

ДОСВІД ВИВЧЕННЯ ЕФЕКТУ ОБЕРТАННЯ ШЛАКОВОЇ ВАННИ ПРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ ДИСКРЕТНОЮ ПРИСАДКОЮ

Ю.М. Кусков, В.М. Проскудін, І.П. Лентюгов, В.О. Жданов, Л.Л. Окопнік

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

Розглянуто різні схеми отримання ефекту обертання шлакової ванни. Показано доцільність досягнення цього ефекту без використання додаткових джерел живлення та пристроїв електромагнітного впливу на шлакову ванну. Виконано експерименти на двох типах кристалізаторів — струмопідвідного і звичайного виконання. Встановлено, що для досягнення поставленої мети раціонально застосовувати струмопідвідні кристалізатори з одним або кількома розрізами та струмопідводами у струмопровідній секції. Бібліогр. 14, рис. 7.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення (переплав); водоохолоджуваний кристалізатор; дискретна присадка; обертання; шлакова ванна

Вступ. Відомо, що електрошлаковий процес характеризується наявністю магніто-гідродинамічних течій [1]. Природа цих течій не залежить від матеріалу виробів і електродів, а визначається, головним чином, електричним струмом, який проходить через шлаковий та металевий розплави, і магнітних полів, що взаємодіють із цим струмом.

Електромагнітними силами, що діють у зоні зварювання (наплавлення, переплаву та ін.), можна керувати, досягаючи як технічних, так і економічних переваг.

Найрозповсюдженішим способом такого управління є накладання на зону зварювання зовнішнього магнітного поля, яке створюється магнітними системами, що розташовані поза зоною зварювання [2–4]. Ще на самому початку розвит-

ку електрошлакового процесу було запропоновано [5] декілька схем (рис. 1), що забезпечують примусове електромагнітне обертання шлакової та зварювальної ванн завдяки використанню соленоїдів. Останні можуть живитися від стороннього джерела струму або включатися послідовно в зварювальний ланцюг. Отже в більшості випадків необхідно мати два джерела живлення: один для електрода, що переплавляється, а другий для створення обертального ефекту в ваннах.

Технічно складнішим пристроєм є секційний водоохолоджуваний кристалізатор, який автори назвали струмопідвідним кристалізатором (СПК) (рис. 2), у якому робоча напруга підводиться до однієї з секцій СПК, а обертальний ефект досягається згідно зі схемою на рис. 1, а [6].

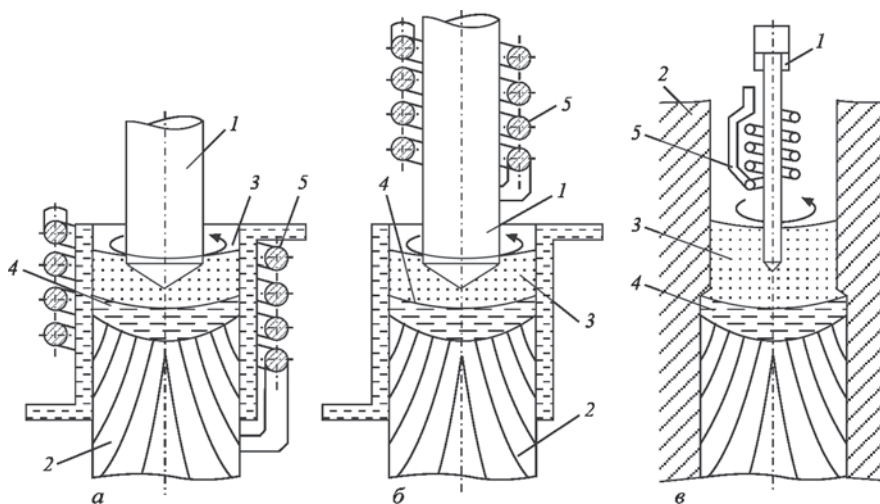


Рис. 1. Схема електрошлакового процесу з примусовим електромагнітним обертанням зварювальної ванни при розташуванні соленоїда: а — на кристалізаторі (1 — електрод, що переплавляється; 2 — наплавлений шар; 3 — шлакова ванна; 4 — металева ванна; 5 — соленоїд); б — на електроді великого перерізу (1 — електрод великого перерізу; 2 — наплавлений метал; 3 — шлакова ванна; 4 — металева ванна; 5 — соленоїд); в — при зварюванні електродним дротом (1 — механізм подачі дроту; 2 — метал, що зварюється; 3 — металева ванна; 4 — шлакова ванна; 5 — соленоїд)

Ю.М. Кусков — <http://orcid.org/0000-0002-8091-2274>

© Ю.М. Кусков, В.М. Проскудін, І.П. Лентюгов, В.О. Жданов, Л.Л. Окопнік, 2022

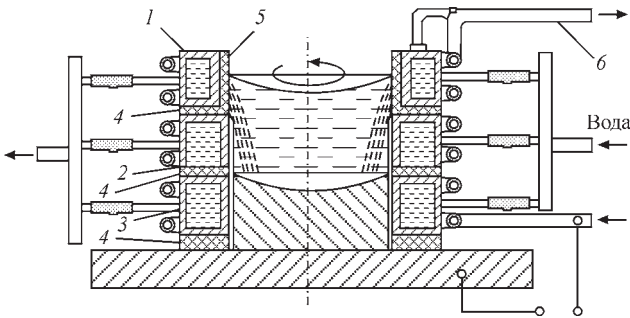


Рис. 2. Схема струмопідвідного кристалізатора: 1–3 — струмопровідна, проміжна та формуюча секції відповідно; 4 — електроізоляційні прокладки; 5 — футеровка; 6 — індуктор

Таким чином, використання для електрошлакового процесу зовнішніх магнітних полів ускладнює як сам процес, так і його конструктивне оформлення. У ряді випадків для досягнення необхідних параметрів магнітного поля доводиться створювати такі додаткові магнітні пристрої, які набагато перевищують як за масою, так і за розмірами саме обладнання для наплавлення.

Тому можна назвати революційним рішенням виключити з процесу наплавлення зовнішні джерела електромагнітного впливу, а обертання забезпечувати за рахунок верхньої струмопровідної секції та одного джерела живлення (рис. 3) [7].

При цьому вирішувалось декілька задач: спрощувалася конструкція кристалізатора, забезпечувалося вирівнювання температури за периметром струмопровідної секції, виключалася поява видимих мікродуг (електроерозія) на границі шлак–неплавкий електрод (стінка секції), прискорювались тепломасообмінні реакції, досягався позитивний вплив магнітного поля на кристалізацію наплавленого металу, у випадку застосування при наплавленні дискретної присадки забезпечувався її рівномірний розподіл по поверхні шлакової ванни.

Конструктивно цей результат було отримано за рахунок виконання вертикального пазу у верхній струмопровідній секції (рис. 4) та підведення напруги до одного з кінців розрізаної водоохолоджуваної втулки. Виконана таким чином струмопровідна секція являє собою як би один виток індуктора, включеного послідовно у зварювальний ланцюг, а кристалізатор по суті виконує три функції — неплавкого електрода, кокіля, що обмежує шлакову ванну, та електромагнітного пристрою.

Мета цієї роботи — розглянути та експериментально перевірити способи забезпечення постійного обертання шлакової ванни без використання спеціальних електромагнітних пристроїв стосовно до електрошлакового наплавлення (ЕШН) для двох типів кристалізаторів — струмопідвідного і звичайного.

Струмопідвідні кристалізатори. СПК, схему якого наведено на рис. 4, при експлуатації має

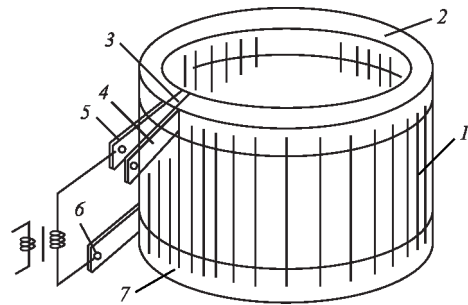


Рис. 3. Схема струмопідвідного кристалізатора з електромагнітним обертанням шлакової ванни: 1 — формуюча секція; 2 — струмопровідна секція; 3 — ізолююча прокладка; 4–6 — струмопідводи; 7 — наплавлена заготовка

ряд недоліків як конструктивних, так і електротехнічних. Наявність у струмопровідній секції вертикального пазу викликає певні труднощі у забезпеченні водонепроникності стінок пазу при його виконанні за допомогою зварювання. Крім того, заповнення пазу електроізоляційним матеріалом (зазвичай асбестом) у ряді випадків (при відсутності графітової футеровки) веде до пропалення ізоляції високотемпературним шлаком (1500...1700 °С) і витікання під час наплавлення шлакової ванни через паз шириною 3...5 мм струмопровідної секції. З електротехнічної точки зору кутова швидкість обертання ванни, що визначається робочим струмом наплавлення, не дозволяє за необхідності змінювати її значення (наприклад, при утворенні по центру ванни вирви при великій швидкості обертання або при недостатній рівномірності розподілу по периметру ванни у випадку малої швидкості обертання).

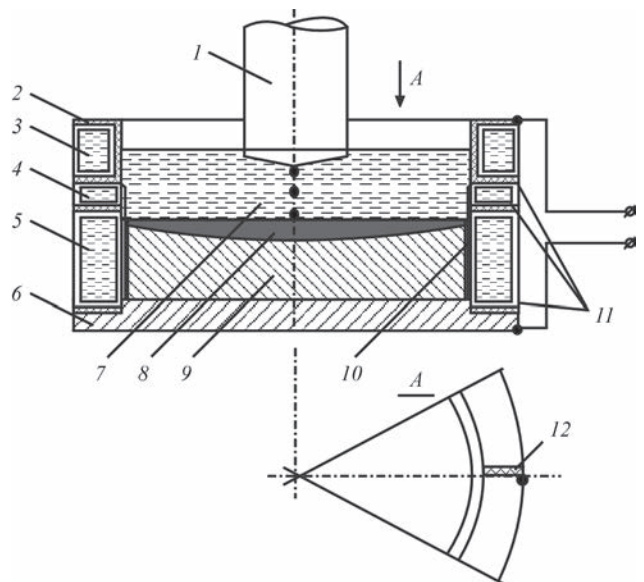


Рис. 4. Схема ЕШН неструмоведучою заготовкою в СПК: 1 — заготовка, що переплавляється; 2 — графітова футеровка; 3–5 — струмопровідна, проміжна та формуюча секції відповідно; 6 — виріб; 7 — шлакова ванна; 8 — металева ванна; 9 — наплавлений метал; 10 — гарнісаж; 11 — ізоляційні прокладки; 12 — вертикальний паз з електроізоляційною прокладкою

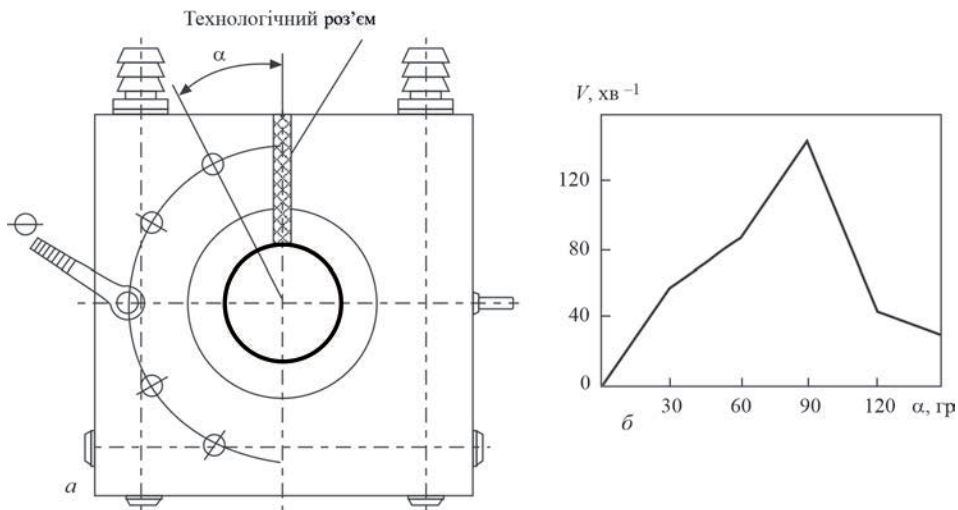


Рис. 5. Схема розташування струмопідводу відносно технологічного роз'єму (а) і залежність швидкості обертання шлакової ванни (V) від кута α між струмопідводом і роз'ємом (б)

Рішення першої задачі (конструктивного виконання) робили шляхом поступового збільшення глибини пазу до досягнення товщини стінки секції приблизно 5 мм (при початковій товщині 15...20 мм). У той же час, виходячи з теоретичних міркувань, такого роду зміни навряд чи зможуть надати суттєвий вплив на ефект обертання шлакової ванни. Експеримент підтвердив це припущення. Навіть з'єднання частин стінки секції в районі пазу по відносно невеликій площі не перетворювало секцію в індуктор і, відповідно, не дозволяло отримати ефект обертання ванни.

Можливість досягнення регулювання обертання ванни електротехнічним шляхом оцінено в дослідженнях, які було виконано на початковому етапі розробки конструкції СПК. Спочатку при використанні в якості футеровки втулок з графіту разом із виконанням пазу в мідній стінці струмопідвідної секції відповідно аналогічно розрізали і футерувальну втулку, що створювало певні труднощі при виготовленні та експлуатації СПК. Потім було виявлено, що обертання ванни не зникає та зберігає свою швидкість і у випадку застосування втулки без будь-яких розрізів (пазів). Цей факт дозволив запропонувати для регулювання швидкості обертання ванни, тобто зміни напруженості магнітного поля, вводити в паз електропровідні матеріали з електропровідністю, яка у 1,5...15 рази менша за електропровідність матеріалу струмопідвідної секції [8].

Інший спосіб електротехнічного впливу на швидкість обертання ванни був запропонований авторами роботи [9]. Згідно з ним цей ефект може бути досягнутий шляхом зміщення точки струмопідводу від лінії роз'єму по периметру секції, причому максимально цей вплив повинен проявитися при куті зміщення 90° (рис. 5). Проте виконані експерименти не підтвердили цієї залежності.

При асиметричному розташуванні струмопідводу (з одним пазом) максимальний струм проходить у зоні його підключення, у цій же зоні діють і максимальні магнітні сили. Це добре видно, коли дискретна присадка попадає на поверхню шлакової ванни. Спочатку гранули присадки починають активно переміщуватися по периметру ванни і чим далі вони зміщуються від струмопідводу, тим більшою мірою знижується імпульс магнітної сили та, відповідно, тим помітніше зменшується швидкість руху гранул. Цьому сприяє, крім зниження електромагнітного впливу, мабуть, деяке підвищення в'язкості шлаку (зниження його температури) і опір сил тертя на межі дотику шарів шлаку, які безпосередньо взаємодіють зі стінкою кристалізатора. Природно, чим більший діаметр кристалізатора, тим ці процеси виявляються більш помітно.

Вирішення цього завдання можна досягти шляхом деякої зміни конструкції секції. Замість асиметричного (з одним пазом) підключення струмопідводу пропонується використовувати декілька пазів із відповідними струмопідводами, як це показано на рис. 6 [9]. У цьому випадку кожен струмопровідний сектор секції дає додатковий імпульс руху ванни при приблизно постійній середній швидкості її обертання. Аналогічний підхід може бути використаний і при застосуванні струмопідвідних кристалізаторів іншого перерізу, зокрема прямокутного [10].

Додатково можна відмітити, що всіма розглянутими вище технічними прийомами можна користуватися й при наплавленні на постійному струмі або змінному зниженої частоти [11].

Водоохолоджувані кристалізатори звичайного виконання. Деяку подібність обертального руху можна спостерігати при неспіввісному із кристалізатором розташуванні в шлаковій ванні плавкого електрода [12]. Але такий спосіб отримання ефекту обертання ванни звичайно ж не можна розглядати як оптимальний технічний прийом.

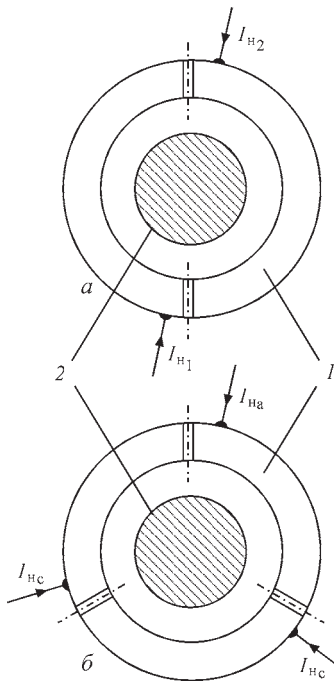


Рис. 6. Схематичне зображення струмопровідної секції кристалізатора з симетричним багатосекційним струмопідводом: а, б — дво- та трисекційні струмопідводи відповідно; I — струмопровідна секція; 2 — заготовка, що наплавляється (кільцеве ЕШН)

Рациональніше використовувати при ЕШН схеми, які наведено на рис. 1, а, б, але, як зазначалося раніше, їх недоліком є наявність додаткових джерел живлення та електромагнітних пристроїв.

Отже, єдиним способом отримання ефекту обертання шлакової ванни може стати особливе виконання електрода як плавкого (присадку можна подавати додатково), так і неплавкого.

В роботі [13] запропоновано при ЕШН прокатних валків з метою отримання рівномірного проплавлення поверхні бочки валка (робочої його частини) використовувати витратний електрод у вигляді соленоїда [13]. У цьому випадку при наплавленні одночасно відбуваються два процеси: плавлення електрода та забезпечення обертання шлакової ванни. Реальне виконання такої технології викликає сумнів, тому що в полі дії великих магнітних сил можливе закорочування електрода з бочкою валка.

Спосіб наплавлення із використанням невитратного електрода у вигляді графітової втулки з вертикальним пазом, до якої безпосередньо подведено напругу, був випробуваний при розробці двосекційного струмопідвідного кристалізатора [14]. Як показали експерименти, у цьому випадку постійного обертання шлакової ванни досягти не вдалося із-за появи в зоні розрізу (паза) втулки електропровідних продуктів окисно-відновних реакцій, що відбуваються на границі графіт–шлак.

Для отримання біметалічних армуючих елементів було випробувано ЕШН полим графітовим електродом із одним поздовжнім розрізом. Стру-

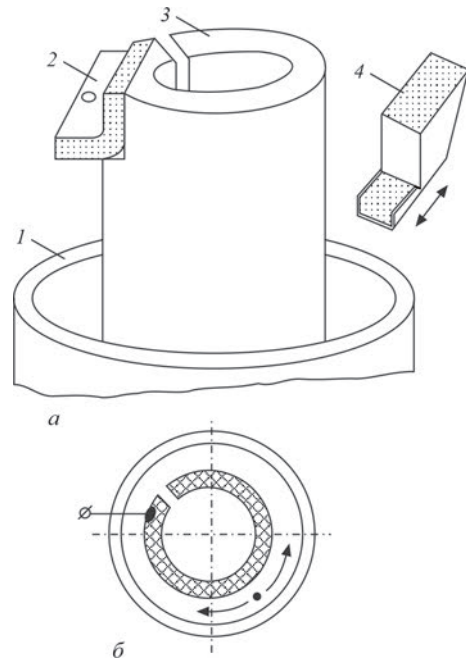


Рис. 7. Схема ЕШН у звичайному кристалізаторі з використанням невитратного (графітового) електрода, який має поздовжній паз (розріз) (а) і напрям потоків шлаку на поверхні шлакової ванни (б): 1 — кристалізатор; 2 — струмопідвід; 3 — порожнистий графітовий електрод; 4 — вібродозатор із присадкою

мопідвід підключали як і у випадку струмопровідної секції СПК, поблизу однієї зі стінок паза. При цьому дискретна присадка подавалася або всередину електрода, або між електродом і стінкою кристалізатора (рис. 7). Геометричні та електричні параметри ЕШН наступні: діаметр кристалізатора — 180 мм, діаметр електрода внутрішнього — 55 мм, зовнішнього — 130 мм, довжина електрода — 300 мм, ширина паза — 5 мм, глибина шлакової ванни — 50...70 мм, електричний режим — $I = 1,8 \dots 2,5$ кА, $U = 26 \dots 28$ В.

На першому етапі електрошлакового процесу на поверхні шлакової ванни виникали слабкі потоки, що направлені у різні сторони від точки, яка розташована приблизно навпроти паза в електроді (рис. 7, б). Можливо вони пов'язані зі зміною теплових обставин в об'ємі шлаку. Приблизно через 10 хв обертання припинилося, а температура шлакової ванни знижувалася. При зростанні робочої напруги температура ванни підвищувалася, але обертання так і не виникло як до, так і після подачі наплавочної присадки.

Висновки

Таким чином, розглянуті вище схеми отримання ефекту обертання шлакової ванни при використанні як струмопідвідних кристалізаторів, так і кристалізаторів звичайного виконання та результати їх експериментальної перевірки дозволяють зробити висновок, що єдиним способом забезпечення постійного обертання шлакової ванни без засто-

сування додаткових пристроїв електромагнітного впливу на ванну є спосіб ЕШН у струмопідвідному кристалізаторі з одним або кількома розрізами та струмопідводами в струмопровідній секції.

Список літератури

1. Компан Я.Ю., Щербина Э.В. (1989) *Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами*. Москва, Машиностроение.
2. Мургаш М., Чаус А.С. (1998) Использование магнитного поля при электрошлаковом переплаве стали. *Физика и химия обработки материалов*, **2**, 99–107.
3. Протоковилиов И.В. (2011) МГД технологии в металлургии (обзор). *Современная электрометаллургия*, **4**, 32–41.
4. Радченко А.А. (2000) Влияние внешних электромагнитных воздействий на технологию электрошлаковой наплавки покрытий и их свойства. *Тезисы докладов международной конференции «Сварные конструкции» (Киев, октябрь 2000 г.)*. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, 115–116.
5. Дудко Д.А., Рублевский И.Н. (1960) Электромагнитное перемешивание шлаковой и металлической ванны при электрошлаковом процессе. *Автоматическая сварка*, **9**, 12–16.
6. Ксендзык Г.В., Фрумин И.И., Ширин В.С. *Токоподводящий кристаллизатор*. А.с. 264427 СССР, С21с. Заявл. 19.11.1964 г.
7. Ксендзык Г.В., Фрумин И.И., Ширин В.С. *Устройство для электрошлакового переплава*. А.с. 337026 СССР, С21с 5156. Заявл. 25.06.1969 г.
8. Ксендзык Г.В., Фрумин И.И., Кусков Ю.М. *Токоподводящий секционный кристаллизатор*. А.с. 1085250 СССР, С22В 9/18. Заявл. 30.03.1982 г.
9. Tomilenko S.V., Kuskov Yu.M. (2000) Special features of melting of parent metal electroslag surfacing in a current-supplying solidification mould. *Welding Inter.*, **14(11)**, 893–895.
10. Kuskov Yu., Tsykulenko K.A. (2009) Conducting mold for electroslag surfacing of plane blanks. *Steel Translation*, **39(1)**, 53–58.
11. Tomilenko S.V., Kuskov Yu.M. (2002) Using direct and alternating current with reduced frequency in surfacing in sectional current-supplying solidification moulds. *Welding Intern.*, **16(7)**, 572–574.
12. (1986) *Металлургия электрошлакового переплава*. Патон Б.Е., Медовар Б.И. (ред.). Киев, Наукова думка.
13. Быстров В.А. (2003) *Основы электрошлаковых технологий упрочнения композиционными сплавами деталей, работающих при высокотемпературном износе*: автореф. дис. ... канд. техн. наук, Барнаул.
14. Кусков Ю.М., Проскудин В.М., Жданов В.А., Окопник Л.Л. (2022) Струмопідвідний кристалізатор в елек-

трошлакових технологіях. *Автоматичне зварювання*, **7**, 49–52.

References

1. Kompan, Ya.Yu., Shcherbina, E.V. (1989) *Electroslag welding and melting with controlled MGD-processes*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Murgash, M., Chau, A.S. (1988) Application of magnetic field in electroslag remelting of steel. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, **2**, 99–107 [in Russian].
3. Protokovilov, I.V. (2011) Magnetohydrodynamic technologies in metallurgy (Review). *Advances in Electrometallurgy*, **4**, 239–250.
4. Radchenko, A.A. (2000) Influence of external electromagnetic actions on technology of electroslag surfacing of coatings and their properties. In: *Abstr. of Pap. of Int. Conf. on Welded Structures (Ukraine, Kyiv, October 2000)*. Kyiv, PWI, 115–116 [in Russian].
5. Dudko, D.A., Rublevsky, I.N. (1960) Electromagnetic stirring of slag and metal pool in electroslag process. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 12–16 [in Russian].
6. Ksyondzyk, G.V., Frumin, I.I., Shirin, V.S. *Current-carrying mold*. USSR author’s cert. 264427. Fill. 19.11.1964 [in Russian].
7. Ksyondzyk, G.V., Frumin, I.I., Shirin, V.S. *Installation for electroslag remelting*. USSR author’s cert. 337026. Fill. 25.06.1969 [in Russian].
8. Ksyondzyk, G.V., Frumin, I.I., Kuskov, Yu.M. *Current-carrying sectional mold*. USSR author’s cert. 1085250, Int. Cl. C22B 9/18. Fill. 30.03.1982 [in Russian].
9. Tomilenko, S.V., Kuskov, Yu.M. (2000) Special features of melting of parent metal electroslag surfacing in a current-supplying solidification mould. *Welding Inter.*, **14(11)**, 893–895.
10. Kuskov, Yu., Tsykulenko, K.A. (2009) Conducting mold for electroslag surfacing of plane blanks. *Steel Translation*, **39(1)**, 53–58.
11. Tomilenko S.V., Kuskov Yu.M. (2002) Using direct and alternating current with reduced frequency in surfacing in sectional current-supplying solidification moulds. *Welding Intern.*, **16(7)**, 572–574.
12. (1986) *Metallurgy of electroslag remelting*. Ed. by B.E. Paton, B.I. Medovar. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
13. Bystrov, V.A. (2003) *Fundamentals of electroslag technologies for hardening by composite alloys of parts operating at high-temperature wear*: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree. Barbaul [in Russian].
14. Kuskov, Yu.M., Proskudin, V.M., Zhdanov, V.A., Okopnik, L.L. (2022) Current-supplying mould in electroslag technologies. *The Paton Welding J.*, **7**, 35–38.

EXPERIENCE OF STUDYING THE EFFECT OF SLAG POOL ROTATION AT ELECTROSLAG SURFACING WITH A DISCRETE FILLER

Yu.M. Kuskov, V.M. Proskudin, I.P. Lentuygov, V.O. Zhdanov, L.L. Okopnik
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevyeh Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Different schemes of producing the effect of slag pool rotation are considered. The rationality of achieving this effect without application of additional power sources or devices for electromagnetic impact on the slag pool is shown. Experiments were conducted in two types of moulds, namely current-supplying and regular modifications. It is established that in order to achieve the defined goal it is rational to apply current-supplying moulds with one or several cuts and current-supplies in the current-supplying section. Ref. 14, Fig. 7.

Key words: electroslag surfacing (remelting); water-cooled mould; discrete filler; rotation; slag pool

Надійшла до редакції 30.05.2022