

ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ КАТОДНОГО ВУЗЛА ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ГАРМАТИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ

В.І. Загорніков, В.М. Нестеренков, Ю.В. Орса, А.М. Ігнатенко

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

Розглянуто елементи ремонтної технології електронно-променевого зварювання при виробництві металокерамічного катодного вузла потужної зварювальної електронно-променевої гармати. Притаманий електронно-променевому зварюванню низький ступінь тепловиділення в місці накладання зварного шва знижує ризик короблення деталей, що з'єднуються, і забезпечує максимальну відповідність необхідним розмірам вузла. Необхідність ремонту катодного вузла визначили випадки постачання імпортованих ізоляторів, з дефектами у вигляді відхилень товщини від 0,5 до 1,0 мм стінки металевих фланців («коміра») у паяному з'єднанні з ізолятором. Потрібно було усунути наслідки порушення режиму механічної обробки коміра ізолятора після паяння. Показані можливі шляхи та схеми ремонтних технологій таких вузлів, що дозволяють уникнути відбраковування коштовних деталей і перевести їх у розряд, що підлягають відновленню. Представлені ремонтні технології передбачають застосування кільцевих вставок-бандажів різної конфігурації для двох варіантів усунення зварювальних дефектів, пов'язаних як з локальним ремонтом кромки, так і ремонтом пошкоджень досить протяжних її ділянок. Вдалося за рахунок правильного вибору форми ремонтних вставок, застосування деяких технологічних прийомів, дотримання точності складання і послідовності ремонтного зварювання зберегти в результаті геометричні розміри і забезпечити функціональність зварного вузла загалом. Бібліогр. 6, табл. 6, рис. 6.

Ключові слова: електронно-променево зварювання, імпульсний режим, нікелевий сплав, катодний вузол, ремонтна кільцева фігура вставка, схеми з'єднань різних етапів зварювання.

Вступ. В електронних приладах використовуються види з'єднань, що застосовуються в загальному машинобудуванні (стикове, напусткове та кутове), але форма підготовлених кромок у ряді випадків значно відрізняється від загальноприйнятої. Це з'єднання з відбортуванням кромок замість напусткових або стикових з'єднань. Такі з'єднання дозволяють знизити загальний нагрів деталей, що зварюються, зменшити загальну деформацію вузла, реставрувати з'єднання після розтину для ремонту [1, 2]. Для з'єднань по відбортовці кромок допуски розмірів на складання менш жорсткі, що робить їх пріоритетнішими при виготовленні та ремонті тонкостінних з'єднань [3].

У ремонтних роботах, де необхідно забезпечити мінімальний термічний вплив на виріб (у нашому випадку – катодний вузол (КВ) електронно-променевої гармати (ЕПГ) застосування електронно-променевого зварювання (ЕПЗ)) є перспективним [4].

Оскільки зварювання плавленням електронних приладів виконується без присадного матеріалу і зварний шов формується з металу розплавлюваних кромок зварних виробів, то набуває істотного значення точність виготовлення кромок, що зварюються (товщина проточуваних кромок по периметру кругового стику).

Необхідність розгляду варіантів відновного ремонту даного дорогого вузла визначили випадки

імпортованого постачання для зварювальних ЕПГ комплектів ізоляторів із різною товщиною стінки впаюваного в ізолятор фланця – «коміра». Враховуючи високу вартість обладнання для ЕПЗ, можливість уникнути відбраковування окремих вузлів ЕПГ і перевести їх у розряд, що підлягають відновленню за рахунок ремонту, дуже актуальна.

Для ремонту необхідно формування бездефектного зварного з'єднання без пошкодження сусідніх паяних ділянок. Ремонт таких з'єднань раніше не здійснювався, тому розробка елементів ремонтних технологій на прикладі складання з'єднання «ніжки» (КВ) в паяний «комір» керамічного ізолятора ЕПГ набуває актуального характеру. Зварювання по відбортуванню кромок не викликало труднощів до тих пір, поки не виникла необхідність отримати вакуумнощільний шов по відбортовці за наявності по периметру різної товщини стінки «коміра» ізолятора внаслідок його проточки після паяння з порушенням технологічного режиму. У процесі зварювання у місця витончення стінки стику відбувався локальний перепал з порушенням вакуумної щільності шва, виникали підрізи, втрата форми шва (рис. 1, а, б). Такий варіант можливий, майже неминучий внаслідок порушення режиму механічної обробки «коміра» ізолятора після паяння та перед зварюванням. Повторний, «косметичний» прохід у цьому випадку виявився малоефективним, що й зажадало розробки інших прийомів ремонтної технології.

Загорніков В.І. – <https://orcid.org/0000-0003-0456-173X>, Нестеренков В.М. – <https://orcid.org/0000-0002-7973-1986>,

Орса Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-1208-4171>

© В.І. Загорніков, В.М. Нестеренков, Ю.В. Орса, А.М. Ігнатенко, 2023

Реальне втілення в нашій роботі знайшли наступні технологічні ремонтні прийоми та правила:

- попередження перепалу та оплавлення тонких кромок у зоні зварного шва шляхом збільшення перетину деталей вставками для віддалення кромки від зони зварювання;
- видалення дефектів повторними проходами із постановкою прокладок – кільцевих вставок різної конфігурації;
- імпульсний режим, який забезпечує мінімальні питомі тепловкладення в зону зварювання та точне регулювання потужності, зводить до мінімуму небезпеку пропалу та короблення тонкостінних з'єднань (менше 1...2 мм);
- одержання необхідної форми шва для усунення кореневих дефектів. В основному реалізується вибором рівня фокусування пучка та розгортки електронного пучка;
- забезпечення локальної жорсткості закріплення стику, що зварюється, шляхом постановки численних прихваток, тобто попереднім зварюванням кромок в декількох точках по довжині стику.

Розробка оснастки з точною фіксацією затискачем деталей з зусиллями, що не виключають можливість вільної усадки і перешкоджає розвитку гарячих тріщин при усадці швів. Тобто забезпечення зниження жорсткості закріплення заготовок, що зварюються.

Метою даної роботи є розробка ремонтної технології складання та зварювання КВ, що входить до складу зварювальної ЕПЗ з урахуванням необхідності усунення наслідків порушення режиму механічної обробки «коміра» ізолятора після паяння.

Ставилося завдання розробити ремонтну технологію, яка завдяки раціональному проектуванню зварних ремонтних елементів, застосуванню технологічних прийомів ЕПЗ та використанню сучасної зварювальної техніки суттєво здешевить вартість виготовлення та ремонту вузлів електронної техніки.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження виконували на лабораторній установці для ЕПЗ типу УЛ-112 конструкції ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, що має робочу камеру із внутрішніми розмірами 600×600×600 мм. Установка має порівняно просту конструкцію із стаціонарно закріпленою зовнішньою зварювальною гарматою,

оснащена маніпулятором, який забезпечує лінійне переміщення столу вздовж координат X , Y . Як конструкційний матеріал для виготовлення КВ використовувався сплав ковар 29НК. Для відпрацювання техніки вварювання КВ в тонкостінний фланець («комір») ізолятора обертач установки був забезпечений високоточним CNC-керованим електроприводом (комп'ютерне числове керування). Застосовувалося високовольне джерело живлення потужністю 15 кВт при прискорювальній напрузі 60 кВ. Емісійна система зварювальної гармати забезпечувала струм електронного пучка завбільшки до 250 мА. Для поєднання електронного пучка зі зварюваним стиком використовувалася коаксіальна система телеспостереження. Застосування коаксіальної системи телеспостереження дозволяє реалізувати точне позиціонування осі електронного пучка з стиком, що зварюється [3].

Експериментальна частина та обговорення.

Виявлено вплив підготовки зварних кромок на якість зварних з'єднань. Щоб забезпечити високу якість зварного шва поверхні, що стикаються, обов'язково піддаються очищенню від засобів консервації, забруднень, іржі та оксидних плівок. Безпосередньо перед зварюванням зовнішню поверхню деталей, що зварюються, в області стику можна очищати за допомогою малопотужного скануючого електронного пучка, не допускаючи оплавлення кромок для можливості програмного коригування положення електронного пучка щодо стику під час зварювання.

При розробці технології зварювання зразки-імітатори для відпрацювання режимів зварювання не повністю відображали напружено-деформаційний стан реального зварного з'єднання [5]. Проте попередній досвід зварювання деталей такого типу дозволив звести до мінімуму кількість регульованих параметрів для отримання якісного шва. До них можна віднести діапазон припустимого питомого тепловкладення з т. з. усунення перегріву та порушення вакуумної щільності шва (зварювання в імпульсному режимі), мінімальну величину зазору в стик, кут і місця введення електронного пучка в стик, що зварюється. Максимальна глибина проникання без розбризкування металу може бути досяг-

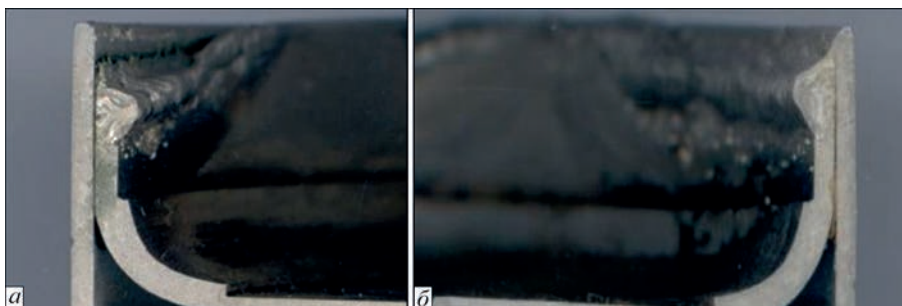


Рис. 1. Дефекти формування зварного з'єднання, спричинені порушенням технологічного режиму складання та зварювання: *a* – стікання металу шва по внутрішній бічній стінці; *b* – втрата форми шва, підріз внутрішньої кромки

нута при оптимальному поєднанні збільшеної тривалості імпульсу та зниженої щільності потужності. Коефіцієнт перекриття сусідніх точок – важливий критерій, що впливає на якість зварних швів. Рекомендовані його значення – від 50 до 80 % для отримання щільних швів [2, 6]. Вибір швидкості зварювання здійснювали емпірично на зразках-імітаторах. Для аналізованих товщин вибір швидкості зварювання в районі 10 мм/с підвищував можливість отримання якісного формування зварного шва. На підставі проведених розрахунків та експериментів було визначено такі параметри імпульсного режиму ЕПЗ:

Прискорювальна напруга $U_{\text{сп}}$	60 кВ
Струм пучка	13,5...15,0
Робоча відстань, мм	70...300
Частота проходження імпульсів F , Гц	30
Тривалість імпульсу τ_p , мс	16,5
Тривалість паузи τ_p , мс	16,5

Для успішного виконання зварювання з повним проплавленням і відсутності несплавлення кромки необхідно розфокусувати електронний промінь таким чином, щоб на поверхні кромки, що зварюються, фокальна пляма променя становила не менше 0,8 мм і не більше 1,0 мм. Значення розміру фокальної плями встановлено дослідним шляхом. Фокус променя підтягувався на 1...2 мм відносно поверхні кромки, що зварюється (гостре фокусування I_{fo} плюс 15...25 мА). Регулювання цих значень може значно підвищити стабільність зварювальної ванни, виключити розбризкування металу. Відсутність розбризкування металу зварювальної ванни значно покращує естетичний вигляд виробу, а також знижує ймовірність появи поверхневої корозії.

Необхідно враховувати також той факт (пов'язаний з особливостями самого способу ЕПЗ), що при збільшенні зазорів понад певної межі отримати задовільне формування швів без підрізів і пропалів практично неможливо. Розміри зазорів дуже критичні, оскільки сама товщина стінки паяного фланця – коміра становить в деяких місцях всього 0,5 мм. Розроблені конструкції складально-зварювального оснащення забезпечували додавання стикового з'єднання з мінімальними (не більше 0,08 мм) зазорами по торцевих поверх-

нях і гарантованим натягом по циліндричних [1, 5]. Негативний вплив зазорів на форму шва було усунуто. Перевірка точності складання проводилася шаблонами та щупами. Для того, щоб у процесі зварювання встановлені зазори та положення тонкостінних деталей не змінювалися, перед зварюванням роблять попередню прихватку деталей. Прихватки покликані позиціонувати елементи, що стикуються, зберігаючи при цьому їх форму і розміри перед остаточним ЕПЗ [4, 5]. Щоб уникнути перегріву виробу та порушення герметичної щільності швів необхідно максимально скоротити введення та виведення струму при постановці прихваток. Довжина кожної із двох лінійних прихваток має бути не менше ніж 2...5 товщин основного металу. Розміри перерізу прихваток повинні бути такими, щоб вони розплавлялися повністю при накладенні основних швів (рис. 2).

Зі зменшенням відстані між прихватками зменшується максимальне зміщення стику під час проведення основного зварювального проходу електронним променем [4]. Наголошується на пріоритетності точкових прихваток над лінійними з погляду мінімізації тепловкладання в шов та зниження деформацій. Тому найчастіше при явній різниці у товщині стінок деталей замість лінійних прихваток, що зварюються, застосовувалися численні точкові. Рекомендується для зниження тепловкладання використовувати точкові прихватки, які розставляються діаметрально протилежно (хрест-навхрест) у кількості 8...16 шт. Струм фокуруючої лінзи відповідає гострому фокусуванню на даній робочій відстані – 200 мм ($I_{fo} = 600$ мА плюс 25 мА).

Режим виконання зварювальних прихваток наведено у табл. 1 та 2.

Формування шва необхідної форми з плавним (без підрізів) переходом від поверхні шва до основного металу здійснювалося за рахунок правильного розподілу концентрації електронного пучка. У всіх випадках з'єднання виконується ЕПЗ з вимогою (обґрунтуванням) мінімально допустимих розмірів швів та обмеженням числа повторних проходів (рис. 3). Для зменшення ймовірності утворення пор та тріщин, оплавлення кромки з втратою їх форми кількість повторних ремонтних проходів не повинна перевищувати двох.



Рис. 2. Початковий фрагмент шва (а) та прихватка (б)

Таблиця 1. Параметри режиму виконання зварювальних точкових прихваток (без модуляції)

Струм пучка I_b , мА	Струм фокусуєної лінзи на поверхні I_{fo} , мА	Робочий струм фокусуєної лінзи I_p , мА	Робоча відстань, мм
4	600	625	200

Таблиця 2. Параметри режиму виконання зварювальних прихваток (з модуляцією)

Струм пучка I_b , мА*	Струм фокусуєної лінзи на поверхні I_{fo} , мА	Робочий струм фокусуєної лінзи I_p , мА	Робоча відстань, мм	Швидкість зварювання $V_{ш}$, мм/с
8	600	625	200	10

* – зварювання в імпульсному режимі

Складання під зварювання, відповідне технологічне оснащення, вибір режимів зварювання за двома варіантами. Принципові особливості методів фіксації елементів КВ при його збиранні під зварювання та основні положення технології ЕПЗ КВ були розроблені раніше у роботі [3].

Для двох варіантів усунення зварювальних дефектів ремонтні технології на заключній стадії операції виготовлення з'єднання «КВ в зборі» передбачають застосування кільцевих вставок різної конфігурації та використання їх як бандаж для забезпечення розрахункової міцності та точності розмірів вузла.

Подібні конструкції вставок прості і вигідні тим, що забезпечують достатню кількість додаткового металу, фіксацію і щільний контакт деталей, що стикаються. Було розроблено схему зварного ремонтного з'єднання, принципово незалежну від цього, локальний це чи протяжний дефект.

Перед тим як зварювати КВ, його необхідно встановити в оправку і щоразу перевіряти радіальне биття, яке не повинно перевищувати $\pm 0,05$ мм.

Розглянемо детальніше два варіанти проведення ремонту.

Варіант № 1. Приварювання у два етапи КВ в паяний фланець керамічного ізолятора ЕПЗ за наявності різної по периметру товщини вертикальної стінки фланця (0,5...1,0 мм). Тут отримати вакуумнощільний шов можна після відповідної

підготовки місця зварювання, установки встик з отбортовкою кромки фігурної кільцевої вставки, що залишається, з подальшим проведенням ЕПЗ з двох сторін в імпульсному режимі.

Складально-зварювальний пристрій являє собою встановлену та закріплену на обертачі підставку. Зібраний на ній під ЕПЗ ізолятор з фігурною кільцевою вставкою фіксується фланцем та шпильками. Захист керамічної поверхні ізолятора від напilenня парами металу при ЕПЗ на робочій потужності здійснювався алюмінієвою фольгою зовні та вставками з немагнітного матеріалу безпосередньо в районі стику.

Кільцева вставка в першому варіанті була застосована виходячи з необхідності надати крайкам приблизно однакові розміри перерізу (рис. 4). Така вставка покликана знизити критичність недотримання однакової (1,0 мм) товщини по периметру стінки впаяного в ізолятор тонкостінного «коміра». Застосування такої форми технологічної вставки дозволяє точно зафіксувати з мінімальним зазором зварювані кромки та забезпечити їх паралельність. У процесі зварювання джерело тепла (електронний промінь) впливає переважно на полицю фігурної підкладки, що значно знижує перегрів деталей, що зварюються, і дає можливість уникнути появи пропалів у стику. При вварюванні «ніжки» в ізолятор, що ремонту-

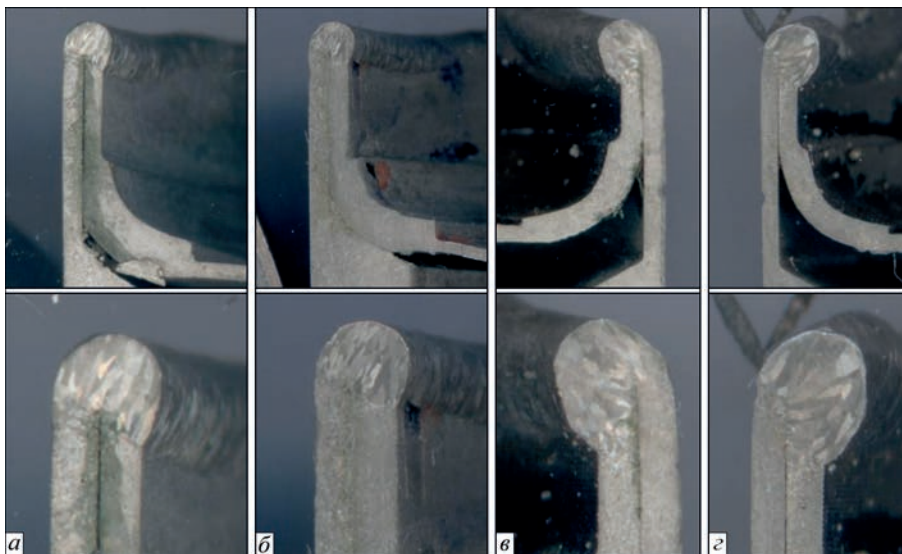


Рис. 3. Поперечні макрошліфи на зразках-імітаторах різних режимів електронно-променевого шва з двостороннім відбортовуванням кромки з одним і множинними ремонтними проходами: ЕПЗ у стандартному режимі (а), імпульсна ЕПЗ (б), подвійний переплав у імпульсному режимі (в), потрійний переплав у імпульсному режимі (г)

ється, використовувався захист керамічної поверхні ізолятора у вигляді екрануючого пристрою з немагнітного матеріалу. Зверху через шпильки пружне «коромисло» служить фіксатором усієї конструкції в кондукторі і через нього здійснюється заземлення всіх елементів КВ. Визначено вибір раціональної (з точки зору зниження залишкових зварювальних деформацій) послідовності накладання ремонтних зварних швів при зварюванні з лицьового та зворотного боку стику з'єднання «КВ-ізолятор». Спочатку проводилася операція фіксування фігурної кільцевої вставки до бракованого «коміра» ізолятора (шов № 1). Потім, після зняття припуску на механічну обробку, проводилася операція остаточного складання та приварювання за допомогою ЕПЗ «ніжки» до ізолятора (шов № 2).

Режим виконання першого зварювального проходу (шов № 1) представлено у табл. 3.

Режим другого зварювального проходу (шов № 2) представлено у табл. 4.

Варіант № 2. Реставрація «ніжки» після вирізки її зі складального шва з протяжним лінійним дефектом. У цьому випадку реставрація піддавалася «ніжки», а не «коміру» ізолятора. Для здійснення цієї ремонтної операції необхідно вирізати «ніжки» ізолятора і, після приварювання вставки-бандажа, повторне складання-зварювання.

Форма бандажа відрізнялася від варіанта № 1 відсутністю горизонтальної полиці та наявністю упору в стінку «ніжки», для кращої фіксації, збереження жорсткості вузла. Центр плями нагрівання зміщують у бік бандажа-вставки, що має більшу товщину (рис. 5, а).

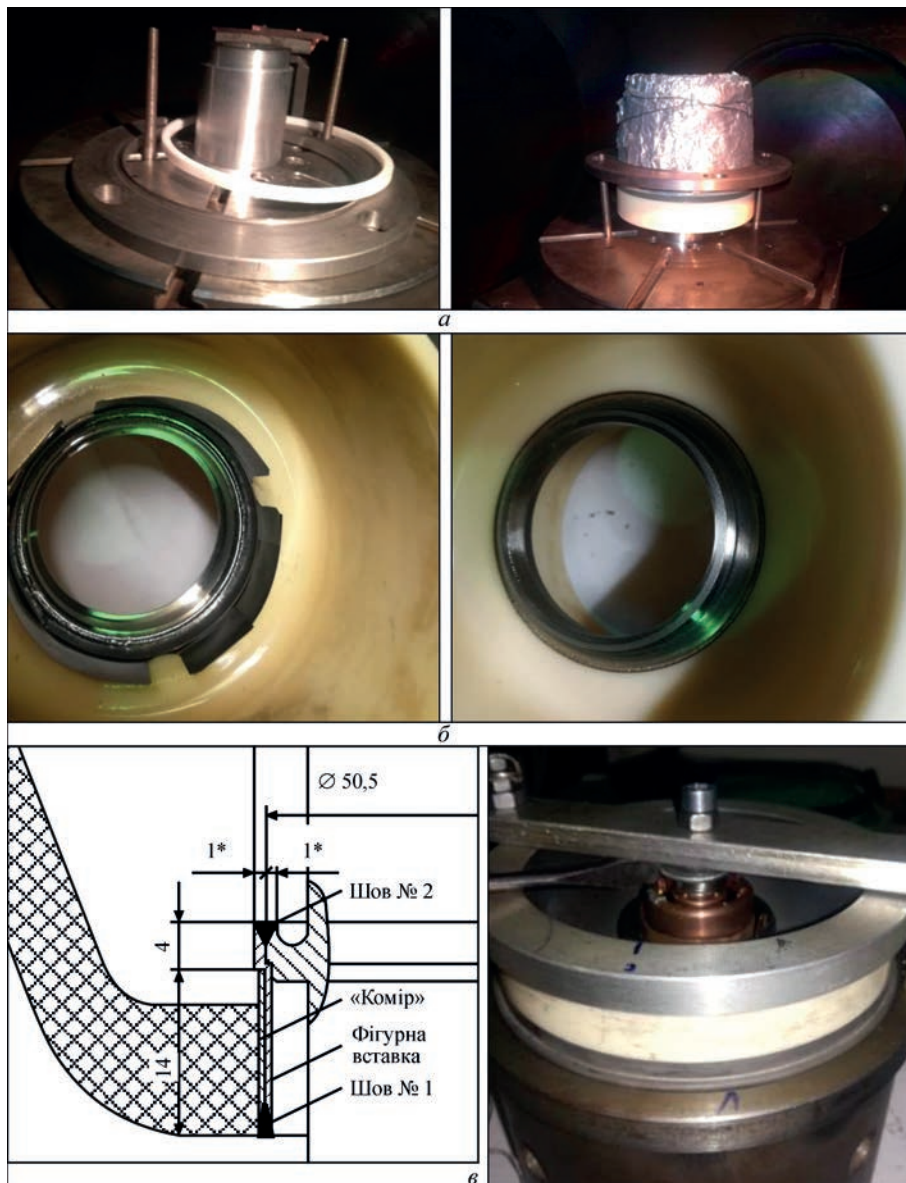


Рис. 4. Етапи проведення ремонтних робіт за варіантом № 1: а – складально-зварювальний пристрій з підкладанням під ЕПЗ ізолятора з фігурною кільцевою вставкою за варіантом № 1; б – вигляд шва з фігурною кільцевою вставкою за варіантом № 1 після ЕПЗ та після механічної обробки шва у розмір; в – фрагмент кільцевого з'єднання «коміра» з фігурною вставкою за варіантом № 1 та остаточне складання

Таблиця 3. Параметри режиму виконання зварювального проходу з модуляцією (шов № 1)

Струм пучка I_b , мА *	Струм фокусувальної лінзи на поверхні I_{fo} , мА	Робочий струм фокусувальної лінзи I_f , мА	Робоча відстань, мм	Швидкість зварювання $V_{ш}$, мм/с	Кут нахилу виробу α°
13,5	600	615	260	10	5

* - зварювання в імпульсному режимі
Примітка: $I_{fo} = 600$ мА відповідає гострому фокусуванню електронного пучка на поверхні, що зварюється. Розмір робочої відстані – 260 мм.

Таблиця 4. Параметри режиму виконання зварювального проходу з модуляцією (шов № 2)

Струм пучка I_b , мА *	Струм фокусувальної лінзи на поверхні I_{fo} , мА	Робочий струм фокусувальної лінзи I_f , мА	Робоча відстань, мм	Швидкість зварювання $V_{ш}$, мм/с	Кут нахилу виробу α°
15	700	715	70	10	10

Примітка: $I_{fo} = 700$ мА відповідає гострому фокусуванню електронного пучка на поверхні, що зварюється. Розмір робочої відстані – 70 мм.

Параметри режиму цього варіанту зварювання були встановлені виходячи з умов отримання вакуумнощільного шва з хорошим зовнішнім формуванням без підрізів, глибиною проплавлення не менше 2,0 мм та відсутності кореневих дефектів. Вибір оптимальної для ЕПЗ вставки-бандажа за варіантом № 2 та відповідних параметрів режиму зварювання дозволили вирішити задачу відновлення геометричних розмірів вирізаної з ізолятора «ніжки».

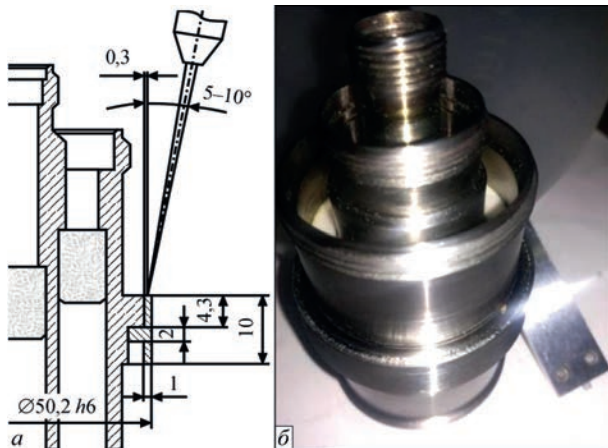


Рис. 5. Схема вварювання вставки за варіантом № 2 (а) та КВ «ніжка» після ЕПЗ і чистої механічної обробки привареної вставки (б)

При вварюванні вставки за варіантом № 2 кут нахилу виробу від вертикалі має відрізнитися від нуля. Необхідність нахилу пояснюється близькістю верхньої вертикальної стінки вузла до зони зварювання, внаслідок чого підвищується ймовірність екранування стінкою частини електронного пучка. Шов розташовувався на торцевій поверхні двостороннього відбортування з незначним відхиленням від вертикалі. Експериментально встановлено, що величина зовнішнього усунення осі електронного пучка від внутрішнього краю торця бандажу, у разі значення кута нахилу виробу α в межах $5 \dots 10^\circ$ від вертикалі, має становити 0,3 мм. Ці умови забезпечують гарантований провар необхідної форми. Такі незначні величини усунення електронного пучка зручно контролювати із застосуванням коаксимальної системи телеспостереження (рис. 5).

Режим реставрації «ніжки» за допомогою приварювання на неї бандажа без модуляції у звичайному, не імпульсному режимі, показано у табл. 5.

Остаточне складання КВ. На заключному етапі (після приварювання ремонтних вставок та їх механічної обробки у розмір) зварювання велося з двостороннім відбортуванням кромки, що виключає необхідність нахилу виробу, зберігаючи всі переваги цієї схеми (рис. 6).

Таблиця 5. Параметри режиму виконання зварювального проходу без модуляції

Струм пучка I_b , мА	Струм фокусувальної лінзи на поверхні I_{fo} , мА	Робочий струм фокусувальної лінзи I_f , мА	Робоча відстань, мм	Швидкість зварювання $V_{ш}$, мм/с	Кут нахилу виробу α°
12	635	650	130	10	$5 \dots 10$

Примітка: $I_{fo} = 635$ мА відповідає гострому фокусуванню електронного пучка на поверхні, що зварюється. Розмір робочої відстані – 130 мм.



Рис. 6. Загальний вигляд відремонтованого КВ ЕПГ зовні (а) та зсередини (б)

Таблиця 6. Параметри режиму зварювання «ніжки» (КВ) в паяний «комір» керамічного ізолятора ЕПГ

Струм пучка I_b , мА*	Струм фокусувальної лінзи I_f , мА	Швидкість зварювання V_w , мм/с
12	$I_{f0} + 20$	10

*Зварювання в імпульсному режимі.
Примітка: $I_{f0} = 600$ мА відповідає гострому фокусуванню електронного пучка на поверхні, що зварюється. Розмір робочої відстані – 220 мм.

Режим кінцевої операції виконання зварювання «ніжки» (КВ) в паяний «комір» керамічного ізолятора ЕПГ наведено у табл. 6.

Наявність сучасної зварювальної апаратури в комбінації із попередньо продуманою та вивірною конструкцією зварного вузла, правильно обраний тип зварного шва, дозволили виключити деформацію деталей, звести до мінімуму відсоток браку. Поля допусків геометричних розмірів КВ після завершення всіх етапів зварювання було до-тримано. Форми виробу збережено.

Технологія пройшла перевірку під час роботи штатних виробів у реальних виробничих умовах. Застосування розробленої технології ЕПЗ після ремонту доведено безперервною роботою КВ протягом 40 год.

Випуск і постачання таких вузлів можуть здійснювати організації-розробники, підприємства-виробники енергоблоків та установок для ЕПЗ, підприємства малого бізнесу.

Висновки

1. У роботі обґрунтовано метод технологічних вставок, який дозволяє усунути не тільки дефекти зварювання катодного вузла, а й отримати якісне вакуумно-щільне з'єднання на дорогій деталі, виготовленої з порушенням геометричних розмірів при її механічній обробці (відхилення у розмірах товщини вертикальної стінки по периметру зварюваного фланця ізолятора).

2. Відпрацьовано технологію ремонту двох типів дефектів – за наявності різної по периметру товщини вертикальної стінки фланця та після вирізки

її зі складального шва за протяжним лінійним дефектом. Ремонт обох типів дефектів здійснюється за допомогою вставок – кілець різної конфігурації.

3. Ухвалена технологія зварювання була успішно застосована при ремонті КВ. Якість, довговічність, надійність – ці властивості були підтверджені в процесі експлуатації відремонтованих реальних виробів і вони стали критерієм правильності розробленої технології.

Список літератури

1. Технологічні особливості зварювання плавленням <https://msd.com.ua › technologicalicheskie-osobennosti-svarki-pla...>
2. Особливості зварювання плавленням матеріалів для електронного машинобудування. <https://msd.com.ua › osobennosti-svarki-plavleniem-ma>.
3. Нестеренков В.М., Загорніков В.І., Орса Ю.В., Ігнатенко О.М. (2020) Особливості застосування електронно-променевого зварювання при виготовленні катодного вузла електронної гармати. *Автоматичне зварювання*, 2, 33–37.
4. Нестеренков В.М., Хрипко К.С., Матвейчук В.А. (2018) Електронно-лучевые технологии сварки, наплавки, прототипирования – результаты и перспективы. *Там же*, 11-12, 142–149.
5. Махненко О.В., Зайффарт П. (2008) Расчетное прогнозирование общих деформаций сварных балок при лазерной сварке. *Автоматическая сварка*, 3, 14–20.
6. Слободян М. (2021) Сопrotивление, електронно- и лазерно-лучевая сварка циркониевых сплавов для ядерной энергетики. *Ядерная инженерия и технологии*, 53, 4, 1049–1078. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.10.005>

References

1. Technological features of fusion welding. <https://msd.com.ua>
2. Features of fusion welding for electronic mechanical engineering. <https://msd.com.ua › osobennosti-svarki-plavleniem-ma>.
3. Nesterenkov, V.M., Zagornikov, V.I., Orsa, Yu.V., Ignatenko, O.M. (2020) Features of applying electron beam welding in manufacture of the cathode assembly of the electron gun. *The Paton Welding J.*, 2, 33–37.
4. Nesterenkov, V.M., Khripko, K.S., Matviichuk, V.A. (2018) Electron beam technologies of welding, surfacing, prototyping: Results and prospects. *The Paton Welding J.*, 11-12, 126-133.
5. Makhnenko, O.V., Seyffarth, P. (2008) Calculation prediction of overall distortions in laser welded beams. *The Paton Welding J.*, 3, 6-12.
6. Slobodyan, M. (2021) Resistance, electron and laser welding of zirconium alloys for nuclear power engineering. *Yadernaya Inzheneriya i Tekhnologii*, 53(4), 1049–1078 [in Russian]. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.10.005>

TECHNOLOGIES FOR REPAIRING OF CATHODE UNIT OF ELECTRON BEAM GUN WITH THE USE OF ELECTRON BEAM WELDING

V.I. Zagornikov, V.M. Nesterenkov, Yu.V. Orsa, A.M. Ignatenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The elements of repair technology of electron beam welding in the manufacture of a metal-ceramic cathode unit of a powerful welding electron beam gun are considered. A low degree of heat generation at the place of weld overlapping inherent in electron beam welding reduces the risk of buckling parts being joined and provides the maximum compliance with the required sizes of the unit. The need in repair of the cathode unit was determined by the cases of supplying imported insulators with defects in the form of deviations of a thickness from 0.5 to 1.0 mm in the wall of the metal flange («collar») in the brazed joint with the insulator. It was necessary to eliminate the consequences of a violation of the mechanical treatment of the insulator collar after brazing. The possible ways and schemes of repair technologies of such units are shown that allow avoiding the rejection of valuable parts and transferring them to the category of those subjected to restoration. The presented repair technologies involve the use of circumferential inserts-bandages of different configuration for two variants to eliminate welding defects associated both with local repair of the edge as well as with repair of its quite elongated areas. Due to a correct choice of the shape of repair inserts, the use of some technological methods and observance of the accuracy of assembly and the sequence of repair welding, it became possible to preserve geometric dimensions and to ensure the functionality of the welded assembly as a whole. 6 Ref., 6 Tabl., 6 Fig.

Keywords: electron beam welding, pulsed mode, nickel alloy, cathode unit, repair circumferential shaped insert, schemes of joints of different welding stages

Надійшла до редакції 17.12.2022