труды международной научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение в промышленности, энергетике, и на транспорте», 5—9 октября 2009, г. Партенит (Крым). — К.: ИЭС им. Е.О.Патона, 2009. — С. 58—61.*
14. *Полосков С.И., Букаров В.А., Ищенко Ю.С. Влияние отклонений параметров режима аргодуговой сварки неповоротных стыков труб на качество сварных соединений // Сварка и смежные технологии. Всероссийская научно-техническая конференция. Сб. докладов. — М.: МЭИ (ТУ), 2000. — С. 22—25.*
15. *Заявка UA №2011 08518 від 07.07.2011 Спосіб оцінки стійкості і стану неплавкого електрода та пристрій для його реалізації при автоматичному дуговому зварюванні неплавким електродом / Л.М. Лобанов, Н.М. Махлін, О.Є. Коротинський, С.Й. Полосков, М.І. Скопюк, В.Ю. Буряк // Позитивне рішення Укрпатенту від 11.01.2013.*
16. *Заявка RU № 201153878\02(081053) от 29.11.2011 Спосіб автоматической дуговой сварки неплавящимся электродом и устройство для его реализации / Л.М. Ло-*

банов, Н.М. Махлин, А.Е. Коротынский, С.И. Полосков, М.И. Скопюк, В.Ю. Буряк // Положительное решение Роспатента от 05.04.2013.

17. *Патент* UA № 101534 Спосіб автоматичного дугового зварювання неплавким електродом та пристрій для його здійснення / Б.Є. Патон, Н.М. Махлін, О.Є. Коротинський, В.О. Богдановський, М.І. Скопюк, В.Ю. Буряк. Опубл. — Бюл. № 7.— 2013.

*Н.М. Махлин, А.Е. Коротынский, А.А. Свириденко*

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ  
ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО СВАРИВАНИЯ  
НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ ТРУБОПРОВОДОВ  
АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Приведены результаты наработок ИЕЗ им. Е.О. Патона по созданию отечественных образцов оборудования с элементами адаптивного управления для автоматического сваривания неповоротных стыков трубопроводов при монтаже и ремонте энергоблоков атомных и тепловых электростанций, в судостроении, химическом маши-

ностроении, на предприятиях нефтегазового комплекса и в других областях промышленности.

*Ключевые слова:* неповоротные стыки трубопроводов, автоматическое орбитальное сваривание, неплавкий электрод, присадочный провод, системы управления.

*N.M. Makhlin, O.E. Korotynskii, A.O. Sviridenko*

HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEXES  
FOR AUTOMATIC POSITION PIPE WELDING  
AT NUCLEAR POWER PLANTS

Achievements of the E.O. Paton Electric Welding Institute in development of domestic samples of equipment with elements of adaptive control for automatic position pipe welding during assembly and repair of power units of nuclear and heat power electric stations, in shipbuilding and chemical engineering, at enterprises of oil-and-gas complex and in other branches of industry are presented.

*Key words:* position welded pipe joints, automatic orbital welding, non-consumable electrode, filler wire, control systems.

Стаття надійшла до редакції 07.06.13