

## СТІЙКІСТЬ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ З БІФІЛЯРНОЮ СХЕМОЮ ЖИВЛЕННЯ БЕЗ ВИРІВНЮВАЛЬНОГО ДРОТУ

Ю.М. Ланкін, В.Г. Соловійов, В.Г. Тюкалов, І.Ю. Романова

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: hhsova@gmail.com

Електрошлакове зварювання (ЕШЗ) дротяними електродами з біфілярною схемою підключення живлення без зрівняльного дроту в даний час не застосовується. Є підстави вважати, що біфілярне ЕШЗ без зрівняльного дроту має переваги перед біфілярним електрошлаковим переплавом (ЕШП) без зрівняльного дроту. Тому потрібні додаткові дослідження процесу біфілярної ЕШЗ без зрівняльного дроту. Проведено дослідження та визначено діапазон параметрів стійкого процесу ЕШЗ з біфілярною схемою живлення без зрівняльного дроту за допомогою математичного експерименту. Причинами розбалансу процесу можуть бути тимчасове порушення швидкості подачі одного з електродів, місцева зміна перерізу електрода, асиметричне розташування електродів в шлаковій ванні та ін. Введено поняття «стійкість до зовнішніх факторів». В якості міри стійкості запропоновано використати максимальне значення параметра REI, вище за яке процес переходить в нестійкий режим. Отримано номограму REI в залежності від напруги зварювання і швидкості подачі електродів, яка дозволяє вибрати режим біфілярного ЕШЗ з найбільшою стійкістю до дії зовнішніх збурюючих факторів. На математичній моделі показано, що процес біфілярної ЕШЗ без зрівняльного дроту може протікати стійко в певній зоні значень параметрів технологічного режиму. Бібліогр. 4, табл. 1, рис. 5.

*Ключові слова:* електрошлакове зварювання, біфілярна схема, шлакова ванна, металева ванна, електропровідність

У 1960-х роках в ІЕЗ ім. Є.О. Патона був розроблений новий спосіб електрошлакового переплаву (ЕШП) – так званий біфілярний електрошлаковий переплав. Суть способу полягає в тому, що в біфілярній печі два витратні електроди підключені послідовно до вторинної обмотки однофазного трансформатора. Доведено, що біфілярний електрошлаковий переплав має більше переваг перед канонічним двохелектродним монофілярним ЕШП [1], оскільки установки, які працюють за цією схемою, витрачають менше електроенергії, більш продуктивні та мають вищий коефіцієнт потужності. Особливо великі їх переваги при виробництві злитків-слябів і листових злитків. Проте, разом з перевагами (такими, як сприятливе розташування зон основного тепловиділення в шлаковій ванні, зменшення реактивного опору пічного навантаження) біфілярна піч ЕШП без зрівняльного дроту виявилася працездатною лише в певному діапазоні режимів переплаву внаслідок неефективного саморегулювання. Тобто, при певних короткочасних зовнішніх збуреннях, які діяли на процес, процес ставав нестабільним. Для усунення цього недоліку зі збереженням переваг біфілярної схеми ЕШП вторинна обмотка живлячого трансформатора виконується з середньою точкою, підключеною зрівняльним дротом до зварюваного виробу.

Що стосується біфілярної ЕШЗ дротяними електродами без зрівняльного дроту, то така технологія до теперішнього часу не застосовувала-

ся. Є підстави вважати, що біфілярне ЕШЗ без зрівняльного дроту має переваги перед біфілярною ЕШП без зрівняльного дроту. Оскільки площа перерізу плавких електродів в ЕШЗ і ЕШП значно відрізняється, то істотно відрізняються і теплофізичні процеси, що обумовлюють їх плавлення. Аналіз картини розтікання струму в шлаковій ванні біфілярної печі ЕШП без зрівняльного (нульового) дроту [1] виконаний за спрощеною двохкоординатною (2D) електричною схемою. При цьому не враховувалось розтікання струму по кромках виробу та повзунах. Запропоноване співвідношення між струмом, що протікає через шлак і металеву ванну (10...30 %), і струмом, що протікає тільки між електродами в шлаковій ванні (90...70 %), вимагає уточнення в трьохкоординатному (3D) вимірі. Тому потрібні додаткові дослідження процесу біфілярної ЕШЗ без зрівняльного дроту. Нові дані внесуть коригування в діапазон параметрів для стійкого процесу ЕШЗ.

Метою роботи є дослідження та визначення діапазону параметрів стійкого процесу ЕШЗ з біфілярною схемою живлення без зрівняльного дроту за допомогою математичного експерименту.

Математичний експеримент був проведений за допомогою раніше створеної моделі [2]. У вказаній роботі проведено математичні експерименти з двохелектродними ЕШЗ, підключеними до джерела живлення за канонічною схемою та біфілярною схемою із зрівняльним дротом. Для дослідження

розподілу електричного поля, струму і потенціалу в шлаковій ванні, в зварюваному виробі, в шві, що утворюється, і повзунах, а також розподілу тепла в об'ємі досліджуваної зони використовувалася її скінченно-елементна модель у складі шлакової і металеві ванни, двох повзунів, двох електродів, занурених в шлакову ванну, а також фрагментів виробу і зварювального шва. У зв'язку з тим, що схема підключення зварного обладнання до джерела живлення є зовнішніми умовами для моделі та не змінюють ні графічних, ні фізичних характеристик моделі досліджуваної зони ЕШЗ, прийнято рішення використати цю модель для проведення математичного експерименту при дослідженні та визначенні параметрів стійкого процесу ЕШЗ з біфілярною схемою живлення без зрівняльного дроту. При цьому кабелі вторинної обмотки трансформатора ізолюються від заземлювальної клеми джерела живлення. На рис. 1 наведено схему живлення ЕШЗ.

При біфілярній схемі живлення ЕШЗ без зрівняльного дроту струм в шлаковій ванні проходить по двох узагальнених ланцюгах: «електрод e1 – шлакова ванна – електрод e2»; «електрод e1 – шлакова ванна – виріб – шлакова ванна – електрод e2». Мається на увазі, що струм, що протікає по виробу, це струм через металеву ванну, кромки виробу та повзуни. Величина струму в кожному з вказаних ланцюгів залежить від їх електричної провідності, яка у свою чергу залежить від складу флюсу, марок використовуваних металів, а також від температурного стану кожного елементарного об'єму даної зони зварювального процесу, через який протікає струм. Потенціал обох кромок виробу, повзунів, зварного шва та металеві ванни має практично рівне значення у зв'язку з їх малим питомим опором в порівнянні з більш високим питомим опором шлакової ванни. Крім того, в цілях електричної безпеки обслуговуючого персоналу установка ЕШЗ і виріб мають заземлення.

При зміні напруги живлення ЕШЗ і/чи швидкості подачі електродів в шлакову ванну змінюється

величина заглиблення електродів і швидкість їх сплавлення. При цьому змінюється провідність кожного з вказаних ланцюгів і розподіл кількості тепла, що виділяється в шлаку. У зв'язку з тим, що в біфілярній схемі в обох електродах протікає один і той же струм, між процесами саморегулювання швидкості сплавлення кожного з них виникає зворотний зв'язок. Тому для біфілярної схеми важливе дотримання балансу між швидкостями сплавлення електродів, оскільки зміна зворотного зв'язку саморегулювання в електродах з негативного до позитивного може призвести до нестабільності протікання процесу ЕШЗ. Причинами розбалансу можуть бути тимчасове порушення швидкості подачі одного з електродів, місцева зміна перерізу електрода, асиметричне розташування електродів в шлаковій ванні та ін. Приклад асиметричного протікання процесу ЕШЗ наведено на рис. 2.

Для розуміння того, як змінюються електричні характеристики електрошлакового процесу при внесенні в нього різних збурень, наприклад, при зміні швидкостей подачі електродів в шлакову ванну, у лабораторних умовах в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України був проведений фізичний експеримент біфілярного ЕШП в графітовий кокіль з використанням апарату АД-381Ш [3]. Переплави виконаний з біфілярною схемою підключення джерела живлення без зрівняльного дроту із заземленим стендом. Технологічні параметри експериментального перепау: внутрішні розміри кокіля 80×30 мм, відстань між електродами 40 мм (при симетричному розташуванні електродів один відносно іншого); глибина шлакової ванни 50...70 мм; діаметр електродного дроту 3 мм; кількість електродів 2.

Мета випробувань полягала в тому, щоб при напрузі живлення  $U = 85$  В, змінюючи в процесі перепау в певному інтервалі швидкість подачі електрода e2 (при незмінній швидкості подачі електрода e1), провести безперервний запис на електронний носій таких параметрів, як швид-

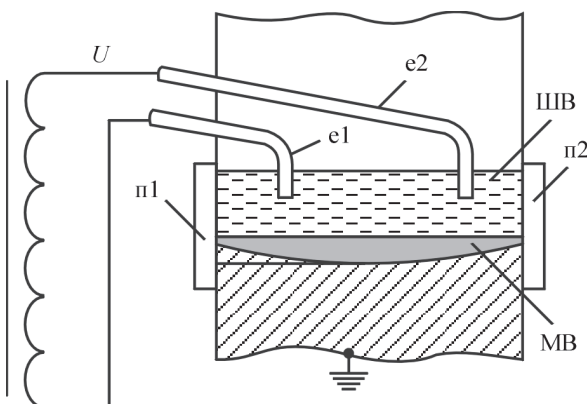


Рис. 1. Двоелектродна біфілярна схема живлення ЕШЗ без зрівняльного дроту ( $U$  – напруга джерела живлення; e1 і e2 – плавкі електроди; p1 і p2 – повзуни, охолоджувані водою; ШВ, МВ – шлакова та металева ванни)

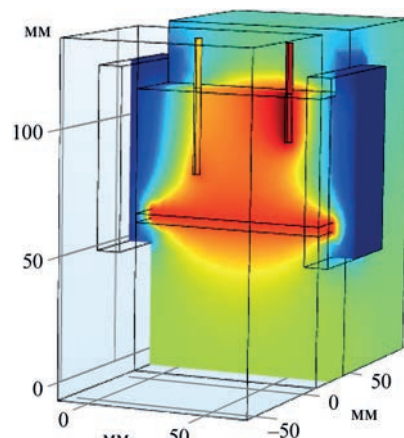


Рис. 2. Фрагмент графічної частини моделі (у розрізі) при виниклій асиметрії протікання процесу ЕШЗ

кість подачі електрода е1 –  $V_{\text{под1}}$ , швидкість подачі електрода е2 –  $V_{\text{под2}}$ , напругу між мундштуком електрода е1 і виробом  $U_1$ , напругу між виробом і мундштуком електрода е2 –  $U_2$ , а також струм джерела живлення  $I_{\text{зв}}$  (рис. 3).

На рис. 3 видно, як при зміні  $V_{\text{под2}}$  змінюється напруга між електродами та виробом  $U_1$  і  $U_2$ . Сума цих напруг дорівнює напрузі джерела живлення 85 В. В інтервалі  $\tau_1$ - $\tau_2$   $V_{\text{под2}}$  менше  $V_{\text{под1}}$ , в результаті зменшується заглиблення електрода е2 (рис. 2), зменшується провідність каналу «електрод е2 – виріб», струм джерела живлення зменшується, а напруга  $U_2$  між електродом е2 і виробом збільшується. Відповідно зменшується напруга між електродом е1 і виробом  $U_1 = U - U_2$ . На цьому інтервалі часу при малій  $V_{\text{под2}}$  напруга  $U_1$  досягає критично малого значення 7,1 В. При цьому електрод е2 досягає мінімуму заглиблення в шлакову ванну і струм  $I_{\text{зв}}$  різко падає з 350 до 290 А. Аналогічна ситуація спостерігається у момент часу  $\tau_3$ , коли електрод е1 досягає мінімуму заглиблення в шлакову ванну при критичному значенні напруги  $U_2 = 9,9$  В. При цьому струм  $I_{\text{зв}}$  різко падає з 460 до 300 А.

Цей фізичний експеримент показав, що при деяких поєднаннях значень параметрів електрошлакового процесу та зовнішніх збурень можливий зрив стабільності протікання процесу. Для технолога, який розробляє процес плавки, важливо знати робочу зону значень параметрів і рівень стійкості процесу до зовнішніх збурень. Введемо поняття, що характеризує електрошлаковий процес з біфілярною схемою живлення без зрівняльного дроту – «стійкість до зовнішніх факторів». В якості міри стійкості пропонується використати максимальне значення параметра REI, вище за яке процес переходить в нестійкий режим. REI визначається таким чином:

$$\Delta U = |U_1 - U_2|; \text{rei} = \left| \frac{\Delta U}{U} \right| \cdot 100 \%,$$

де rei – проміжне значення зовнішнього фактору, %;  $\text{REI} = \max(\text{rei})$  – межа режиму стійкого протікання процесу. Стійкий режим знаходиться в діапазоні  $0 \leq \text{rei} < \text{REI}$ .

При біфілярній ЕШЗ будь-яка зовнішня дія, що призводить до розбалансу швидкостей сплаву електродів, завжди призводить до значення  $\Delta U > 0$ . Тому при обчислювальному експерименті розбаланс можна задавати в моделі шляхом зміни  $\Delta U$ , як джерела розбалансу, що є універсальним.

Для обчислювального експерименту прийнято наступні параметри моделі:  $U = 85$  В;  $V_{\text{под1}} = 280$  м/год; товщина виробу 80 мм; ширина проміжку 30 мм; глибина шлакової ванни 50 мм; відстань між електродами 40 мм; матеріал виробу – сталь 09Г2С; електродний дріт – сталь Св.08Г2С; флюс АН-8; формувальні повзуни – мідь. Фізичні властивості матеріалів наведені в таблиці [4].

Параметри  $C_p[T]$ ,  $\rho[T]$ ,  $k[T]$ ,  $\alpha[T]$ ,  $\sigma_{st}[T]$ ,  $\sigma_{sh}[T]$  задані відповідними апроксимуючими залежностями від температури  $T$ , К (в статті не наводяться).

В результаті обчислювального експерименту отримано максимальне значення короточасного збурюючого фактору. Знайдена межа, при якій зворотний зв'язок між процесами саморегулювання швидкостей сплаву обох електродів переходить з негативного зворотного зв'язку до позитивного (рис. 4).

Максимальне значення збурення, вище за яке процес переходить в нестабільний стан,  $\Delta U = 14,4$  В. При  $U = 85$  В значення стійкості має бути:

$$\text{REI} = \frac{14,4}{85} \cdot 100 \% = 19,9 \%$$

При довготривалій дії зовнішнього фактору, значення якого менше REI, процес прийме стійкий стан з різною величиною заглиблення електродів в шлакову ванну, що приведе до асиметричності

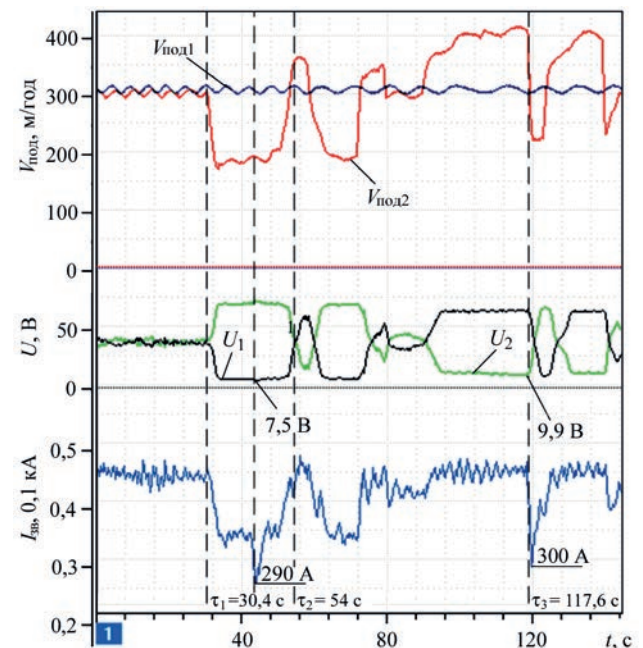


Рис. 3. Залежності змін в часі параметрів ЕШП з імітацією зовнішніх збурень

**Фізичні властивості матеріалів, що використовувалися в моделі**

Параметр	Виріб	Електроди	Шлак	Повзуни	Шов
Теплосмність ( $C_p$ ), Дж/(кг·К)	$C_p[T]$	$C_p[T]$	1400	385	$C_p[T]$
Відносна діелектрична проникність ( $\epsilon$ )	1	1	2,5	1	1
Щільність ( $\rho$ ), кг/м <sup>3</sup>	$\rho[T]$	$\rho[T]$	2600	8960	$\rho[T]$
Теплопровідність ( $k$ ), Вт/(м·К)	$k[T]$	$k[T]$	295	400	$k[T]$
Коеф. температурного розширення ( $\alpha$ ), 1/К	$\alpha[T]$	$\alpha[T]$	-	17E-6	$\alpha[T]$
Питома електропровідність ( $\sigma$ ), См/м	$\sigma_{st}[T]$	$\sigma_{st}[T]$	$\sigma_{sh}[T]$	6E7	$\sigma_{st}[T]$

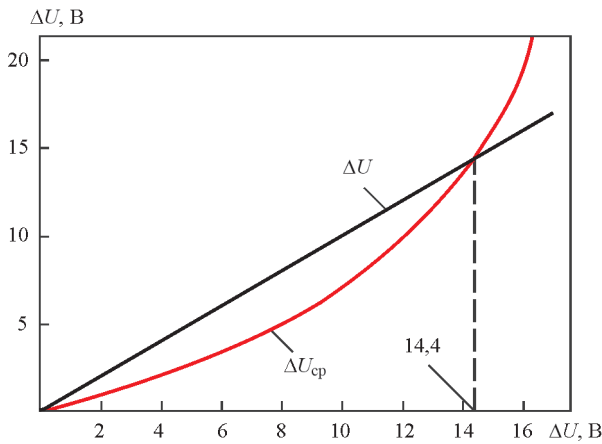


Рис. 4. Результат саморегулювання швидкостей сплаву електродів ( $\Delta U$  – величина збурюючого фактору, В;  $\Delta U_{ср}$  – відповідна реакція процесу в результаті саморегулювання швидкостей сплавлення електродів, В)

теплого поля та може призвести до порушення рівномірності проплавлення кромки виробу.

На створеній моделі проведено обчислення REI для різних поєднань значень  $U$  і  $V_{под}$ . Отримано номограму  $REI = F[U, V_{под}]$  (рис. 5), яка дозволяє вибрати режим біфілярного ЕШЗ без зрівняльного дроту з найбільшою стійкістю до дій зовнішніх збурюючих факторів. При розрахунку REI задавалися обмеження для моделі, при яких процес біфілярної ЕШЗ імовірно має бути стабільним, це:

- температура нижніх торців електродів не виходить за межі 1500...2000 °С;
- величина заглиблення електродів не виходить за межі 2...48 мм;
- обов’язкова наявність негативного зворотного зв’язку між процесами саморегулювання обох електродів.

Дослідження умов розтікання струму в шлаковій ванні і виробі, проведене на моделі, показало, що залежно від режиму ЕШЗ (напруга, швидкість подання електродів, геометричні параметри зварної зони, розміщення електродів в шлаковій ванні) від 33 до 85 % струму протікає між електродами через шлакову ванну, тоді як інша частина струму (15...67 %) протікає через шлак і виріб, вклю-

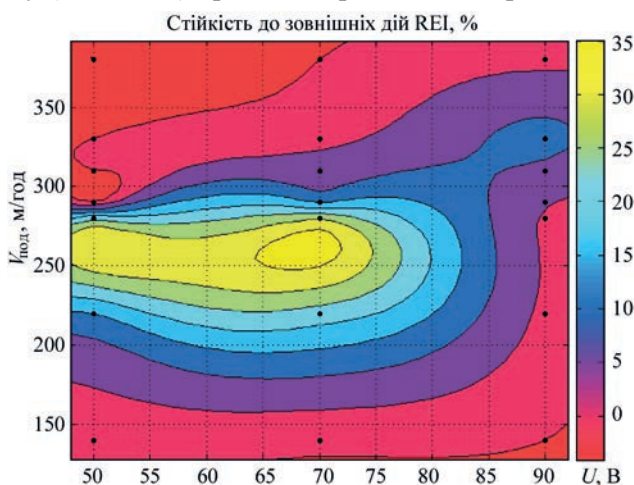


Рис. 5. Номограма стійкості процесу біфілярної ЕШЗ

чаючи повзуни. Це дозволяє припустити, що для режимів біфілярної ЕШЗ без зрівняльного дроту, які характеризуються значними значеннями струмів, що протікають через виріб, вплив зворотного зв’язку між саморегулюванням кожного з електродів буде зменшений і це дозволить збільшити діапазон стійкості процесу ЕШЗ. Це може бути предметом подальших досліджень.

**Висновки**

1. Для біфілярної схеми ЕШЗ важливо дотримуватись балансу між процесами зплавлення обох електродів. Причинами розбалансу можуть бути тимчасове порушення швидкості подачі одного з електродів, місцева зміна перерізу електрода, асиметричне розташування електродів в шлаковій ванні та ін.

2. Введено поняття «стійкість до зовнішніх факторів» для біфілярних ЕШЗ без зрівняльного дроту. В якості міри стійкості запропоновано використати максимальне значення параметра REI, вище за яке процес переходить в нестійкий режим.

3. Отримано номограму REI в залежності від напруги зварювання і швидкості подачі електродів, яка дозволяє вибрати режим біфілярного ЕШЗ з найбільшою стійкістю до дій зовнішніх збурюючих факторів.

4. На математичній моделі показано, що процес біфілярного ЕШЗ без зрівняльного дроту може протікати стійко в певній зоні значень параметрів технологічного режиму.

5. Створена модель може бути використана для прогнозування параметрів стійкого процесу біфілярного ЕШЗ після випробувань на фізичній моделі.

**Список літератури**

1. (1976) *Электрошлаковые печи*. Патон Б.Е., Медовар Б.И. (ред.). Киев, Наукова думка.
2. Ланкін Ю.М., Соловйов В.Г., Тюкалов В.Г., Романова І.Ю. (2021) Порівняння процесів електрошлакового зварювання при підключенні електричного живлення за двоелектродною канонічною та біфілярною схемою. *Автоматичне зварювання*, 11, 28–34. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.11.05>
3. Ланкін Ю.Н., Москаленко А.А., Тюкалов В.Г. и др. (2008) *Применение электрошлаковой сварки в строительстве и при ремонте металлургических агрегатов*. *Сварщик*, 1, 6–9.
4. (1989) *Марочник сталей и сплавов*. Сорокин В.Г. (ред.). Москва, Машиностроение.

**References**

1. (1976) *Electroslag furnaces*. Ed. by B.E. Paton, B.I. Medovar. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Lankin, Yu.M., Soloviov, V.G., Tyukalov, V.G., Romanova, I.Yu. (2021) Comparison of electroslag welding processes at power connection with two-electrode conventional and bifilar diagram. *The Paton Welding J.*, 11, 40-43.
3. Lankin, Yu.M., Moskalenko, A.A., Tyukalov V.G. et al. (2008) Application of electroslag welding in construction and repair of metallurgical installations. *Svarshchik*, 1, 6–9 [in Russian].
4. (1989) *Grades of steels and alloys*. Ed. by V.G. Sorokin. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

## STABILITY OF THE PROCESS OF ELECTROSLAG WELDING WITH BIFILAR POWER CIRCUIT WITHOUT EQUALIZING WIRE

Yu.M. Lankin, V.G. Solovyov, V.G. Tyukalov, I.Yu. Romanova

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

E-mail: hhsova@gmail.com

Electroslag welding (ESW) by wire electrodes with bifilar circuit of power connection without equalizing wire is not applied now. There is reason to believe that bifilar ESW without the equalizing wire has certain advantages over bifilar electroslag remelting (ESR) without equalizing wire. Therefore, additional studies of the process of bifilar ESW without equalizing wire are required. Investigations were performed and the range of parameters of a stable process of ESW with a bifilar power circuit without an equalizing wire was determined, using a mathematical experiment. The causes for process unbalance can be temporary violation of the feed rate of one of the electrodes, local change of electrode cross-section, asymmetrical arrangement of the electrodes in the slag pool, etc. The notion of «resistance to external impact» (REI) was introduced. It was proposed to use as the measure of resistance, the maximum value of REI parameter, above which the process goes into an unstable mode. REI nomogram was obtained, depending on welding voltage and electrode feed rate, which allows selection of the mode of bifilar ESW with the highest resistance to external disturbances. A mathematical model was used to show that the process of bifilar ESW without an equalizing wire can run in a stable manner in a certain zone of values of the technological mode parameters. 4 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: electroslag welding, bifilar scheme, slag pool, metal pool, electric conductivity

Надійшла до редакції 13.10.2021

**Розроблено в ІЕЗ**

### Плазмове різання металів підвищених товщин на зворотній полярності

Обладнання призначене для різання нержавіючих сталей, чорних і кольорових металів (алюмінієвих, мідних, титанових та інших сплавів) товщиною 5–150 мм і вище з використанням плазмової дуги постійного струму прямої дії та забезпечує ефективне різання металевого листа, а також різноманітного лиття.

#### Технічні характеристики обладнання

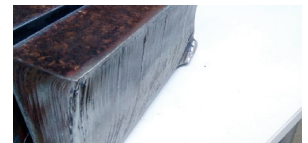
##### для плазмового різання металів на зворотній полярності

Напруга живлячої мережі при частоті 50 Гц, В . . . . . 3 x 380;  
 Вихідна потужність, кВт . . . . . до 250;  
 Напруга холостого ходу, В. . . . . до 700;  
 Робоча напруга на дузі, В . . . . . 200...650  
 Діапазон регулювання робочого струму дуги, А. . . . . 50...400  
 Крутизна (диференційний опір) зовнішньої характеристики, В/А . . . більше 20  
 Витрата плазмоутворювального газу (повітря), м<sup>3</sup>/год . . . . . 5...35  
 Тиск повітря в мережі, МПа . . . . . 0,8...1,0  
 Витрата плазмоутворювального повітря, м<sup>3</sup>/год . . . . . 5...35



Зовнішній вигляд обладнання для плазмового різання на зворотній полярності

Фото поверхні різів пластин після плазмового різання на зворотній полярності



низьколегована конструкційна сталь (товщина 100 мм)



легована нержавіюча сталь (товщина 130 мм)

### Пайка – перспективний метод отримання з'єднань

Фахівці ІЕЗ ім. Є.О. Патона розробили технології та припої для пайки різних матеріалів в однорідному та різнорідному поєднанні стосовно до приладобудування, атомної енергетики, термоядерного синтезу, авіакосмічної та автомобільної промисловості.



Модель дивертора Cu-W



Елемент дивертора Мо - С



Модель дивертора C – Мо - SS



Теплообмінник Stainless steel IC 321



Трубчасті з'єднання Al + stainless steel IC 321



Антенна Al (3003)



Центробіжне колесо IN 718



Вузол фотоприймача Ti - Kovar



Трубчасте з'єднання Stainless steel IC 321



Бурильний інструмент (твердосплавні сплави)



Елемент фотоприймача Ti - Kovar



Елементи теплообмінників Cu+Cu