

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ КАТОДНОГО ВУЗЛА ЕЛЕКТРОННОЇ ГАРМАТИ

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

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

Загальновідома ефективність застосування електронно-променевого зварювання в отриманні нероз'ємних з'єднань конструкційних матеріалів найрізноманітнішої товщини і форми. В роботі вперше розглянуто можливість застосування електронно-променевого зварювання для виробництва високоточних деталей оптичної системи катодного вузла із забезпеченням необхідних параметрів і з'єднання їх в подальшому з ізолятором електронно-променевої гармати. Застосування електронно-променевого зварювання на фінішному етапі виготовлення катодного вузла відкриває можливість звести до мінімуму кількість подальших технологічних операцій. Відзначено, що для створення технології зварювання, в якій операція зварювання стала б фінішною складальною операцією, необхідна розробка нових конструкцій зварних з'єднань і схем збирання катодного вузла. Вдалося за рахунок правильного конструктивного оформлення зварних вузлів та дотримання точності складання під зварювання зберегти після електронно-променевого зварювання геометричні розміри і забезпечити експлуатаційну надійність конструкції в цілому. Бібліогр. 5, рис. 6.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання, імпульсний режим, нікелевий сплав, катодний вузол, зварювальне оснащення

У промисловості з'являються нові завдання, які успішно вирішуються за допомогою електронно-променевого зварювання (ЕПЗ). При цьому застосовуються зварювальні гармати різної потужності, що забезпечують формування зварних з'єднань товщиною від 0,5 до 150 мм і більше.

Катодні вузли (КВ) оптичних систем є базою електронно-променевих гармат і до них пред'являються підвищені вимоги при виготовленні. З огляду на можливості ЕПЗ, вельми перспективним бачиться його використання при виготовленні КВ, що представляють собою складний металокерамічний виріб. Беручи до уваги високу вартість обладнання для електронно-променевого зварювання, задача виготовлення і при цьому продовження терміну експлуатації КВ є вельми актуальною. З метою збільшення тривалого і стабільного формування електронно-променевих швів розроблені і виготовлені високоточні деталі катодної частини електронно-променевої гармати (ЕПГ) із застосуванням ЕПЗ.

При виготовленні подібних вузлів доводиться вирішувати ряд проблем, пов'язаних з наявністю залишкових власних напружень, викликаних різницею термічних коефіцієнтів лінійного розширення металу і кераміки [1].

Як відомо, катоди для електронних зварювальних гармат виготовляються з вольфраму і гексабориду лантану LaB_6 . Вольфрам є набагато більш стійким до дії парів металів, що зварюються, та залишкових газів, в той час як катоди з гексабориду лантану швидко запилюються парами металів,

що зварюються, і втрачають свою емісійну здатність [2]. Однак необхідна для нормальної роботи вольфрамового катода потужність його нагрівання в 3-4 рази перевищує потужність нагріву катода з LaB_6 . Через вплив високих робочих температур можливе зміщення катода відносно оптичної вісі і порушення фокусування електронного пучка.

Як наслідок, робоча температура тримача вольфрамового катода і сполучених з ним елементів не дозволяють використовувати в конструкції катодного вузла паяні з'єднання. В роботі вперше розглянуто можливість застосування ЕПЗ для з'єднання високоточних деталей оптичної системи (КВ) із забезпеченням необхідних параметрів.

Задача, яка вирішувалася в даній роботі, полягала в розробці технології, що дозволяє зробити операцію ЕПЗ фінішною операцією з'єднання електродів КВ при збереженні в повному обсязі його експлуатаційних властивостей.

Експериментальні роботи проводилися на установці СВ112 конструкції ІЕЗ ім. Є.О. Патона з комп'ютерним управлінням параметрами ЕПЗ. Проведення ЕПЗ на малогабаритній установці СВ112 в важкодоступних для зварювання місцях (міжелектродних просторах), де застосування штатної системи спостереження у вторинних електронах було проблематичним, стало можливим завдяки наявності коаксіальної системи відеоспостереження на базі цифрової відеокамери.

Для отримання зварних з'єднань з деталей з ковару, які використовуються при виготовленні КВ, важливо звести до мінімуму залишкові

В.М. Нестеренков – <http://orcid.org/0000-0002-7973-1986>

© В.М. Нестеренков, В.І. Загорніков, Ю.В. Орса, О.М. Ігнатенко, 2020

напруги шляхом мінімізації глибини проплавлення і перегріву основного металу [3]. Це досягається оптимізацією параметрів зварювання: швидкості зварювання V_w , струму пучка I_w , струму фокусуєної лінзи I_f та робочої відстані, які забезпечують формування швів з проплавленням на неповну товщину з мінімальною зоною перекристалізації. На формування шва істотно впливає положення фокусу електронного пучка відносно поверхні виробу. Найкращі результати досягаються при розташуванні фокуса нижче його поверхні. Режими зварювання вибираються такими, щоб забезпечити значення коефіцієнта форми шва близько до $H_{пр.}/B = 1,8...2,0$ мм. Така форма обумовлена необхідністю мінімального тепловкладення для зниження ймовірності появи пропалів, підрізів, підвищеного розбрикування та періодичної горбистості шва.

З цією ж метою успішно застосовується імпульсний режим ЕПЗ. Імпульсне ЕПЗ завдяки малому тепловкладенню стало незамінним при зварюванні в безпосередній близькості від місця спаїв металу з керамікою. Підведення тепла під час зварювання мінімізується, а швидкість зварювання доводиться до максимуму для зменшення розміру зварювальної ванни і часу кристалізації.

Параметрами імпульсного режиму ЕПЗ є:

- жорсткість режиму G (відношення тривалості імпульсу до тривалості паузи між ними);
- частота проходження імпульсів струму електронного пучка F .

Істотний вплив на величину погонної енергії і якість зварного з'єднання при зварюванні в імпульсному режимі надає також швидкість зварювання V_w , вибір якої в кожному конкретному випадку залежить від тривалості окремого імпульсу і довжини шляху, пройденого пучком під час паузи між імпульсами, що визначає величину коефіцієнта перекриття.

Для дотримання умов формування герметичного (вакуумно-щільного) зварного з'єднання коефіцієнт перекриття зварювальних точок встановлюється не менше 0,6...0,7. На підставі проведених розрахунків і експериментів були визначені параметри імпульсного режиму ЕПЗ.

Параметри імпульсного режиму ЕПЗ

$U_{пр}$, кВ.....	60
Струм пучка, мА.....	10...12
Робоча відстань, мм.....	150...300
Частота проходження імпульсів F , Гц.....	30
Тривалість імпульсу τ_p , мс.....	16,5
Тривалість паузи $\tau_{п}$, мс.....	16,5

Швидкість зварювання на різних типах зварних з'єднань КВ варіювалася від 3 до 10 мм/с. Подальше збільшення швидкості призводило до виникнення Хампінг-ефекту.

Зменшення швидкості зварювання загрожує перегрівом виробу аж до спотворення його форми.

Крім того, імпульсний режим ЕПЗ дозволяє знизити вимоги до точності підгонки елементів тонкостінних конструкцій і, перш за все, до величини зазору між цими елементами. Наші попередні дослідження показали, що зазор в з'єднаннях КВ не повинен перевищувати 0,06...0,08 мм.

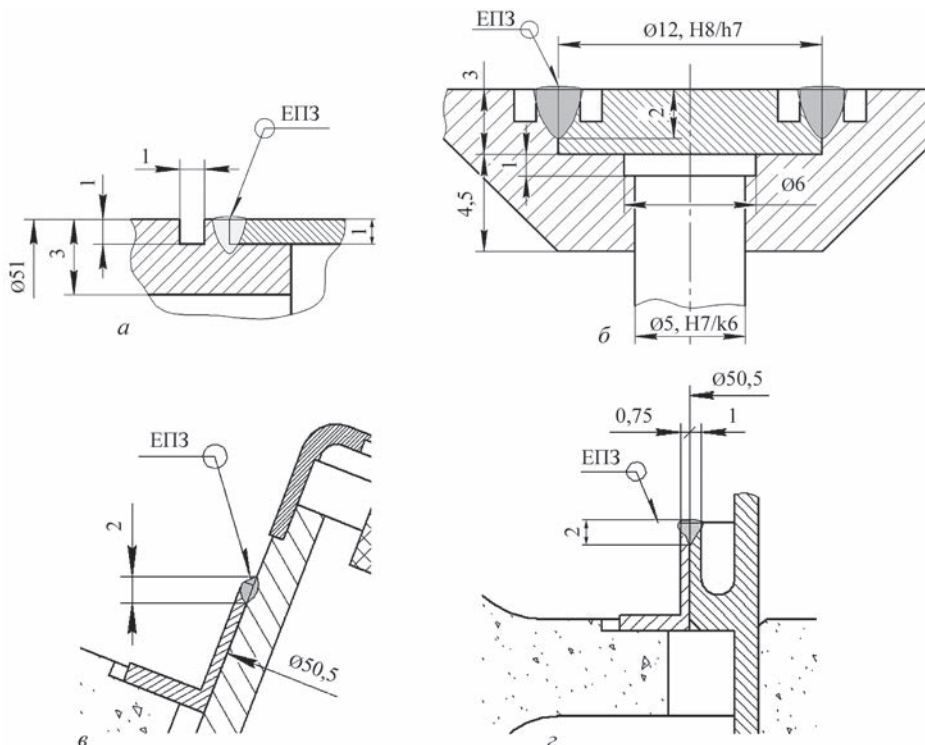


Рис. 1. Приклади конструктивного оформлення зварних з'єднань КВ (а, б): а – стикового з'єднання з односторонньою відбортовкою кромки; б – з двосторонньою відбортовкою кромки. Два типи електронно-променевих з'єднань катодного вузла з ізолятором ЕПГ (в, г): в – внахліст; г – з двосторонньою відбортовкою кромки

Похибка в цьому випадку допускається в 0,09 мм. Перевищення кромки має бути не більше 0,5 мм або 20...25 % товщини. Зварювання по відбортовці кромки при дотриманні складального зазору в межах 0,06...0,08 мм також не викликало труднощів.

Всі шви в розглянутій зварній конструкції КВ були кільцевими. Відомо, що вироби, деталі яких істотно розрізняються по товщині, зварюють з попередньою обробкою кромки для вирівнювання температурного поля, що забезпечує симетричну форму проплавлення. З метою мінімізації тепловідведення в виріб при зварюванні кільцевих швів КВ застосовувалися конструктивні вибірки (рис. 1).

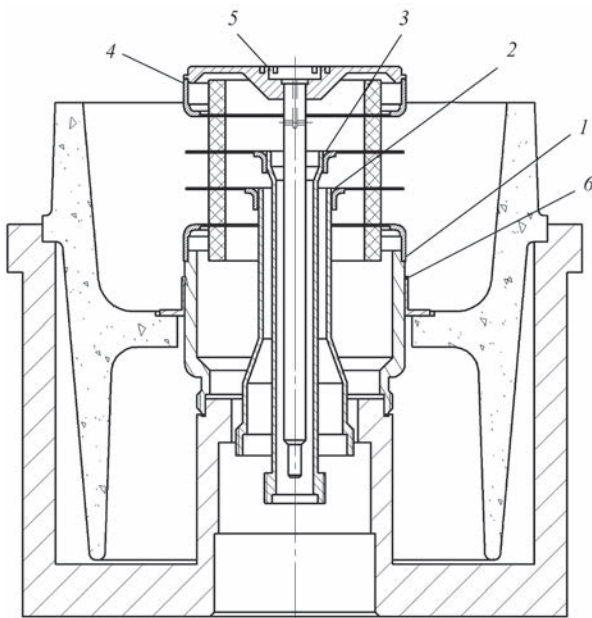


Рис. 2. Послідовність складання і зварювання КВ за допомогою ЕПЗ: шов № 1 (втулки електрода Венельта з високовольтним вводом); № 2 (втулки катодної з високовольтним вводом); № 3 (втулки нагрівача з високовольтним вводом); № 4 (кришки з високовольтним вводом); № 5 (установка штиря підігрівача в кришку); № 6 (з'єднання КВ з ізолятором)

Процес зварювання також критичний до точності розташування плями нагріву по відношенню до стику. У разі його відхилення від траєкторії стику можливі непровари, пропали, підризи. Непровари і пропали не забезпечують вакуумної щільності швів та є основними бракувальними критеріями як найбільш небезпечні дефекти. Такі дефекти важко усувати при повторному переплаві. Повторні проходи призводять до формування в шві крупнозернистої стовбчатої структури і гарячих тріщин, до яких схильні нікелеві сплави. Тому число проходів не повинно бути більше двох.

Грунтуючись на результатах попередніх досліджень ЕПЗ, була створена мапа технологічного виробництва КВ, що складається з шести деталей: втулки електрода Венельта, втулки катодної, втулки нагрівача, кришки та штиря нагрівача катода (рис. 2).

На рис. 3 мапа доповнена фото макрошліфів характерних типів зварних з'єднань.

Деталі КВ (втулки катодної з високовольтним вводом та втулки нагрівача з високовольтним вводом) виготовлялися та з'єднувалися (шов № 2 та шов № 3) в двох конструкторських варіантах: *а* – стикове з'єднання електродів КВ; *б* – стикове з'єднання електродів КВ застосуванням по відбортовці.

Використання конструкції за варіантом (*б*) дозволило зменшити критичність величини стикового



Рис. 3. Макрошліфи характерних типів зварних з'єднань катодного вузла (КВ): *а-в* – відповідно шви № 1, № 5, № 6

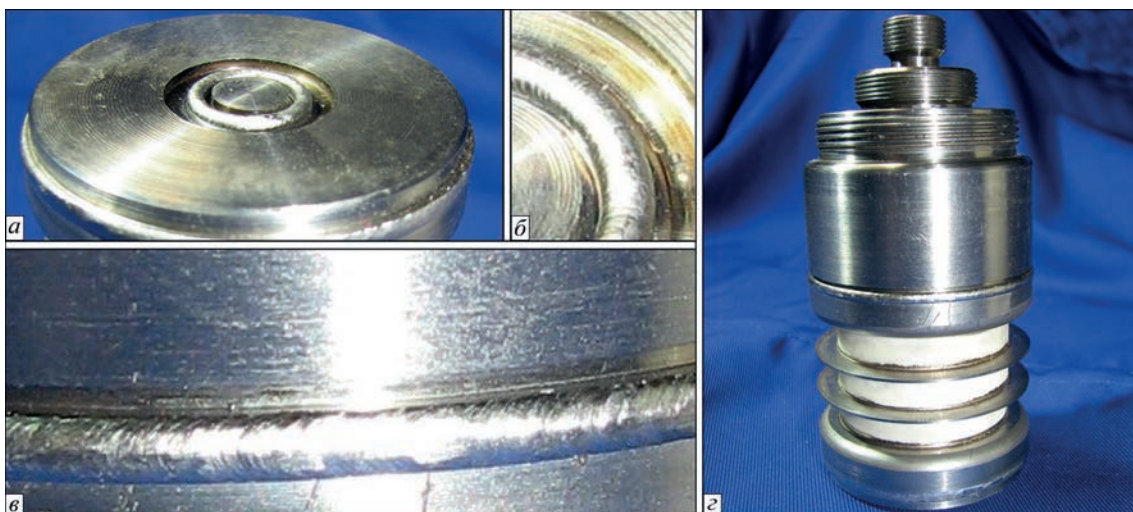


Рис. 4. Фрагменти швів різних частин КВ (*а-в*) та загальний його вигляд у зборі (*г*): *а* – вид згори на кришку КВ зі швами №№ 4 та 5; *б* – фрагмент шва № 5; *в* – фрагмент шва № 1

зазору. Зварне з'єднання з відбортовкою кромки було реалізовано також і при установці штиря підігрівача в кришку КВ (шов № 5).

В результаті на катодному вузлі були отримані якісні зварні шви, фрагменти яких разом із загальним виглядом КВ представлено на рис. 4.

Заключний, найвідповідальніший етап вварювання КВ в тонкостінний (0,5...0,8 мм) фланець керамічного ізолятора ЕПГ проводиться в спеціально виготовленому за формою посадочних місць ізолятора кондукторі. Кондуктор закріплений на обертачі, під кутом з відхиленням від вертикалі до 10°. Ця вимога є обов'язковою для забезпечення можливості виконання зварювання у важкодоступних місцях зварюємого КВ з коаксіальними швами, розташованими на різній висоті.

З метою підвищення технологічності процесу складання і зварювання проведена модернізація конструкції КВ. Зокрема, змінено тип і форму зварного з'єднання при вварюванні КВ в ізолятор.

Заміна одного типу зварного з'єднання – напускного, звареного під гострим кутом в торці (рис. 1, в), тобто зварне з'єднання, в якому зварювані елементи розташовані паралельно і част-

ково перекривають один одного на двосторонню відбортовку (рис. 1, з), дала можливість спростити схему зварювання на заключному етапі. Така схема дозволила знизити ризик як непровару, так і пропалу тонкої бічної стінки КВ. З іншого боку, була виключена ймовірність перегріву зони поблизу паяного з'єднання (фланця з ізолятором) і, як наслідок, порушення його вакуумної щільності. Після завершення всіх етапів зварювання геометричні розміри КВ знаходилися в межах допуску. При цьому значно скоротився час підготовчих робіт перед зварюванням без зниження точності складання таких виробів. На рис. 5 представлений КВ в зборі з високовольним ізолятором.

Техніка складання тонкостінних високоточних зварних конструкцій, відповідні зварювальні пристосування та шляхи їх вдосконалення описано в літературі [4, 5].

Нами був розроблений комплект зварювального оснащення для збирання – зварювання електродів в КВ і подальшого вварювання в ізолятор ЕПГ.

Зварювальне оснащення являє собою набір циліндричних оправок, які в залежності від етапу зварювального процесу закріплюються на обертачі (рис. 6, а).

ЕПЗ катодного вузла є прецизійним процесом і вимагає мінімальних як осевого, так і радіального биття обертача. З цією метою зварювальне оснащення виготовлено таким чином, щоб його закріплення разом зі зварюваним виробом відбувалося безпосередньо на валу обертача.

Таке рішення дозволило звести до мінімуму необхідність програмного коректування положення електронного пучка відносно стику під час зварювання.

При складанні деталей під зварювання забезпечувалися відсутність зазору по торцевих поверхнях і гарантований натяг по циліндричних.

Для захисту міжелектродного простору КВ електронної оптики від наплення парами металу при ЕПЗ на робочій потужності і виключення



Рис. 5. Зовнішній вигляд КВ в зборі з ізолятором: 1 – ізолятор; 2 – КВ; 3 – шов

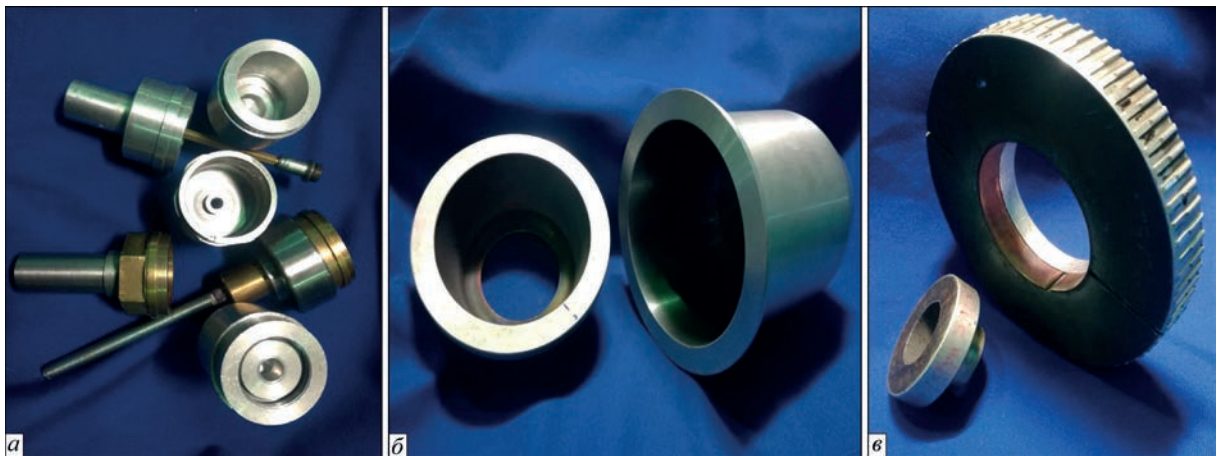


Рис. 6. Зварювальне оснащення (а), скануючий пристрій (б) та тепловідвідне оснащення (в)

внаслідок цього замикання електродів використовувалися ізолюючі прокладки і ковпачки, екрани з немагнітного матеріалу (рис. 6, б, в). У разі приварювання втулки електрода Венельта додатково застосовувалося тепловідвідне оснащення з немагнітного матеріалу кільцевого типу з мідним вкладишем (рис. 6, в).

На закінчення можна відзначити, що завдяки змінам, внесеним до конструкції КВ, розробці технології ЕПЗ, в тому числі, на імпульсному режимі, була виготовлена дослідно-промислова партія КВ для вітчизняних ЕПГ з прискорюючою напругою 60 та 120 кВ.

Висновки

1. Розроблено оптимальну конструкцію катодного вузла (КВ) та складально-зварювальні пристосування.

2. Запропонована послідовність складання і зварювання катодного вузла, що дозволило виключити втрати форми виробу, пропали і напильня електродів КВ парами металу.

3. Обґрунтована можливість застосування ЕПЗ в якості фінішної операції при виробництві КВ із забезпеченням експлуатаційної надійності всього блоку в цілому, включаючи його з'єднання з ізолятором.

Список літератури

1. Костин А.М., Лабарткава Ал.В., Мартыненко В.А. (2014) Исследование процессов взаимодействия титаносодержащих припоев с оксидной керамикой и коваром. *Металлофизика и новейшие технологии*, 36, 6, 815–827.
2. Назаренко О.К., Локшин В. Е., Пащора С.К. (1981) Воспроизводимость пространственно-временных характеристик сварочных пучков электронов. *Автоматическая сварка*, 8, 41–43.
3. Акулов А.И. (ред.). (1978) *Сварка в машиностроении. Т. 2. Справочник*. Москва, Машиностроение.
4. Крампит Н.Ю., Крампит А.Г. (2008) *Сварочные приспособления*. Юрга, ЮТИ ТПУ.
5. Куркин С.А., Ховов В.М., Рыбачук А.М. (1989) *Технология, механизация и автоматизация производства сварных конструкций. Атлас*. Москва, Машиностроение.

References

1. Kostin, A.M., Labartkava, Al.V., Martynenko, V.A. (2014) Investigation of processes of interaction between titanium-containing brazing filler metal and oxide ceramics and covar. *Metallofizika i Novejshie Tekhnologii*, 36(6), 815-827 [in Russian].
2. Nazarenko, O.K., Lokshin, V.E., Patsiora, S.K. (1981) Reproducibility of spatial-time characteristics of welding electron beams. *Avtomatich. Svarka*, 8, 41-43 [in Russian].
3. (1978) *Welding in machine-building: Refer. book. Vol.2*. Ed. by A.I. Akulov. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Krampit, N.Yu., Krampit, A.G. (2008) *Welding accessories*. Yurga, YuTI TPU [in Russian].
5. Kurkin, S.A., Khovov, V.M., Rybachuk, A.M. (1989) *Technology, mechanization and automation of production of welding structures: Atlas*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

FEATURES OF APPLYING ELECTRON BEAM WELDING IN MANUFACTURE OF THE CATHODE ASSEMBLY OF THE ELECTRON GUN

V.M. Nesterenkov, V.I. Zagornikov, Yu.V. Orsa, O.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 efficiency of using electron beam welding in producing dissimilar joints of structural materials of all thicknesses and shapes is well-known. The work for the first time considers the possibility of using electron beam welding for the production of high-precision parts of optical system in cathode unit, providing the necessary parameters and their joining with electron beam gun insulator in future. The use of electron beam welding at the final stage of manufacturing cathode unit opens the opportunity of minimizing the number of further technological operations. It is noted that to create the welding technology, in which the operation of welding would become a final assembly operation, the development of new designs of welded joints and schemes for assembly of cathode unit are required. Due to a correct design of welding units and compliance with the accuracy of assembling for welding, it became possible to preserve geometric dimensions after electron beam welding and to provide the operational reliability of the design as a whole. 5 Ref., 6 Fig.

Keywords: electron beam welding, pulsed mode, nickel alloy, cathode unit, welding equipment

Надійшла до редакції 13.11.2019

Cutting World 2020

Ярмарка профессиональных технологий резки

С 28 по 30 апреля 2020 г. Cutting World будет открыта в Messe Essen. Это единственная выставка, которая концентрируется на всей технологической цепочке на тему резки. Многочисленные экспоненты уже воспользовались возможностью, чтобы обеспечить зоны стендов в новом зале 8. В их число входят следующие компании: Assfalg, Boschert, Cam Concept, Eckelmann, Kjellberg, MGM, ProCom and Rosenberger, Air Liquide Deutschland, VKE, IHT Automation, NUM, STM Waterjet and Yamazaki Mazak. Заинтересованные участники могут найти регистрационные документы на www.cuttingworld.de. Крайний срок регистрации 30 ноября 2019 г.

В 2020 г. Cutting World впервые пройдет в модернизированном зале 8 в Messe Essen. Экспоненты и посетители попадут в зал через новое, залитое светом стеклянное фойе. Восточный конгресс-центр расположен в непосредственной близости и будет принимать Немецкий конгресс по резке и Немецкую конференцию по газопламенной резке. Кроме того, участники Cutting World получают выгоду от благоприятного для инвестиций климата, потому что рынок режущих установок находится в состоянии постоянного изменения. Почти половине существующих металлорежущих станков уже более семи лет, и в этом секторе все больше требуются современные процедуры создания сетей и взаимосвязи последующих и начальных процессов обработки. Благодаря технологиям Industry 4.0 эксперты ожидают дополнительный потенциал получения прибыли в диапазоне миллиардов Еуро для машиностроения в Германии в ближайшие годы.

