

# ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ НАСКРІЗНИХ ТРІЩИН В ДЕТАЛЯХ ВЕЛИКОЇ ТОВЩИНИ

С.М. Козулін<sup>1</sup>, І.І. Личко<sup>1</sup>, Г.С. Подима<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: s.m.kozulin@gmail.com

<sup>2</sup>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, вул. Дашавська, 6/2.

E-mail: meganom8@ukr.net

Викладено результати досліджень, виконаних з метою розробки високопродуктивної технології ремонту наскрізних тріщин в деталях великої товщини на місці їх експлуатації. Мета роботи – дослідження та розробка основних принципів високоефективного технологічного процесу відновлення дефектів типу наскрізних тріщин в деталях великої товщини на місці їх експлуатації методом багатопрохідного електрошлакового зварювання плавким мундштуком. Основні завдання роботи: вибір принципової схеми електрошлакового зварювання, розробка методики розрахунку геометричних параметрів оброблення крайок, що найбільш повно відповідають умовам утворення якісного металу зварного з'єднання в широкому зазорі, розробка базових положень техніки виконання швів, а також створення маршрутної технології ремонту. На підставі результатів виконаних досліджень розроблені алгоритм прийняття рішень і загальні принципи технології ремонту великих деталей унікального обладнання на місці його експлуатації з використанням запропонованого способу. Технологічні рекомендації для ремонту наскрізних тріщин в таких деталях базуються на наступних положеннях, вироблених стосовно особливостей запропонованого способу: область раціональних значень питомої енергії зварювання, що забезпечують бездефектне формування швів, технологічні прийоми, що забезпечують запобігання гарячих тріщин в центральних частинах швів, умови мінімізації зварювальних напружень при зварюванні жорстких з'єднань, умови регулювання хімічного складу шва, що забезпечують зменшення частки участі основного металу у формуванні шва і зниження в ньому рівня вмісту шкідливих домішок, рекомендації по вибору електродних і допоміжних матеріалів та ін. Технологічні рекомендації були успішно апробовані на шести цементних заводах при ремонті наскрізних тріщин в бандажах обертових випалювальних печей. Бібліогр. 15, рис. 5.

*Ключові слова:* багатопрохідне електрошлакове зварювання, плавкий мундштук, наскрізні тріщини, ремонт, питома погонна енергія, гарячі тріщини, зварювальні напруги, алгоритм прийняття рішень, технологічні рекомендації

Відновлення зношених або зруйнованих деталей машин є природоохоронним та ресурсозберігаючим виробництвом [1]. Головне завдання ремонтного виробництва – ефективно поновлення надійності машин в результаті найбільш оптимального використання залишкової довговічності їх деталей.

У собівартості відремонтованих машин на частку запасних частин припадає близько 70 % [2]. Оскільки собівартість відновлення деталей становить 50...60 % від вартості їх виготовлення, збільшення обсягів відновлення деталей є реальним шляхом зниження витрат на ремонт машин і агрегатів. Скорочення в 5...6 разів числа операцій при відновленні в порівнянні з виготовленням і в 20...30 разів витрати матеріалів дає собівартість відновлення деталей, що становить 40...80 % вартості нових. Виробнича практика показує, що науково обґрунтовані технологія і організація відновлення дефектних деталей дозволяють забезпечити термін служби відновлених деталей, близький до терміну служби нових, рівний йому, а в деяких випадках і перевершує його [1–3].

Ремонтні технології з використанням зварювальних процесів принципово відрізняються від застосовуваних при серійному виробництві зварних конструкцій, головним чином складністю створення універсальних технологічних рекомендацій. Це викликано тим, що дефекти, які підлягають усуненню, як правило, значно відрізняються характером, формою й розмірами, та зумовлює утворення нестандартних великих зварювальних проміжків, а також нетиповою формою оброблення крайок в результаті операції видалення дефектного металу. Тому для кожного випадку ремонту потрібна розробка або уточнення конкретних режимів зварювання, особливо техніки її виконання. Перш ніж запропонувати технологію ремонту, необхідно ретельно проаналізувати причини виходу деталі з ладу, оцінити технологічну характеристику всієї деталі і в першу чергу втомну міцність [1–3].

При виправленні більшості унікальних деталей до специфічних умов виконання ремонтних робіт відносяться: великі поперечні перерізи деталей, широкі проміжки, висока жорсткість зібрання, неможливість демонтажу ремонтної деталі, а та

Козулін С.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8368-4545>, Личко І.І. – <https://orcid.org/0000-0002-4977-7473>,

Подима Г.С. – <https://orcid.org/0000-0002-0825-3235>

С.М. Козулін, І.І. Личко, Г.С. Подима

кож механічної і високотемпературної обробки, підвищений вміст вуглецю і шкідливих домішок в литих сталях типу 35Л та ін. Крім цього, ремонт зруйнованих деталей обладнання, що входить до складу технологічної лінії з безперервним режимом роботи, повинен проводитися оперативним з метою мінімізації збитків підприємства від недопуску продукції, що також є актуальним завданням. Для цього необхідна максимально можлива структуризація завдань і створення алгоритму прийняття обґрунтованих технологічних рішень [4].

Мета роботи – дослідження та розробка основних принципів високоефективного технологічного процесу відновлення дефектів типу наскрізних тріщин в деталях великої товщини на місці їх експлуатації методом багатопрхідного електрошлакового зварювання плавким мундштуком (БЕШЗ ПМ).

Основні завдання роботи: вибір принципової схеми ЕШЗ, розробка методики розрахунку геометричних параметрів оброблення крайок, що найбільш повно відповідає умовам утворення якісного металу зварного з'єднання в широкому проміжку, розробка базових положень техніки виконання швів, а також створення маршрутно-технології ремонту.

Відомі методи ремонту наскрізних тріщин в деталях великої товщини на місці їх експлуатації з використанням способів зварювання відрізняються низькою продуктивністю, важкими умовами праці виконавців і не завжди гарантують задовільну якість зварних з'єднань [5, 6].

Аналіз технічного рівня існуючих методів ремонту [6, 7] показав, що відновлювати великі деталі з дефектами типу наскрізних тріщин раціонально технічно і економічно способом з'єднання металу великої товщини БЕШЗ ПМ (рис. 1) [8].

На підставі результатів виконаних досліджень розроблені алгоритм прийняття рішень (рис. 2) і загальні принципи технології ремонту великих деталей унікального обладнання на місці його експлуатації з використанням запропонованого способу БЕШЗ ПМ.

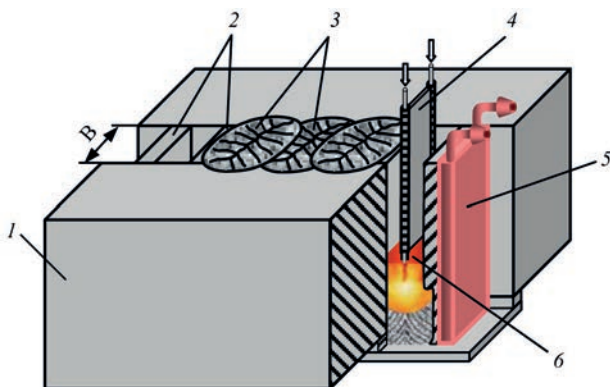


Рис. 1. Схема способу БЕШЗ ПМ масивних виробів з великим перетином з'єднувальних елементів: 1 – зварювана деталь; 2 – формуючі перегородки; 3 – зварні шви; 4 – плавкий мундштук; 5 – охолоджуваний водою формуючий пристрій; 6 – шлакова ванна; В – зварювальний проміжок

Технологічні рекомендації для ремонту наскрізних тріщин в таких деталях на місці їх експлуатації базуються на наступних положеннях, вироблених стосовно особливостей запропонованого способу. Основними з них є:

- методика розрахунку геометричних параметрів комірок і формуючих вставок в залежності від ширини проміжку (60...120 мм), що утворився після видалення металу в районі тріщини, і товщини ремонтної деталі [9];

- область раціональних значень питомої енергії зварювання, що забезпечують бездефектне формування швів [10];

- технологічні прийоми, що забезпечують запобігання гарячим тріщинам в центральних частинах швів [11];

- умови мінімізації зварювальних напружень при зварюванні жорстких з'єднань [12];

- умови регулювання хімічного складу шва, що забезпечують зменшення частки участі основного металу в утворенні шва і зниження в ньому рівня вмісту шкідливих домішок [10];

- рекомендації по вибору електродних і допоміжних матеріалів та ін.



Рис. 2. Алгоритм прийняття рішень при ремонті наскрізних тріщин у великих сталевих деталях агрегатів на місці їх експлуатації

Для успішної реалізації технології ремонту наскрізних тріщин на місці експлуатації дефектних деталей з використанням запропонованого способу БЕШЗ ПМ необхідно здійснити наступні операції:

– візуальним оглядом і за допомогою портативного приладу ультразвукової дефектоскопії, наприклад, УД2-12, визначити розміри області залягання наскрізної тріщини;

– видалити дефектну ділянку з тріщиною, виконавши два наскрізних паралельних розрізи виробу за допомогою газокисневого різання або кисневого спису (рис. 3, а). Відстань між площинами різку вибирають такою, щоб охопити всю область залягання і відгалуження тріщини;

– вимірявши величину утвореного проміжку  $B$  (рис. 3, б), вибрати потрібну ширину зварюваних комірок  $S_k$  з області їх технологічних співвідношень [9]. Визначити товщину формуючих вставок  $S_n$  з виразу  $S_n = 0,04 B + 34$ , де  $B$  – зварювальний проміжок, мм;

– визначити необхідну кількість комірок для заварки утвореного розкриття з виразу

$$n = \frac{S - S_k}{S_k + S_n} + 1,$$

де  $S$  – товщина зварюваного стику (зруйнованої деталі), мм;  $S_k$  – ширина комірки, мм;  $S_n$  – товщина вставки, мм;

– визначити відстань між осями зварюваних комірок (крок)  $t$  (рис. 4, а) з виразу [9]:

$$t = 2k \sqrt{\left[1 - \frac{B^2}{B^2 + 4h(B+h)}\right] \left(\frac{S_k}{2} + 0,577h + 13\right)^2}. \quad (2)$$

де  $k = 0,85 \dots 0,95$ ;  $B$  – зазор;  $h$  – глибина провару основного металу.

– встановити вхідну і вихідну технологічні кишені;

– провести розмітку стику під місця кріплення вставок 4 (рис. 4, а), які формують зібрання для виконання першого (центрального) проходу. До зовнішніх поверхонь вставок встановити водоохолоджувані пристрої 3;

– вибрати необхідну глибину провару основного металу і відповідно до запропонованої методики [10] визначити величину питомої погонної енергії процесу та очікувані розміри швів в поперечному перерізі;

– виготовити плавкі мундштуки 5 (рис. 4, а) і змонтувати над стиком зварювальні апарати типу АШП113М [13];

– час заварки тріщини при послідовному виконанні проходів за допомогою одного зварювального апарату розрахувати з виразу:

$$t_{зв} = \frac{H}{V_{зв}} n + (n-1)t_n, \quad (3)$$

де  $H$  – висота стику (довжина шва), мм;  $V_{зв}$  – швидкість зварювання, м/год;  $n$  – кількість комірок для заварки розкриття;  $t_n$  – час паузи між закінченням заварки попередньої і початком заварки подальшої комірки, год (залежно від рівня механізації складально-налагоджувальних робіт цей час становить  $t_n = 0,25 \dots 0,4$  год).

– машинний час зварювання стику БЕШЗ ПМ з використанням одночасно двох зварювальних апаратів визначити за формулою

$$t_{зв2} = \frac{H}{V_{зв}} \left(\frac{n-1}{2} + 1\right) + \left(\frac{n-1}{2}\right)t_n. \quad (4)$$

– провести попередній підігрів металу збірки першого проходу до температури  $150 \dots 200$  °С і виконати заварку центральної комірки б (рис. 4, а);

– після заварки центральної комірки попарно виконати інші проходи в напрямку від середини стику (центрального шва) до його країв (рис. 4, б);

– по завершенні зварювання всього стику видалити технологічні кишені, демонтувати зварювальне обладнання, на зварене з'єднання встановити переносну електропіч і зробити місцевий високий відпуск в режимі (для сталі типу 35Л): температура  $620 \dots 650$  °С з витримкою  $6 \dots 8$  год і охолодженням разом з піччю до температури  $30 \dots 80$  °С;

– провести зачистку зовнішніх поверхонь зварного з'єднання за допомогою ручного шліфувального інструмента;

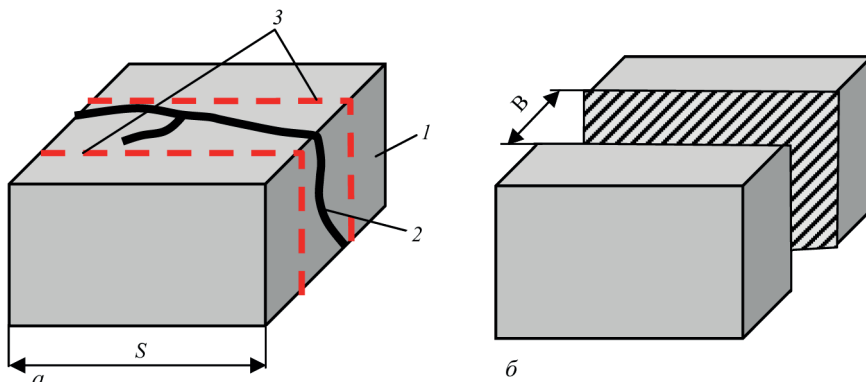


Рис. 3. Схема розмітки (а) і видалення дефектного металу в районі наскрізної тріщини (б): 1 – деталь, що підлягає ремонту; 2 – наскрізна тріщина; 3 – площина розрізу;  $B$  – зварювальний проміжок

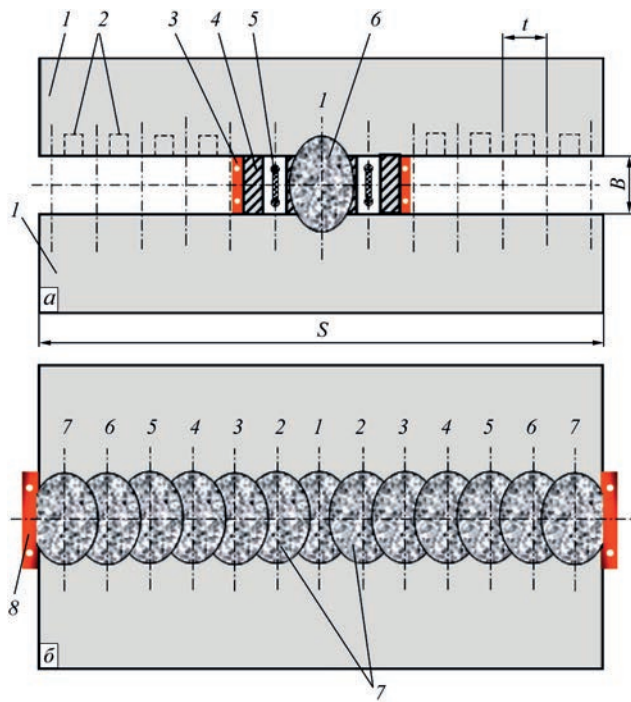


Рис. 4. Схема розмітки стику, зварки центральної комірки (а) і виконання суміжних проходів БЕШЗ ПМ (б): 1 – зварювані частини дефектної деталі; 2 – місця установки формуючих вставок; 3, 8 – водоохолоджувальний пристрій; 4 – вставка; 5 – плавкий мундштук; 6 – центральний шов; 7 – суміжні шви;  $S$  – товщина деталі (довжина наскрізної тріщини);  $B$  – проміжок;  $t$  – крок комірок

– здійснити контроль якості зварного з'єднання за допомогою переносного приладу ультразвукової дефектоскопії.

У кожному конкретному випадку проведення ремонту необхідна кількість проходів, розміри швів і час зварки стику будуть визначатися в залежності від розмірів поперечного перерізу ремонтної деталі і ступеня розгалуження наскрізної тріщини [14, 15]. Час, що витрачається на зварку тріщини, залежить від її протяжності, величини розгалуження, зварювального проміжку, кількості проходів для заповнення розкриття крайок, а також кроку між центрами отворів, утворених формуючими вставками.

Кількість отворів в розкритті збільшується зі зменшенням заданої ширини отворів і формуючих вставок. На рис. 5 показана зміна необхідної кількості формуючих отворів в залежності від їх ширини, розрахована для зварки тріщин в деталях товщиною 900 і 1200 мм. Тут же наведені графіки зміни часу зварки стику при БЕШЗ ПМ послідовно по одному отвору, а також при зварці розкриття по два отвори одночасно відповідно.

З рис. 5 випливає, що з точки зору збереження оптимальної продуктивності ремонтних робіт:

а) ширина комірок розкриття крайок повинна складати 40...45 мм;

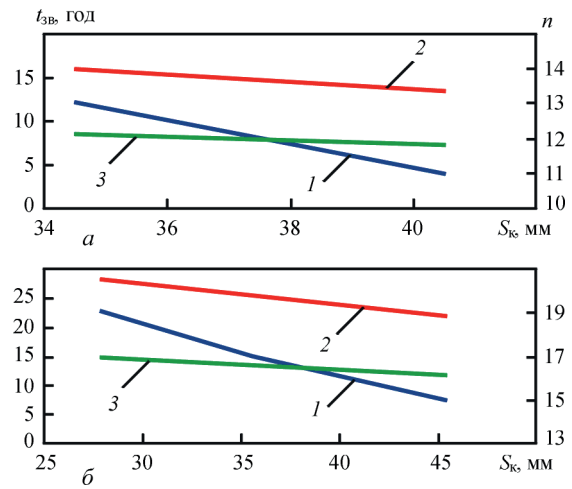


Рис. 5. Зміна кількості зварюваних комірок в розкритті  $n$  і часу зварки розкриття  $t_{зв}$  в залежності від ширини комірок  $S_k$ : а – зварюваний перетин – 900×355 мм; б – 1200×475 мм; 1 – кількість комірок; 2 – зварювання послідовно по одній комірці; 3 – зварювання одночасно по дві комірки

б) при зварці розкриття по дві комірки одночасно, загальний час зварювання стику зменшується майже в два рази.

Наприклад, для БЕШЗ ПМ стику перетином 1000 (товщина) ×420 (довжина) мм з проміжком 70 мм ширина зварюваних комірок розкриття становитиме 43 мм, а формуючих вставок – 37 мм. Для зварки такого розкриття буде потрібно виконати 13 проходів, отримуючи шви еліптичної форми розміром 105×130 мм (товщина і ширина шва відповідно). Машинний час зварювання стику за допомогою одного апарата складе 22...23 год, а одночасно двома апаратами 12...13 год.

Технологічні рекомендації були успішно апробовані на шести цементних заводах при ремонті наскрізних тріщин в бандажах обертових випалювальних печей [10, 14, 15]. Поперечні перерізи відновлених (відремонтованих) бандажів: 900×355; 900×420; 900×475 і 1200×475 (мм).

## Висновки

1. На основі виконаних досліджень розроблені принципи технології і техніки ремонту наскрізних тріщин в деталях великої товщини на місці експлуатації великогабаритного устаткування способом БЕШЗ ПМ, алгоритм прийняття рішень, спеціальне технологічне оснащення і пристосування.

2. Застосування розробленої технології дозволило скоротити загальний час відновлювальних робіт в 1,5...3,0 рази в порівнянні з дводуговим автоматичним зварюванням під флюсом. У порівнянні з електродуговими способами зварювання використання БЕШЗ ПМ для ремонту наскрізних тріщин виключає утворення дефектів у вигляді непроварів, гарячих тріщин, пор, шлакових включень та ін., що підтверджено високими експлуатаційними властивостями відновлених деталей.



## Список літератури/References

1. Пантелеев Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.П., Константинов В.М. (2003) *Восстановление деталей машин: Справочник*. Иванов В.П. (ред.). Москва, Машиностроение.
2. Pantelienko, F.I., Lylyakin, V.P., Ivanov, V.P., Konstantinov, V.M. (2003) *Restoration of machine parts: Refer. book*. Ed. by V.P. Ivanov. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Щербачков Ю.В., Кашфуллин А.М. (2018) *Современные способы восстановления и упрочнения деталей: учебное пособие*. Пермь, ИПЦ «Прокрость».
4. Shcherbakov, Yu.V., Kashfullin, A.M. (2018) *Current methods of restoration and strengthening of parts: Tutorial*. Perm, Prokrost [in Russian].
5. Ельцов В.В. (2012) *Ремонтная сварка и наплавка деталей машин и механизмов: учеб. пособие по дисциплинам «Ремонтная сварка и наплавка деталей машин и механизмов» и «Основы восстановления деталей и ремонт автомобилей»*. Тольятти, Изд-во ТГУ.
6. Eltsov, V.V. (2012) *Repair welding and surfacing of machine parts and mechanisms: Tutorial*. Tolyatti, Izd-vo TGU [in Russian].
7. Гарф М.Г. (1979) *Принятие решений при многих критериях*. Москва, Знание.
8. Garf, M.G. (1979) *Taking decisions at multiple criteria*. Moscow, Znanie [in Russian].
9. Dennis, D., Harwig, P., Fallara, V. et al. (1999) A Narrow-groove process proves robust in a massive repair. The narrow – groove submerged arc welding process is used to repair a kiln tire. *Welding J.*, **1**, 45–48.
10. Kozulin, S.M., Lychko, I.I., Kozulin, M.G. (2007) Methods of reconditioning rotary kilns (Review) *The Paton Welding J.*, **10**, 33–39.
11. Суцук-Слюсаренко И.И., Лычко И.И., Козулин М.Г., Семенов В.М. (1989) *Электрошлаковая сварка и наплавка в ремонтных работах*. Киев, Наукова думка.
12. Sushchuk-Slyusarenko, I.I., Lychko, I.I., Kozulin, M.G., Semenov, V.M. (1989) *Electroslag welding and surfacing in repair works*. Kiev: Naukova Dumka [in Russian].
13. Yushchenko, K.A., Kozulin, S.M., Lychko, I.I., Kozulin, M.G. (2014) Joining of thick metal by multipass electroslag welding. *The Paton Welding J.*, **9**, 30–33.
14. Kozulin, S.M. (2011) Selection of the groove shape for repair of through cracks by multilayer electroslag welding. *Ibid*, **3**, 32–35.
15. Козулин С.М. (2014) *Багатпрохідне електрошлакове зварювання плавким мундштуком у ремонті унікального обладнання: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.06 «Зварювання, споріднені процеси і технології»*. Київ.
16. Kozulin, S.M. (2011) *Multipass electroslag welding with consumable nozzle at repair of unique equipment*. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree*. Kyiv [in Ukrainian].
17. Kozulin, S.M., Lychko, I.I., Kozulin, M.G. (2010) Increase of resistance of welds to formation of crystalline cracks in repair of bands of kiln furnaces using electroslag welding. *The Paton Welding J.*, **1**, 32–34.
18. Kozulin, S.M., Lychko, I.I. (2011) Deformations of welded joints in multilayer electroslag welding. *Ibid*, **1**, 22–27.
19. Paton, V.E., Yushchenko, K.A., Kozulin, S.M., Lychko, I.I. (2019) Electroslag welding process. Analysis of the state and tendencies of development (Review). *Ibid*, **10**, 33–40.
20. Технология ремонта крупногабаритных толстостенных конструкций сваркой. *Мат. Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием «Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства», 15–17 ноября 2006 г., Тольятти*, ТГУ, Т.1, сс. 119–124.
21. (2006) Welding technology of repair of large-sized thick-wall structures. In: *Proc. of Sci.-Tech. Int. Conf. on Modern Problems of Improvement of Welding Production Effectiveness (15-17 November 2006, Tolyatti)*. TGU, Vol. 1, 119-124.
22. Особенности технологии ремонта дефектов крупных деталей агрегатов машиностроения на месте их эксплуатации электрошлаковой сваркой. *Мат. III науч.-техн. конф. «Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития», ДГМА, 2–5 октября 2012 г.* Макаренко Н.А. (ред.). Краматорск, ДГМА, сс. 25–26.
23. (2012) Peculiarities of repair technology of large part defects of mechanical engineering units in their operation site by electroslag welding. In: *Proc. of 3<sup>rd</sup> Sci.-Tech. Conf. on Welding Production in Mechanical Engineering: Prospects of Development (DGMA, 2-5 October 2012)*. Ed. by N.A. Makarenko. Kramatorsk, DGMA, 25-26 [in Russian].

## ELECTROSLAG TECHNOLOGIES FOR REPAIR OF THROUGH-THICKNESS CRACKS IN THICK PARTS

S.M. Kozulin<sup>1</sup>, I.I. Lychko<sup>1</sup>, H.S. Podyma<sup>2</sup><sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: s.m.kozulin@gmail.com

<sup>2</sup>NTUU «Igor Sikorskiy Kyiv Polytechnic Institute». 6/2 Dashavska Str., 03056, Kyiv, E-mail: meganom8@ukr.net

Results of investigations are presented, which were performed in order to develop a highly-productive technology for repair of through-thickness cracks in thick parts in their operation site. The objective of the work is to study and establish the main principles of a high-efficient technology of repairing defects of the type of through-thickness cracks in thick parts in their operation site by the method of consumable nozzle multipass electroslag welding. The main tasks of the study were selection of principal diagram of electroslag welding, development of a procedure for calculation of geometrical parameters of edge preparation, that the most fully meet the conditions for formation of sound metal of the welded joint in a wide gap, development of basic principles of the technique of making the welds, and creation of routing technology of repair. Performed studies were the base for development of decision taking algorithms and general principles of the technology for repair of large-sized parts of unique equipment in its operation site, using the proposed method. Technological recommendations for repair of through-thickness cracks in such parts are based on the following postulates, formulated proceeding from the features of the proposed method: domain of rational values of welding specific energy, ensuring sound weld formation, techniques allowing hot crack prevention in the weld central parts, conditions of minimizing the welding stresses when welding rigid joints, conditions of controlling the weld chemical composition that provide reduction of the fraction of base metal participation in weld formation, and lowering of harmful impurity level in it, and recommendations on selection of electrode and accessory materials, etc. Technological recommendations were successfully tried out in six cement works at repair of through-thickness cracks in the rotary kiln bands. 15 Ref., 5 Fig.

*Keywords:* multipass electroslag welding, consumable nozzle, through-thickness cracks, repair, specific heat input, hot cracks, welding voltages, decision taking algorithm, technology recommendations

Надійшла до редакції  
28.07.2021