

ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ В СТРУМОПРОВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ОБЕРТАННЯМ ШЛАКОВОЇ ВАННИ

Ю.М. Кусков, В.Ю. Шевченко, А.В. Нетяга, О.І. Білий

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: netyaga.av@ukr.net

Представлено результати використання різних технологій із виготовлення та відновлення промислових електрошлакових наплавлених виробів з використанням електромагнітного наплавочного пристрою – струмопровідного кристалізатора. Встановлено позитивний вплив електромагнітного впливу на формування дрібнозернистої структури зносостійких чавунів і сталей. Представлено способи регулювання обертання шлакової ванни зміною конструкції кристалізатора або використанням додаткових джерел підмагнічування для наплавлення великогабаритних валків ширококутових станів горячого прокатування. Бабліогр. 17, рис. 10.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення, швидкорізальна сталь, високохромистий чавун, струмопровідний кристалізатор, обертання шлакової ванни, структура наплавленого металу, електрошлакове наплавлення горизонтальних поверхонь, вертикальне кільцеве електрошлакове наплавлення

Вступ. У конструкції багатофункціонального наплавочного пристрою – струмопровідного кристалізатора (СПК) – закладено низку відомих технічних рішень. Наплавлений метал у ньому формується, як і в усіх наявних переплавних технологіях – електрошлаковій (ЕШП), електронно-променевої (ЕПП) і плазмово-дугової (ПДП), – у водоохолоджуваній формуючій секції кристалізатора [1–3]. У низці електрошлакових технологій, як і в СПК, використовують водоохолоджувані невитратні електроди для підведення електричного струму до шлакової ванни, що забезпечує виділення в ній тепла [4]. І лише одна функція СПК вперше представлена тільки в ньому. Це – забезпечення електромагнітного впливу на шлакову та металеву ванни за рахунок своєї особливої конструкції, без залучення для даних цілей зовнішніх додаткових пристроїв. При цьому напрямок силових ліній магнітного поля, що діє завдяки протіканню струму в азимутальному напрямку через наявний у струмопровідній секції технологічний паз, сприяє виникненню обертального руху шлакової ванни. Більше того, у звичайній технології ЕШП прагнуть якомога більше знизити протікання частини загального струму електрошлакового процесу на стінку кристалізатора через погіршення внаслідок цього електротехнічних показників процесу, зміну теплового режиму плавки та підвищення ймовірності прояву електроерозійних явищ на межі шлак–стінка кристалізатора. У СПК весь струм технологічного процесу проходить через його струмопровідну секцію, шлакову та металеву ванни, величина якого й визначає електромагнітний вплив у робочому просторі кристалізатора.

Слід зазначити, що і в звичайних електрошлакових технологіях у низці випадків для поліпшення якості наплавленого металу пропонується використовувати додаткові джерела зовнішнього електромагнітного впливу [5]. Застосування такої комплексної технології не завжди дає змогу отримувати високий рівень очікуваних позитивних результатів, хоча складність і вартість застосування технології значно зростає. Як показала практика, найперспективнішою така технологія виявилася в разі використання зовнішніх імпульсних магнітних полів під час електрошлакового виплавлення металевих злиwkів відносно невеликих розмірів із високореакційних і прецизійних сплавів [6]. Результати теоретичних і частково експериментальних досліджень, присвячених дії електромагнітних сил під час роботи СПК, можливостям їхнього керування та впливу на гідродинаміку шлакової ванни, були викладені в [7–9].

Метою цієї роботи є розгляд і аналіз результатів практичного застосування фізичного явища – дії електромагнітних сил на структуроутворення електрошлакового металу при виконанні кільцевого наплавлення та наплавлення на горизонтальні поверхні в дво- і трисекційних струмопровідних кристалізаторах.

Використовувані на практиці СПК дають змогу отримувати наплавлені шари з різною формою поперечного перерізу – круглою, квадратною, прямокутною. Ці форми відповідають формі перерізу

Кусков Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8091-2274>, Нетяга А.В. – <https://orcid.org/0000-0002-0576-8006>,

Білий О.І. – <https://orcid.org/0009-0006-4558-9770>

© Ю.М. Кусков, В.Ю. Шевченко, А.В. Нетяга, О.І. Білий, 2025

нижньої формувальної секції СПК. Кристалізатори круглого поперечного перерізу були багаторазово випробувані та пройшли промислову перевірку під час кільцевого наплавлення виробів з великою довжиною напавленої поверхні, зокрема прокатних валків [10]. Під час наплавлення невеликої товщини металу (≤ 100 мм) на горизонтальні поверхні виробів, крім кристалізаторів круглого поперечного перерізу, можливо використовувати СПК інших перерізів, що дають змогу раціональніше заповнювати наплавлюваним металом поверхні деталей, що реставруються.

Вертикальне кільцеве наплавлення довгомірних виробів вимагає відносного переміщення СПК і виробу в міру наплавлення шару металу. При цьому використовуються СПК трисекційного виконання, в яких проміжна секція розташована між верхньою струмопровідною секцією та нижньою формуючою секцією, що дає змогу знизити ймовірність контакту рідкої металевої ванни зі стінкою струмопровідної секції в разі незапланованого підйому рідкого металу вище за визначений оптимальний рівень. Проміжна секція є ще й дільником електричної напруги, що зменшує ймовірність електричного пробоя, а також знижує електричне навантаження на зони переходу між секціями та розподіляє вертикально направлений струм вздовж стінки кристалізатора в шлаковій ванні в її більшому об'ємі.

На сьогодні для отримання напавлених шарів завтовшки не більше 80...100 мм застосовується двосекційна конструкція кристалізатора (без проміжної секції) за стаціонарного положення СПК як простіша у виконанні. Під час наплавлення таких товщин металу для зменшення висоти струмопровідної секції та поліпшення стабільності процесу секцію можливо виконувати з розширенням її діаметра за рахунок виконання технологічного скосу на робочій поверхні проміжної секції.

Процеси електромагнітного впливу на шлакову ванну в дво- і трисекційних струмопровідних кристалізаторах подібні.

Далі буде розглянуто технологічні особливості наплавлення в СПК і представлено результати та аналіз металознавчих досліджень металу, отриманого під час кільцевого електрошлакового наплавлення (ЕШН) із використанням дискретного (дробу) і рідкого (розплавленого металу) присаджувальних матеріалів, а також під час ЕШН горизонтальних поверхонь із використанням наплавочних матеріалів у вигляді дискретного присаджувального матеріалу або електродів.

Вертикальне кільцеве ЕШН. Наплавлення з використанням дискретного присаджувального

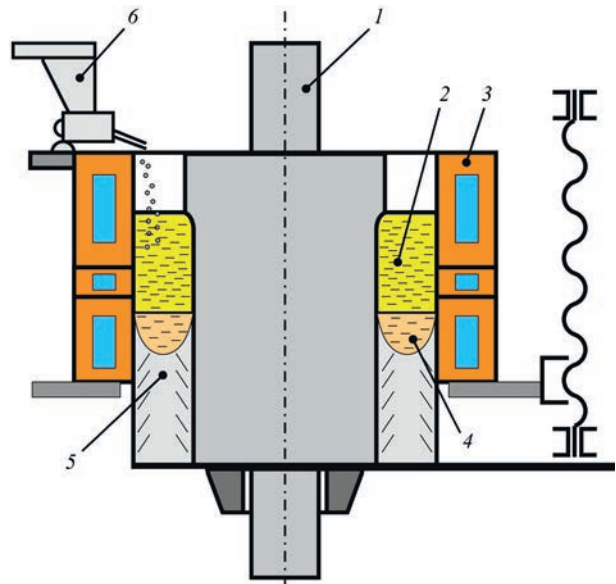


Рис. 1. ЕШН прокатних валків у струмопровідному кристалізаторі з присаджувальним матеріалом у вигляді дробу: 1 – прокатний валок; 2 – шлакова ванна; 3 – струмопровідний кристалізатор; 4 – металева ванна; 5 – напавлений шар; 6 – дозатор із дробом

матеріалу. Схему наплавлення дискретним матеріалом наведено на рис. 1.

Обґрунтоване з використанням математичного моделювання в [11] виникнення в робочому просторі СПК обертального руху шлакової ванни було підтверджено під час наплавлення прокатних валків з діаметром наплавлюваної бочки 300...900 мм. Крім того, було встановлено, що швидкість обертання ванни залежить від робочих струмів під час наплавлення та змінюється практично пропорційно їх величині (рис. 2). Підтвердився також зазначений у [12, 13] (випадок СПК з одним поздовжнім технологічним розрізом) висновок про те, що величина частоти обертання шлаку має тенденцію до зниження в разі переміщення по периметру СПК точки струмопідведення на верхній струмопровідній секції від поздовжнього розрізу до точки, розташованої на протилежній боці кристалізатора від цього розрізу.

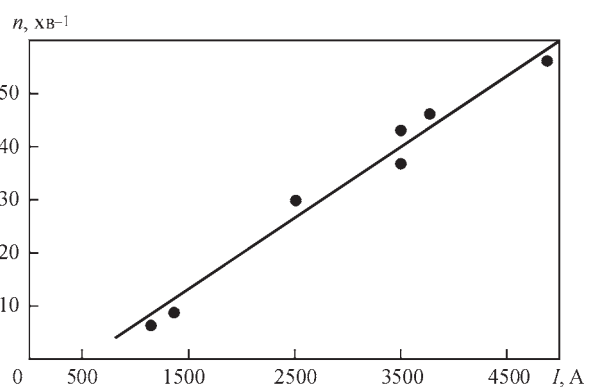


Рис. 2. Вплив сили струму наплавлення на частоту обертання шлакової ванни (за діаметрів кристалізатора 200...300 мм)

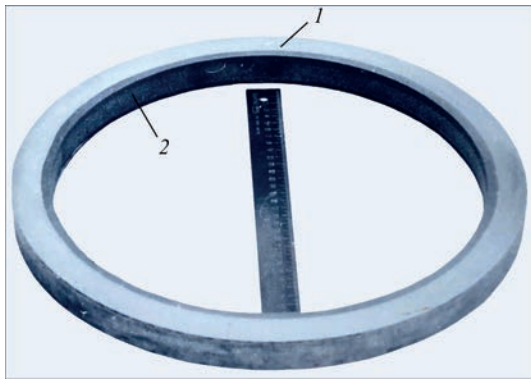


Рис. 3. Макрошліф поперечного перерізу наплавленого валка стану 300: 1 – наплавлений шар; 2 – основний метал (внутрішня частина бочки валка видалена)

Проте це зниження частоти обертання в межах випробуваних під час наплавлення кристалізаторів відносно невеликих діаметрів (до 500 мм) істотно не впливає на глибину проплавлення основного металу (рис. 3) і не створює різнозернистості структури по периметру шару, що наплавляється. На рис. 4 показано мікроструктуру середньохромистого чавуну (16...20 % Cr), наплавленого на бочку валка діаметром 450 мм за наявності та відсутності обертання шлакової ванни.

Складнішим є завдання наплавлення валків великого діаметра. Це пов'язано з тим, що зі збільшенням діаметра кристалізатора кутова швидкість обертання шлакової ванни помітно відхиляється від пропорційності зростанню робочого струму (рис. 5), і під час наплавлення великогабаритних валків необхідно застосовувати додаткові заходи для її підвищення.

Застосування симетричного багатосекторного струмопідведення (рис. 6) має зменшувати зональну щільність струму в місцях підключення силових кабелів у n -разів (n – кількість струмопровідних секцій-секторів, кратна 2 або 3) і рівномірно розподілити її по периметру валка за умови збереження загального струму наплавлення на тому самому рівні.

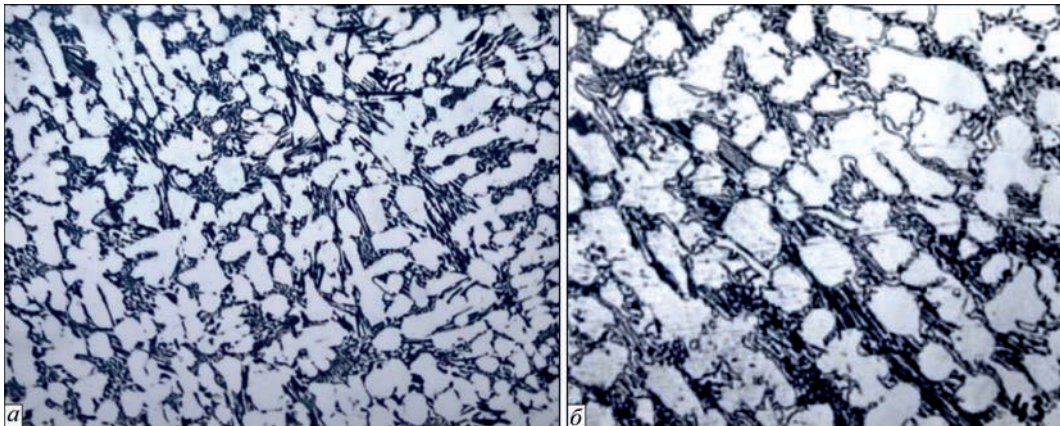


Рис. 4. Мікроструктура високохромистого чавуну (16...20 % Cr), наплавленого на бочку валка діаметром 450 мм, за наявності (а) та відсутності (б) обертання шлакової ванни, $\times 160$

Однак, як показали наплавлення з двосекторними струмопровідними секціями, очікуваного ефекту рівномірного проплавлення отримано не було. Причиною цього є виникнення під час наплавлення непрогнозованих більш значущих шляхів легшого проходження струму, що залежать від: зазорів між поверхнею валка, що наплавляється, і футеруванням струмопровідної секції, які можуть змінюватися через різне зношування футерування, як у локальних зонах її діаметру, так і всією внутрішньою поверхнею при тривалому веденні процесу наплавлення; рівномірності розподілу зон, які щільно контактують із футеруванням і внутрішньою поверхнею струмопровідної секції; неспіввідповідності валка та кристалізатора; температури валка та шлаку під час його заливання в кристалізатор; рідкоплинності шлаку та ін.

Завдання вдалося вирішити шляхом збільшення робочого струму наплавлення та додаткового підвищення в 1,6...2,0 рази (рис. 7) швидкості обертання шлакової ванни. Це досягалося завдяки внесенню в конструкцію кристалізатора незначної зміни – в проміжній секції зроблено паз, аналогічний пазу в струмопровідній секції, з невеликим кутовим зсувом по відношенню до нього. При цьому коливання глибини проплавлення основного металу в протилежних точках периметра заготовки валка, виміряних за допомогою металевого щупа, не перевищували 12 %. Такий результат отримано зміною під час наплавлення масової швидкості подачі дробу, що може сягати 800 кг/год, без її негативного впливу на тепловий стан шлакової ванни та плавлення в шлаку частинок присадки.

Наплавлення з використанням рідкої присадки. Схема наплавлення аналогічна представлено- му вище наплавленню дробом зі заміною дозатора подачі дробу на міксер-дозатор періодичної подачі рідкої присадки. На відміну від наплавлення дробом, у цьому випадку немає необхідності за-

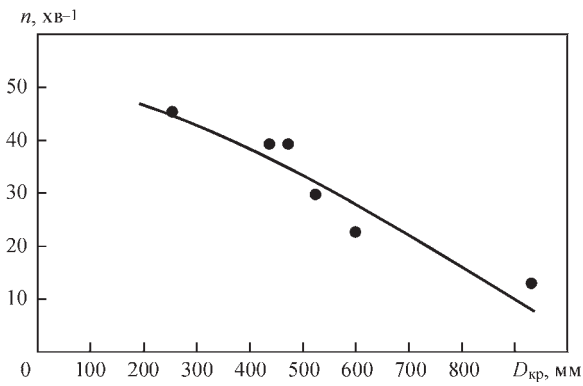


Рис. 5. Вплив діаметра струмопровідного кристалізатора на частоту обертання шлакової ванни

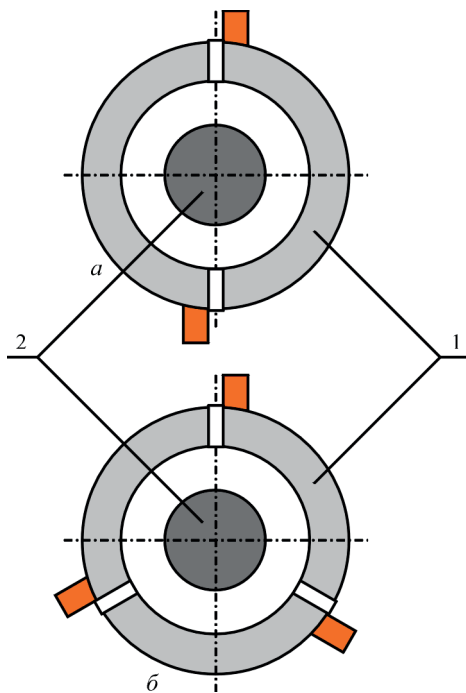


Рис. 6. Схематичне зображення струмопровідного кристалізатора із симетричним багатосекційним струмовідведенням: *a*, *б* – дво- і трисекційні струмовідводи відповідно; 1 – струмопровідна секція; 2 – заготовка, що наплавляється

безпечувати обертання шлакової ванни з метою рівномірного розподілу присадки по її периметру.

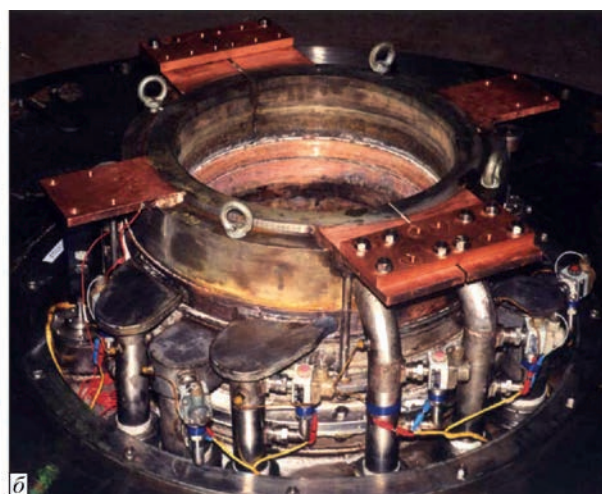
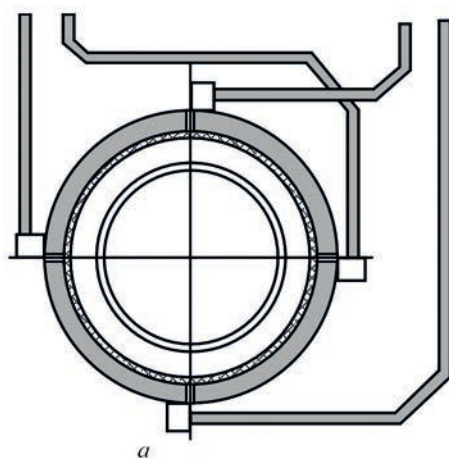


Рис. 8. Схема підключення (*a*) та зовнішній вигляд (*б*) струмопровідної секції СПК з чотирма технологічними розрізами

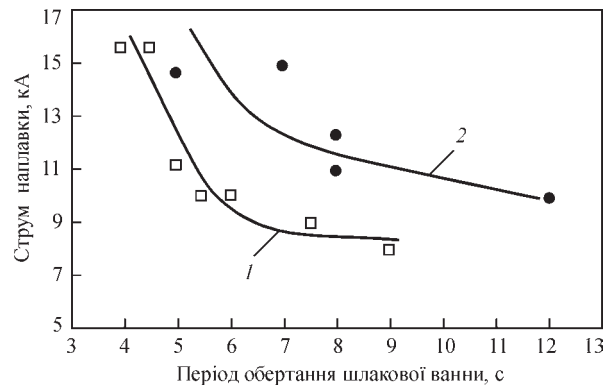


Рис. 7. Зміна періоду обертання шлакової ванни залежно від струму наплавлення: 1 – за звичайної конструкції кристалізатора; 2 – вдосконаленої конструкції

тру. Хоча, при значному збільшенні діаметра СПК (більше 800...1000 мм) для рівномірнішого розподілу рідкого металу по периметру кристалізатора біля нього встановлюють два міксера з двома заливними жолобами. Однак залишається головне завдання – збереження рівномірного теплового поля біля всієї поверхні, що наплавляється, для досягнення незмінного проплавлення основного металу і, відповідно, однакового структурного стану в усьому об'ємі наплавленого металу.

Під час наплавлення рідкою присадкою високолегованої швидкорізальної сталі зазначається значна зміна структури сталі порівняно з металом звичайної плавки (без обертання). Такі результати отримано шляхом зміни конструкції СПК і поліпшення електротехнічних параметрів: під час наплавлення валків діаметром 700...800 мм замість одного технологічного розрізу в струмопровідній секції виконують чотири (рис. 8) з використанням одного джерела живлення. Але використання такої електричної схеми хоча й підвищує рівномірність течії шлаку по периметру кристалізатора, проте загальна швидкість його обертання слабшає, погіршується й рівномірність розподілу рідкої сталі.

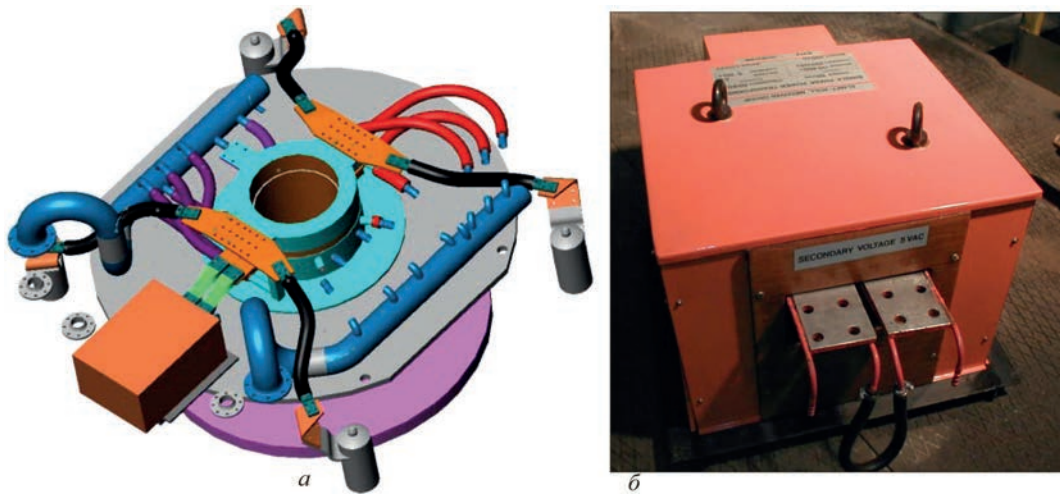


Рис. 9. Схема підключення проміжної секції (а) та зовнішній вигляд (б) додаткового пристрою підмагнічування

Для підвищення інтенсивності обертання шлакової ванни до СПК можна підключити додатковий електромагнітний пристрій. Він являє собою трансформатор підмагнічування, приєднаний до проміжної секції кристалізатора, в якій також виконано поздовжній розріз (рис. 9). В якості такого пристрою може бути використано джерело живлення машин контактного зварювання, що дає змогу працювати з великими струмами за малої напруги.

Введення в електричну схему СПК такого додаткового пристрою дає змогу плавно підвищувати швидкість обертання шлакової ванни до 30 об/хв і досягати рівномірного проплавлення поверхні, що наплавляється, не більше 1...2 мм, при отриманні шару швидкорізальної сталі з дрібнозернистою структурою.

Для більшого впливу на формування якісної структури металу, крім впливу на швидкість і рівномірне обертання шлакової ванни, є можливість впливати на кожну зону окремо – зону рідкого металу та зону, де проходить кристалізація металу. Хоча додатковий електромагнітний пристрій формально не є частиною конструкції СПК, але його вплив на електромагнітний стан у шлаковій ванні може проявлятися лише в кристалізаторах такого типу.

ЕШП горизонтальних поверхонь. Опишемо послідовність дій технології наплавлення горизонтальних поверхонь. СПК встановлюють на робочу поверхню нової заготовки-деталі (виготовлювальне наплавлення) або ж на заздалегідь підготовлену поверхню зношеної деталі (відновлювальне наплавлення), після чого здійснюють електрошлаковий процес із використанням або електродів, або дискретної присадки. В останньому випадку поруч із кристалізатором встановлюють дозувальний пристрій, найчастіше електромагнітний дозатор. Відновлювальне наплавлення може виконуватися

й в децю іншому варіанті: спочатку наплавленням отримують біметалеві армуючі елементи, а потім їх по сталевій основі приварюють дуговим зварюванням до зношеної поверхні деталі.

Початок ЕШН за всіх варіантів його виконання відбувається або за допомогою рідкого старту, коли в робочу порожнину СПК заливається рідкий шлак, отриманий в окремому пристрої, або з використанням твердого старту. У другому випадку наведення шлакової ванни відбувається шляхом розплавлення в кристалізаторі графітовим електродом порції робочого флюсу з поступовим заповненням порожнини кристалізатора шлаком до його виходу на струмопровідну секцію.

Спосіб наплавлення горизонтальних поверхонь став застосовуватися відносно недавно та переважно був призначений для виготовлення або ремонту виробів гірничо-металургійного обладнання, що піддаються підвищеному зношуванню за наявності в низці випадків ударних навантажень. Для таких умов експлуатації найперспективнішими наплавочними матеріалами слід вважати зносостійкі високовуглецеві леговані сталі та сплави, високохромисті чавуни, що набули широкого застосування як зносостійкий ливарний матеріал [14]. Однак практика використання аналогічних матеріалів у ливарному виробництві показала, що вони дуже чутливі до навантажень, як постійних, так і змінних. Тому завдання наплавлення такими матеріалами – це підвищення механічних властивостей напавленого металу. Одним зі способів досягнення такого підвищення властивостей є формування в металі дрібнозернистої структури [15]. Обертання під час наплавлення шлакової та металеві ванн, що забезпечується конструкцією СПК, дає змогу значно збільшити дисперсність металу. Причому така зміна структури спостерігається навіть за невеликих швидкостей обертання

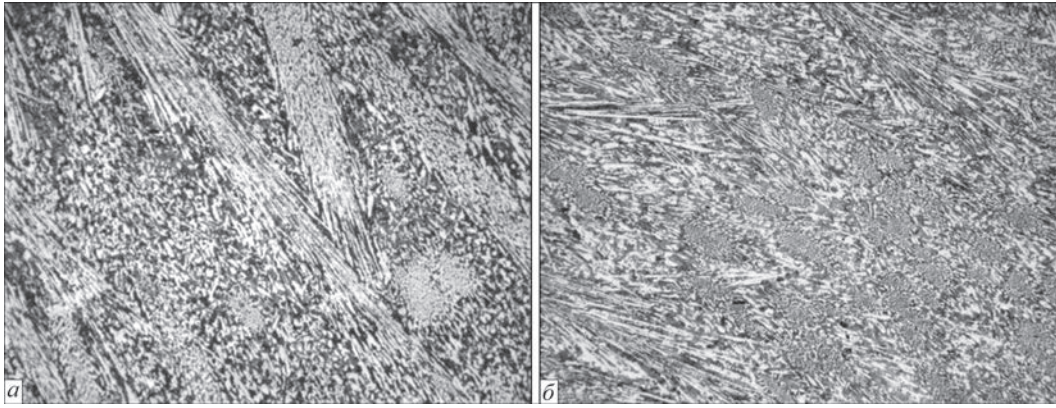


Рис. 10. Мікроструктура ($\times 100$) наплавленого високохромистого чавуну за відсутності (а) та наявності (б) обертання шлакової ванни

шлакової ванни (40...60 об/хв у СПК \varnothing 150...300 мм). Пояснення можливих причин впливу обертання шлаку на процес кристалізації наплавленого металу можна зробити виходячи з уявлень, викладених у [16, 17]. У першій роботі це пояснюється зміною під впливом магнітного поля двофазної зони розплаву перед фронтом кристалізації. Друга робота розглядає гіпотезу, згідно з якою магнітне поле є не тільки джерелом виникнення в розплаві рушійних сил, але й саме являє собою субстанцію, що впливає на теплофізичні умови кристалізації.

Виготовлювальне наплавлення бічного футерування шокової дробарки СМД-111 електродами та дробом із високохромистого чавуну (26...28 % Cr) підтвердило одержання наплавленого металу з високим опором зношуванню та ударним навантаженням. Довговічність наплавленого виробу була підвищена приблизно в два рази порівняно зі звичайним футеруванням зі сталі 110Г13Л. Механічних пошкоджень у наплавленому шарі після експлуатації не виявлено. Так само добре зарекомендував себе чавун, який у вигляді біметалевих армуючих елементів квадратного перерізу був приварений до робочої поверхні ковша навантажувача Caterpillar. На рис. 10 показано, як змінюється структура наплавленого чавуну за наявності та відсутності в СПК обертання шлакової ванни. Відсутність обертання шлаку досягалася шляхом закорочування технологічного розрізу в струмопровідній секції СПК.

Висновки

1. У результаті виконання промислових наплавлень підтверджено позитивний вплив електромагнітної дії, створюваної особливою конструкцією СПК, на структуроутворення наплавленого металу.

2. При кільцевому ЕШН збільшення діаметра наплавлюваних виробів призводить до необхідності вводити зміни в конструкцію СПК або використовувати додаткові джерела підмагнічування

для досягнення оптимальних швидкостей обертання шлакової ванни.

3. Наплавлення на горизонтальні поверхні дає змогу отримувати рівномірне проплавлення основного металу за використання «класичної» конструкції СПК (з одним поздовжнім технологічним розрізом у струмопровідній секції).

4. Одним із способів поліпшення якості наплавленого металу під час ЕШН на горизонтальні поверхні великої товщини (наприклад під час реставрації пік, коли зношеність досягає 500 мм) є електромагнітний вплив на шлакову ванну та метал, що кристалізується, через усі секції СПК.

5. Наплавлення в кристалізаторах з різною формою поперечного перерізу (квадратна, прямокутна) супроводжується обертанням шлакової ванни, аналогічно до того, як це відбувається під час ЕШН у СПК круглого перерізу.

Список літератури

1. Chepurnoi, A.D. (2001) The ways of improvement of the electroslag technology in producing the main products of the machine building. *Medovar Memorial Symposium (15–17 May 2001, Kyiv)*, Elmetroll, pp. 191–196.
2. Патон Б.Е. (2000) Современные электронно-лучевые технологии Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. *Проблемы спец. электрометаллургии*, 2, 22–33.
3. Лакомский В.И. (2000) История становления и развития плазменно-дугового переплава в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. *Проблемы спец. электрометаллургии*, 1, 35–61.
4. Биктагиров Ф.К. (2003) Применение электрошлакового процесса с не расходующим электродом для плавки, рафинирования и обработки металлов. Сообщение 2. *Современная электрометаллургия*, 1, 5–9.
5. Медовар Б.И., Цыкуленко А.К., Шевцов В.Л. и др. (1986) *Металлургия электрошлакового процесса*. Б.Е. Патон (ред.), Киев, Наукова думка.
6. Протокивиллов И.В. (2011) Измельчение кристаллической структуры полых титановых слитков при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке. *Современная электрометаллургия*, 4, 3–5.
7. Tomilenko, S.V., Kuskov, Yu.M. (2000) Special features of melting of parent metal in electroslag surfacing in a current-supplying solidification mold. *Welding International*, 11, 893–895. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507110009549288>

8. Kuskov, Yu.M., Soloviov, V.G. (2018) Experimental study of slag and metal pool rotation during the electroslag process in current-supplying mould. *The Paton Welding J.*, 7, 33–35. DOI: <http://doi.org/10.15407/tpwj2018.07.07>
9. Kuskov, Yu.M., Kuprin, I.N., Sarychev, I.S. (2007) Thermal processes in electroslag surfacing of rolling rolls in a current-conducting solidification mold. *Welding International*, 4, 309–311. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507110701412021>
10. Кусков Ю.М. (2001) Электрошлаковые технологии изготовления и восстановления прокатных валков. *Сталь*, 8, 70–75.
11. Гориславец Ю.М., Бондар О.І., Проскудін В.М. та ін. (2022) Моделювання електромагнітних процесів в секційному кристалізаторі для електрошлакового наплавлення металу. *Технічна електродинаміка*, 4, 64–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.064>
12. Ксендзык Г.В. (1975) Топоподводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны. *Специальная электротехнология*, 27, 32–40.
13. Гориславец Ю.М., Бондар О.І., Проскудін В.М. та ін. (2022) Вплив струмопідводу на електромагнітні процеси в кристалізаторі для електрошлакового наплавлення металу. *Праці ІЕД НАН України*, 62, 19–24. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.019>
14. Гарбер М.Е. (2010) *Износостойкие белые чугуны*. Москва, Машиностроение.
15. Армстронг Р.В. (1973) *Прочностные свойства металлов со сверхмелким зерном. Сверхмелкое зерно в металлах*. Пер. с англ. Москва, Металлургия.
16. Видов С.В., Вишнарев А.Ф., Зверев Б.Ф. (1993) Воздействие слабых магнитных полей на процесс кристаллизации металла. *Сталь*, 11, 18–22.
17. Мургаш М., Чаус А.С., Покусова М. (1999) Непрерывное литье стальных заготовок с перемешиванием расплава в кристаллизаторе и слитке. *Физика и химия обработки материалов*, 5, 96–103.
- of metals. Report 2. *Sovremennaya Elektrometallurgiya*, 1, 4–8 [in Russian].
5. Medovar, B.I., Tsykulyenko, A.K., Shevtsov, V.L. et al. (1986) *Metallurgy of electroslag process*. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Protokovilov, I.V. (2011) About feasibility of refining crystalline structure of hollow ingots of titanium alloys in magnetically-controlled electroslag melting. *Sovremennaya Elektrometallurgiya*, 4, 3–5 [in Russian].
7. Tomilenko, S.V., Kuskov, Yu.M. (2000) Special features of melting of parent metal in electroslag surfacing in a current-supplying solidification mold. *Welding Intern.*, 11, 893–895. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507110009549288>
8. Kuskov, Yu.M., Soloviov, V.G. (2018) Experimental study of slag and metal pool rotation during the electroslag process in current-supplying mould. *The Paton Welding J.*, 7, 33–35. DOI: <http://doi.org/10.15407/tpwj2018.07.07>
9. Kuskov, Yu.M., Kuprin, I.N., Sarychev, I.S. (2007) Thermal processes in electroslag surfacing of rolling rolls in a current-conducting solidification mold. *Welding Intern.*, 4, 309–311. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507110701412021>
10. Kuskov, Yu.M. (2001) Electroslag technologies for fabrication and repair of forming rolls. *Stal*, 8, 70–75 [in Russian].
11. Goryslavets, Y.M., Bondar, O.I., Proskudin, V.M. et al. (2022) Modeling of electromagnetic processes in a sectional crystallizer for electroslag surfacing of metal. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 4, 64–68 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.064>
12. Ksendzyk, G.V. (1975) Current-supplying crystallizer providing rotation of the slag bath. *Spetsialnaya Elektrometallurgiya*, 27, 32–40 [in Russian].
13. Goryslavets, Yu.M., Bondar, O.I., Proskudin, V.M. et al. (2022) Influence of electrical current terminals on electromagnetic processes in a mould for electroslag surfacing of metal. *Pratsi IED NANU*, 62, 19–24 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.019>
14. Garber, M.E. (2010) *Wear-resistant white cast irons*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
15. Armstrong, R.V. (1973) *Strength properties of metals with superfine grain. Superfine grain in metals*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
15. Armstrong, R.V. (1973) *Strength properties of metals with superfine grain. Superfine Grain in Metals*. Transl. from Engl. M., Metallurgy [in Russian].
16. Vidov, S.V., Vishnarev, A.F., Zverev, B.F. (1993) Influence of weak magnetic fields on the process of metal crystallization. *Stal*, 11, 18–22 [in Russian].
17. Murgash, M., Chaus, A.S., Pokusova, M. (1999) Continuous casting of steel billets with melt mixing in the crystallizer and ingot. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, 5, 96–103 [in Russian].

References

1. Chepurnoi, A.D. (2001) *The ways of improvement of the electroslag technology in producing the main products of the machine building*. Medovar Memorial Symposium (15–17 May 2001, Kyiv), Elmetroll, 191–196.
2. Paton, B.E. (2000) Modern electron-beam technologies of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU. *Problemy Spetsialnoi Elektrometallurgii*, 2, 22–33 [in Russian].
3. Lakomsky, V.I. (2000) History of formation and development of plasma-arc remelting at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU. *Problemy Spetsialnoi Elektrometallurgii*, 1, 35–61 [in Russian].
4. Biktagirov, F.K. (2003) Application of nonconsumable electrode electroslag process for melting, refining and treatment

ELECTROSLAG SURFACING IN A CURRENT-CARRYING MOULD WITH ELECTROMAGNETIC ROTATION OF THE SLAG BATH

Yu.M. Kuskov, V.Yu. Shevchenko, A.V. Netyaga, O.I. Bilyi

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

E-mail: netyaga.av@ukr.net

The results of application of various manufacturing and restoration industrial electroslag surfacing technologies using an electromagnetic surfacing device – a current-carrying mould – are presented. The positive effect of electromagnetic influence on the formation of a fine-grained structure of wear-resistant cast irons and steels has been established. The methods of regulating the slag bath rotation by changing the design of the mould or using additional sources of magnetization for surfacing large rolls of wide strip hot rolling mills are shown. 17 Ref., 10 Fig.

Keywords: electroslag surfacing, high-speed steel, high-chromium cast iron, current-carrying mould, slag bath rotation, deposited metal structure, ESS of horizontal surfaces, vertical circumferential ESS

Отримано 20.03.2025

Отримано у переглянутому вигляді 23.05.2025

Прийнято 10.07.2025