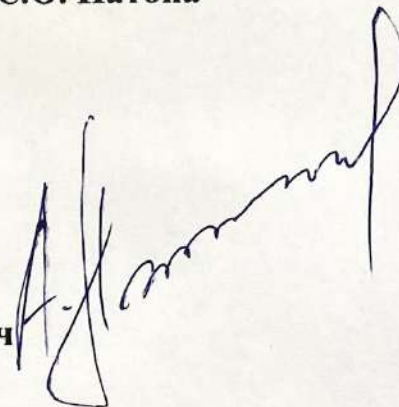


**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**

**Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона**

**НЕТЯГА**

**Антон Володимирович**



УДК 621.791.92:669-2/-9:66.065.5

**ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ ГІРНИЧО-  
МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВИМ  
НАПЛАВЛЕННЯМ У СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ**

Спеціальність 05.03.06

«Зварювання та споріднені процеси і технології»

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2023

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі фізико-металургійних процесів наплавлення зносостійких і жароміцних сталей Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ

**Науковий керівник:** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Кусков Юрій Михайлович**  
провідний науковий співробітник відділу  
фізико-металургійних процесів наплавлення  
зносостійких і жароміцних сталей  
Інституту електрозварювання  
ім. Є.О. Патона НАН України

**Офіційні опоненти:** – доктор технічних наук, професор  
**Перемітько Валерій Вікторович**  
декан металургійного факультету  
Дніпровського державного технічного університету

– кандидат технічних наук, доцент  
**Білоник Ігор Методійович**  
доцент кафедри інтегрованих технологій зварювання та  
моделювання конструкцій  
Національного університету «Запорізька політехніка»

Захист дисертації відбудеться «25» 10 2023 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні докторської спеціалізованої вченої ради Д 26.182.01 при Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 03150, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 03150, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

Автореферат розіслано «08» 09 2023 року

Вчений секретар  
Докторської спеціалізованої  
вченої ради Д 26.182.01  
доктор технічних наук



Олег МАХНЕНКО



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** За вагою і розмірами використовуваного обладнання гірничо-металургійний комплекс можна віднести до найбільш металомістких галузей промисловості. Збільшення одиничної потужності дробильно-подрібнюючого обладнання підвищує його продуктивність, збільшує час роботи в результаті скорочення простоїв у ремонті. Потужна дорожньо-будівельна техніка дозволяє як видобувати, переносити, так і завантажувати великі маси різних видів породи, що знаходяться в стадії розробки, так і необхідні операції з товарною продукцією, отриманою в результаті використання технологій їхньої переробки.

Створення дедалі потужнішого обладнання гірничо-металургійного комплексу і його інтенсивне використання в жорстких умовах експлуатації призводить до високих втрат зношуваних металевих робочих органів і передчасної відмови обладнання. Одним із способів продовження терміну його служби є електрошлакове наплавлення (ЕШН). Однак відомим способом ЕШН важко забезпечити високу якість наплавлених виробів, особливо під час наплавлення високовуглецевих матеріалів, зокрема чавунів. Використання струмопідвідного кристалізатора (СПК) дає змогу розширити технологічні можливості наплавлення та значною мірою впливати на формування структури наплавленого металу, що в основному визначає його експлуатаційні властивості.

Таким чином, актуальним завданням є вивчення закономірностей формування структури високовуглецевих матеріалів, що наплавляються, зокрема чавунів, у специфічних умовах протікання електричного струму в шлаковій ванні та електромагнітного впливу на метал, який кристалізується, а також розробка технічних рекомендацій для їхнього використання під час отримання високоякісних наплавлених виробів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалась в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України в межах державних науково-технічної програми: «Дослідження впливу мікролегування та модифікування на формування структури високолегованого наплавленого металу, стійкого проти зношувань та циклічних термосилових навантажень» (2021-2023pp.), № 0121U108387. Робота виконувалась в НТК «ІЕЗ ім. Є.О. Патона» НАН України в межах договору № 561 від 09.09.2020 р. між Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України та Науково-технічним комплексом «Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона» Національної академії наук України за темою: «Проведення технологічних робіт, а саме визначення оптимальних матеріалів, способів наплавлення та розроблення технології і техніки наплавлення для виготовлюваного (відновлювального) наплавлення робочих плит шокової дробарки (код ДКПП ДК 016:2010 72.19)». Робота виконувалась в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України в межах договору № 656 від 03.011.2021 р. між Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України та Товариством з обмеженою відповідальністю «Екотехнологія – Сервіс» за темою «Проведення технологічних робіт, пов'язаних з відпрацюванням технік й технології електрошлакового наплавлення високохромистого чавуна на дослідні зразки з низьковуглецевої сталі різної товщини (КВЕД 72.19)».

**Мета дослідження:** на основі досліджень формування мікроструктури наплавленого в струмопідвідному кристалізаторі металу під час використання різних видів наплавкових матеріалів запропонувати ефективні технологічні рішення отримання зносостійких шарів, стійких в умовах абразивного та ударно-абразивного зношування.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні **завдання:**

1. Дослідити вплив виду наплавного матеріалу на формування мікроструктури наплавленого металу;
2. Дослідити вплив способу виготовлення наплавного матеріалу на формування мікроструктури наплавленого металу;
3. Розробити тривимірну математичну модель для оцінки електромагнітних процесів, що протікають у СПК;
4. Дослідити вплив обертання шлакової ванни на формування мікроструктури наплавленого металу;
5. Розробити основні положення технології електрошлакового наплавлення зносостійких матеріалів у струмопідвідному кристалізаторі;
6. Провести дослідно-промислову перевірку наплавлених армуючих елементів, виконаних із зносостійких високохромистих чавунів.

**Об'єкт дослідження:** електрошлакове наплавлення зносостійких високохромистих чавунів у струмопідвідному кристалізаторі.

**Предмет дослідження:** технологічні і металознавчі закономірності отримання при наплавленні електрошлакового високохромистого чавуну, стійкого в умовах абразивного і ударно-абразивного зношування.

**Методи дослідження.** З метою досягнення цілей і отримання основних результатів роботи були використані експериментальні методи отримання наплавленого металу, виготовлення наплавних матеріалів, виконання металографічних досліджень за допомогою методик оптичного та рентгеноспектрального вивчення наплавленого металу і методи математичного моделювання для оцінки електромагнітних процесів.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Встановлено, що структура і розмір зерна металу з підвищеним вмістом вуглецю, зокрема високохромистого чавуну, наплавленого в СПК, значно відрізняється від металу аналогічного складу, наплавленого у звичайному кристалізаторі. При наплавленні в СПК електродом великого перерізу формується структура з меншою кількістю евтектичної складової при зниженні в 2...4 рази її розмірів і підвищенні макротвердості не менше ніж на 10 %.

2. Під час ЕШН у СПК великий вплив на структуроутворення чинить вид наплавочного матеріалу. Під час наплавлення неструмоведучою заготівлею, на відміну від електрода, у структурі формуються карбіди великих розмірів і грубої форми, що знижують пластичність наплавленого чавуну. Наплавлення дробом порівняно з наплавленням електродом дає змогу змінити матрицю сплаву, замінивши її мартенситну основу на 50 % менш крихким аустенітом при двократному збільшенні евтектики і збереженні макротвердості на тому ж рівні – 52...54 одиниць HRC. Порівняно з наплавленням дробом використання рідкої присадки призводить до підвищення дендритного параметра практично в 2 рази за зниження макротвердості наплавленого чавуну на 15...20%. По мірі збільшення під час експлуатації ударних

навантажень у поєднанні з абразивним зношуванням ЕШН слід виконувати з використанням таких наплавлювальних матеріалів: неструмопровідна заготовка - рідка присадка – електроди великого перерізу – дріб.

3. Поширене уявлення про те, що під час електрошлакового наплавлення в СПК визначальним чинником, що впливає на формування дрібнозернистої структур високовуглецевого наплавленого металу, є обертання шлакової ванни. Встановлено вплив навіть малих кутових швидкостей обертання шлакової ванни (40...60 об/хв) на підвищення приблизно в 3 рази дисперсності структурних складових високохромистого чавуну, наплавленого електродом великого перерізу. За допомогою розробленої математичної моделі пояснено ефект обертання шлакової та металевий ванн і показано, що його регулювання можна здійснювати завдяки зміні положення струмопідводу відносно технологічного розрізу в струмопідвідній секції на кут до  $180^\circ$ .

4. Вперше оцінено роздільний вплив на кристалізацію високовуглецевого наплавленого металу обертання шлакової ванни та інокуляції дисперсною присадкою на кристалізацію. У разі обертання ванни середній розмір елементів його структури приблизно в 2 рази менший ніж за його відсутності.

5. Вперше встановлено вплив способу виготовлення електрода (катаний або ливарний) на дисперсність структури високовуглецевої наплавленої сталі. У разі наплавлення катаним електродом зі сталі X12MФ дисперсність структури наплавленого металу підвищується приблизно на 50% порівняно з наплавленням ливарною сталлю.

**Практичне значення отриманих результатів.** Підтверджено необхідність застосування під час електрошлакового наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі високохромистого чавуну і можливість його використання у двосекційному варіанті. Розроблено і промислово випробувано при наплавленні струмопідвідний кристалізатор квадратного поперечного перерізу.

Рекомендовано для наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі виробів, що експлуатуються в умовах абразивного та ударно-абразивного зношування використовувати наплавлювальні матеріали у вигляді електродів великого перерізу і дробу.

Проведено дослідно-промислові перевірки виготовлювального наплавлення бічних футеровок шокової дробарки СМД-111 та відновлювального наплавлення передньої стінки ковша навантажувача «Caterpillar» ємністю 15м<sup>3</sup> високохромистим чавуном, що продемонстрували високу продуктивність наплавлених виробів під час промислової експлуатації.

**Особистий внесок здобувача.** У дисертаційній роботі основні наукові результати, положення і висновки отримані автором особисто. Постановка завдань і обговорення результатів досліджень проводилася разом з науковим керівником та співавторами публікацій. Автор брав активну участь у модернізації наплавного обладнання, відпрацюванні техніки виконання експериментів, отриманні наплавних матеріалів і обробці отриманих даних при виконанні всіх наплавних робіт та результатів металографічних досліджень. Спільно з Інститутом електродинаміки НАН України запропонував оригінальну методику моделювання електромагнітних процесів у СПК.

**Апробація результатів дисертації.** Про основні положення і результати дисертаційної роботи було зроблено доповіді на VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві» (Краматорськ, 2021); XVII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електродинаміки – 2022» (27-28 вересня 2022 р., м. Київ); Міжнародній конференції «Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України (17 листопада 2022 р., Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона, м. Київ); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Наука і металургія» (22-24 листопада 2022 р., м. Дніпро).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи загалом опубліковано 12 наукових праць, в тому числі 8 статей у фахових науково-технічних журналах (у т.ч. 2 входять в базу «Scopus») і 4 – у збірниках тез доповідей міжнародних науково-технічних конференцій.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційна робота викладена на 171 сторінках і складається зі вступу, п'яти розділів, висновків за розділами та загальних висновків, переліку використаних літературних джерел. Обсяг основного тексту складає 144 сторінки машинописного тексту, містить 74 рисунки, 19 таблиць, список літератури зі 189 найменувань на 20 сторінках та 2-х додатків.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, визначено мету та основні завдання дослідження, вказано на зв'язок роботи з науковими програмами, показані наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, наведені відомості про апробації, публікації, описано структуру дисертації.

**У першому розділі** виконано аналіз умов експлуатації деталей машин і механізмів гірничо-металургійного комплексу. Розглянуто дугові способи відновлення деталей і показано обмеженість їхнього застосування з погляду як вибору наплавних матеріалів, так і можливостей наплавлення шарів великої товщини. Альтернативою цим способам є електрошлакове наплавлення, яке показало хороші результати при відновленні деталей різного призначення з використанням наплавкових матеріалів зі зменшеними, у порівнянні зі сталями, механічними властивостями, але які мають високу стійкість до абразивного зношування. Одними з таких деталей є гірське переробне обладнання і гірничо-дорожньо-будівельна техніка, які зазвичай експлуатуються в умовах ударно-абразивного зношування, а саме:

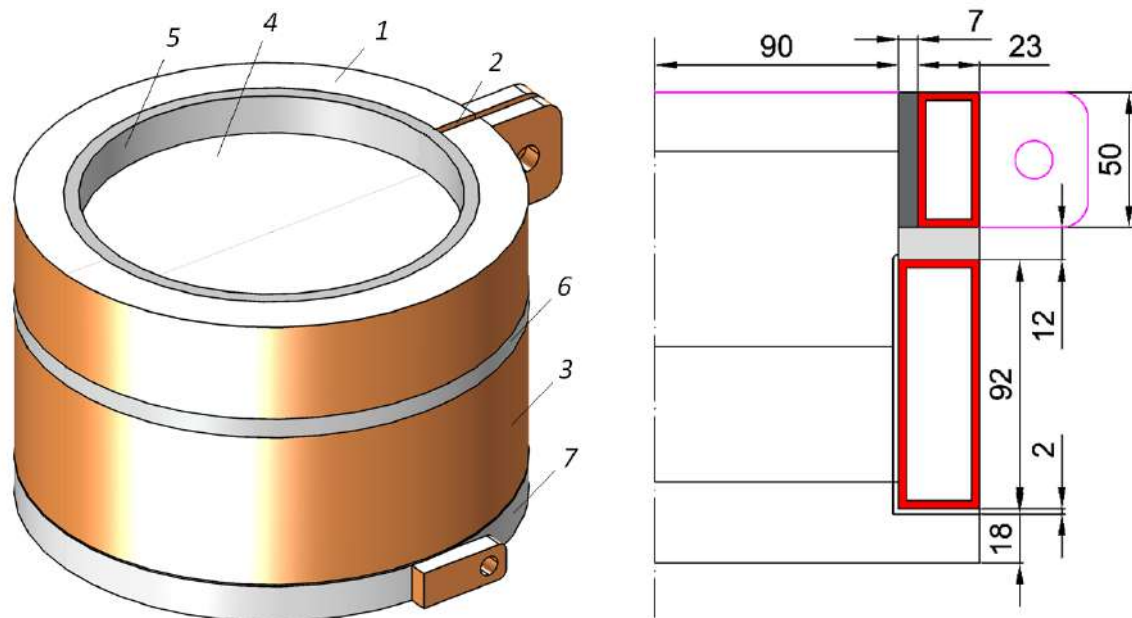
- біла роторних дробарок;
- футеровки кульових млинів;
- бандажі валкових дробарок;
- плити щоккових дробарок;
- зуби ковшів кар'єрних екскаваторів;
- козирки черпаючого апарату (черпаки) драг;
- ножі бульдозерів, скреперів, автогрейдерів.

У якості наплавкових матеріалів частіше за все використовують високовуглецеві леговані сталі та сплави. Для виконання основних металознавчих досліджень і проведення зміцнювального наплавлення в даній дисертаційній роботі обрано зносостійкий високохромистий чавун.

Відзначено, що ширші можливості притаманні електрошлаковому наплавленню в струмопідвідному кристалізаторі. Показано принцип дії струмопідвідного кристалізатора і особливості ЕШН з його використанням.

**У другому розділі** проведено математичне моделювання електромагнітних процесів у СПК і показано шляхи регулювання обертання шлакової ванни.

Розглянуто модель СПК для процесу електрошлакового наплавлення на горизонтальну поверхню. Загальний вигляд кристалізатора представлений на рис. 1(а) і складається з верхньої струмопровідної секції 1, що має вертикальний розріз 2 (в аксіальному напрямку), який перетворює її в одновитковий індуктор, та нижньої секції 3, в якій міститься частина шлакової ванни 4 та формується метал, що наплавляється. Верхня секція має графітову футеровку 5 у вигляді кільця, яка захищає її від електроерозійного впливу розплавленого шлаку. Секції розділені між собою електроізоляційною прокладкою 6 (азбест). Під нижньою секцією знаходиться заготовка 7, яка відділена від неї електроізоляційною прокладкою та на яку наплавляється метал підвищеної міцності та зносостійкості. Більш детально геометрія досліджуваної конструкції представлена на рис. 1(б) у вертикальному перерізі, що проходить через вертикальний розріз верхньої струмопровідної секції.



а

б

Рис. 1 – Геометрія досліджуваної конструкції СПК

При підключенні такої системи до напруги, яка подається на одну з клем верхньої секції та на клему підкладки, внаслідок протікання струму в шлаковій ванні відбувається значне тепловиділення та відбувається рух рідкого шлаку під дією електромагнітних сил. Вибір клеми та місця її контакту до верхньої секції впливає на напрямок протікання струму в ній та визначає напрямок руху шлаку.

Отримані розподіли густини струму у верхній струмопровідній секції та розподіли електромагнітних сил в горизонтальному перерізі шлакової ванни на рівні 15 мм від її поверхні залежно від кута між клемою живлення та верхньою струмопровідною секцією представлено відповідно на рис. 2 та рис. 3.

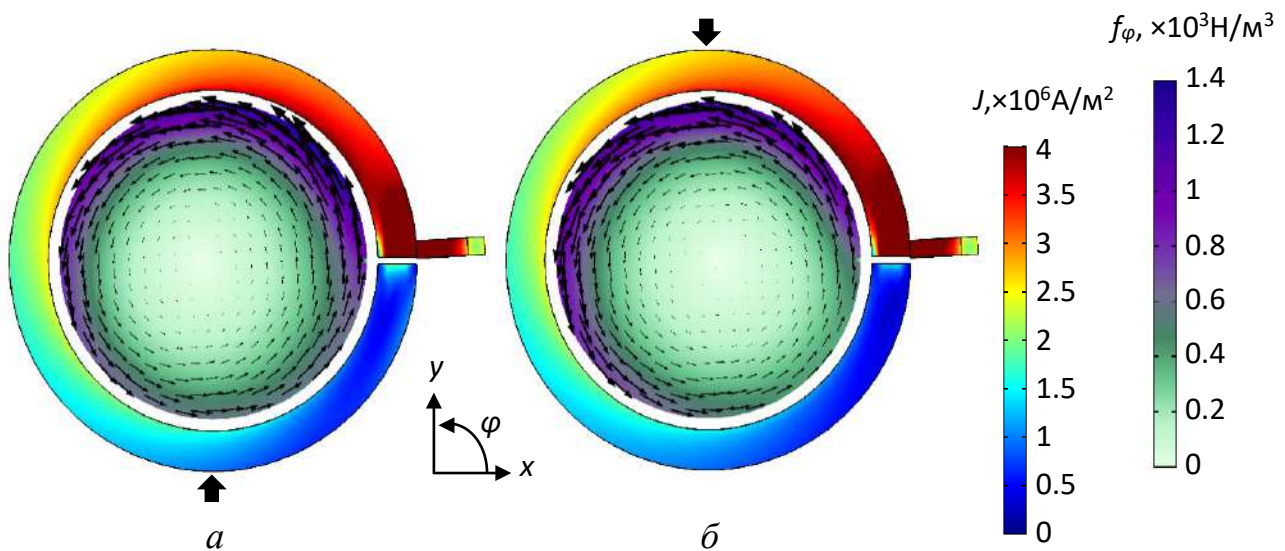


Рис. 2 – Розподіл густини струму у верхній струмопровідній секції: а –  $\varphi_1 = 3^\circ$ ,  $\varphi_2 = -90^\circ$  (випадок 1); б –  $\varphi_1 = 3^\circ$ ,  $\varphi_2 = 90^\circ$  (випадок 2);  $\blacktriangleright$  – місце підключення нижньої клеми

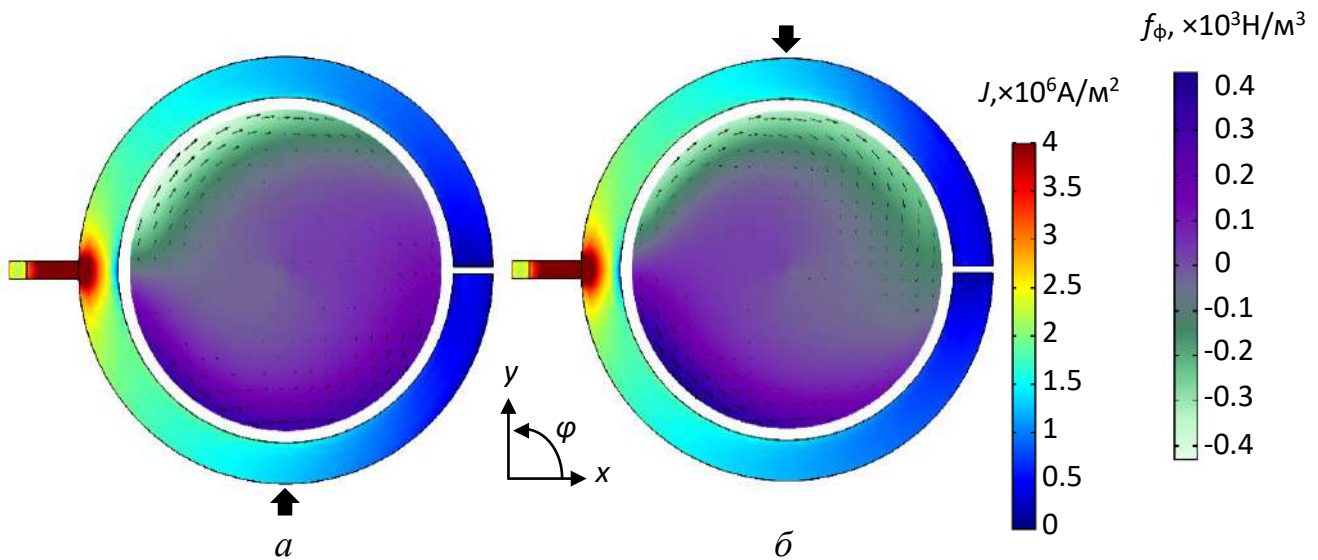


Рис. 3 – Розподіл густини струму у верхній струмопровідній секції: а –  $\varphi_1 = 180^\circ$ ,  $\varphi_2 = -90^\circ$  (випадок 3); б –  $\varphi_1 = 180^\circ$ ,  $\varphi_2 = 90^\circ$  (випадок 4);  $\blacktriangleright$  – місце підключення нижньої клеми

Встановлено, що зі збільшенням кута в діапазоні  $0^\circ \dots 180^\circ$  між клемою живлення і вертикальним розрізом верхньої струмопровідної секції електромагнітна дія на рідкий шлак спадає лінійно. Максимальна ефективність циркуляції рідкого шлаку спостерігається при живленні струмопровідної секції безпосередньо біля розрізу, коли величина інтегрального значення окружної складової електромагнітних сил в шлаковій ванні найбільша.

У третьому розділі визначено види наплавних матеріалів, що використовуються в експериментах, та їх хімічний склад, що представляє різні класи високовуглецевих легкосплавних матеріалів: високохромисті чавуни, швидкорізальні і штампові сталі (Табл. 1).



Таблиця 1 – Хімічний склад наплавленого металу

Наплавочні матеріали	Вміст хімічних елементів, мас. %										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P	Ni	V	W	Cu
Електрод Ø 120 мм з високохромистого чавуну	3,3	2,1	0,3	17,0	–	–	–	–	–	–	–
Рідка присадка з високохромистого чавуну	3,1	1,8	0,7	18,0	–	–	–	–	–	–	–
Дріб Ø 0,8 – 1,6 мм з високохромистого чавуну	3,5	1,7	0,5	18,0	0,09	0,007	0,031	–	–	–	–
Катаний електрод зі сталі Х12МФ, Ø 70 мм	1,5	0,25	0,3	11,8	0,5	0,020	0,019	0,35	0,22	–	0,2
Ливарний електрод зі сталі Х12МФ, Ø 70 мм	1,3	0,4	0,5	11,3	0,42	–	–	0,27	0,19	–	–
Порошок сталі 10P6M5, фракція Ø 315 – 650 мкм	1,1	0,38	0,3	4,1	5,3	–	–	2,83	1,8	6,1	–

Показано способи їхнього виготовлення. Представлені методики і відповідне обладнання та прилади для виконання як експериментальних, так і металографічних досліджень наплавленого металу і зони його сплавлення з основним.

**Четвертий розділ** присвячений оцінці можливості підвищення міцнісних властивостей високохромистого чавуну шляхом вивчення його мікроструктур, отриманих різними технологічними способами наплавлення (Табл. 2). Показано переваги ЕШН у СПК електродом великого перерізу з високохромистого чавуну в порівнянні з ЕШН у звичайному кристалізаторі.

Таблиця 2 – Технологія наплавлення і завдання дослідження наплавленого металу

№	Технологічні способи наплавлення	Завдання дослідження наплавленого металу
1	Наплавлення електродом з високохромистого чавуну у формуючій секції СПК при відключенні струмопідвідної секції від джерела живлення	Порівняльна оцінка структуроутворення наплавленого металу при наплавленні у СПК і звичайному кристалізаторі
2	Наплавлення у СПК електродом із високохромистого чавуну (з обертанням шлакової ванни)	Оцінка впливу обертання шлакової ванни на структуроутворення наплавленого металу
3	Наплавлення у СПК електродом із високохромистого чавуну (без обертання шлакової ванни)	Оцінка впливу обертання шлакової ванни на структуроутворення наплавленого металу
4	Наплавлення у СПК заготівкою із високохромистого чавуну (відключення електроживлення електрода)	Оцінка впливу виду переплавного металу (електрод/заготівка) на структуроутворення наплавленого металу
5	Наплавлення у СПК дробом із високохромистого чавуну	Оцінка впливу дискретної присадки на структуроутворення наплавленого металу
6	Наплавлення рідким високохромистим чавуном у звичайному кристалізаторі	Оцінка впливу рідкої присадки на структуроутворення наплавленого металу
7	Наплавлення у СПК порошком сталі P6M5 (без обертання шлакової ванни)	Оцінка впливу обертання шлакової ванни на структуроутворення наплавленого металу

№	Технологічні способи наплавлення	Завдання дослідження наплавленого металу
8	Наплавлення у СПК порошком сталі Р6М5 (з обертанням шлакової ванни)	Оцінка впливу обертання шлакової ванни на структуроутворення наплавленого металу
9	Наплавлення катанним електродом зі сталі Х12МФ у звичайному кристалізаторі	Оцінка впливу структури переплавного металу на структуроутворення наплавленого металу
10	Наплавлення ливарним електродом зі сталі Х12МФ у звичайному кристалізаторі	Оцінка впливу структури переплавного металу на структуроутворення наплавленого металу

При порівнянні мікроструктур чавуну, отриманого при ЕШН за двома стандартними технологіями (у звичайному кристалізаторі і СПК), можна відзначити таке (Табл. 3): основна відмінність наплавленого у СПК металу – це отримання структур зі значно меншою кількістю евтектичної складової при зменшенні у 2...4 рази її розмірів. Очевидно, ці зміни впливають на макротвердість наплавленого чавуну – вона підвищується як мінімум приблизно на 10 %. Дивлячись на структуроутворення чавуну за відсутності у СПК обертання шлакової ванни під час ЕШН електродом спостерігається відносно груба структура (розмір евтектики становить 150x200 мкм). Що стосується структуроутворення чавуну при заміні електрода на не струмопровідну заготовку, але за наявності обертання шлаку у СПК, хоча евтектика має менші розміри (100x200 мкм), але в структурі з'являються карбіди більших розмірів і грубішої форми, що, звісно, знижує пластичність сплаву та його ударостійкість.

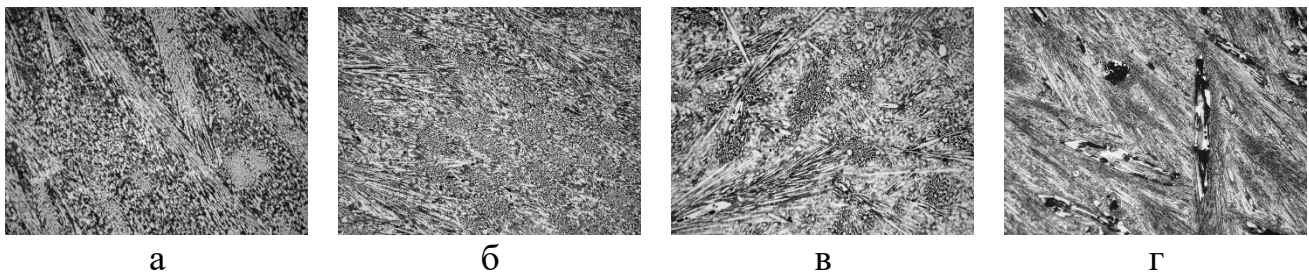


Рис. 4 – Мікроструктура краю металу зразків х 100: а – в звичайному кристалізаторі (електрод); б – в СПК; в – в СПК без обертання; г – в СПК (заготовка).

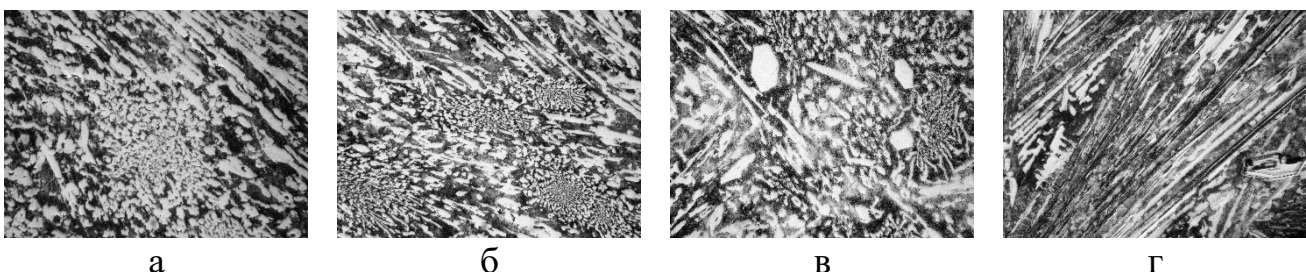


Рис. 5 – Мікроструктура краю металу зразків х 400: а – в звичайному кристалізаторі електродом; б – в СПК; в – в СПК без обертання; г – в СПК не струмопровідною заготовкою.

Таблиця 3 – Результати металографічного дослідження металу, наплавленого електродом великого перерізу із високохромистого чавуну (край наплавленого шару)

№ технологічного способу наплавлення	Вміст структурних складових, %					Розмір евтектики (□ або Ø), мкм	HRC
	М	Е	КВ	КГ	КЛ		
1	28...30 (з КД)	40...42	28...30	–	–	200x400 150x240	46...49
2	28...47	25...36	28...36	–	–	50x100	52
3	30...42	38...45	12...21	6...8	–	150x200	46...49
4	22	12	39	–	21...33		

Примітка: М – мартенсит; Е – евтектика; КВ – карбіди віялоподібної форми; КД – карбіди дисперсної форми; КГ – карбіди гексогональної форми; КЛ – карбіди ланцетоподібної форми.

Встановлено позитивний вплив електромагнітного обертання шлакової ванни на дисперсність структури чавуну. Вперше на прикладі швидкорізальної сталі отримано підтвердження значення обертання шлакової ванни при ЕШН у СПК дискретною присадкою. Уточнення важливості цього параметра при ЕШН дискретною присадкою дозволяє більш реально оцінювати можливості цього наплавлення. У зв'язку з тим, що інокуляція також чинить великий вплив на подрібнення мікроструктури наплавленого металу металографічне дослідження виконували за допомогою програмного забезпечення MIPAR. Результати такої оцінки представлені на рис. 6 та у табл. 4.

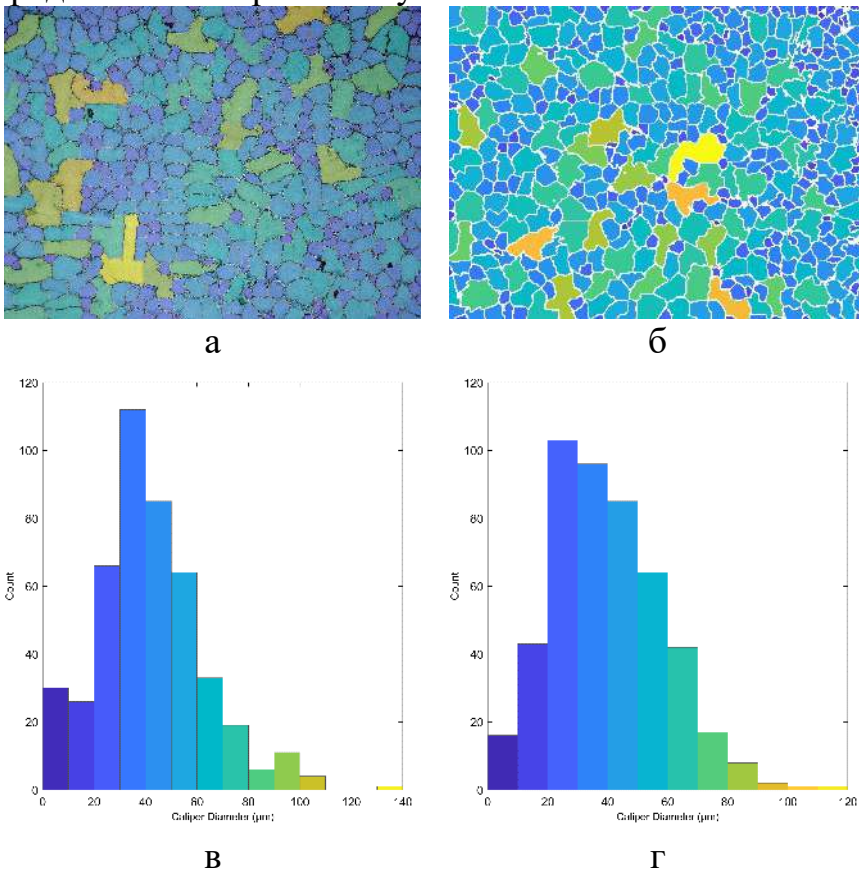


Рис. 6 – Дослідження впливу обертання шлакової ванни на мікроструктуру металу за допомогою програмного забезпечення MIPAR наплавленого порошком 10P6M5: а – мікроструктура металу без обертання x100; б – Мікроструктура металу з обертанням x100; в – гістограма розподілу по розміру зерен без обертання «К»; г – гістограма розподілу по розміру зерен з обертання «К».

При ЕШН у СПК дискретною присадкою у вигляді дробу в чавуні з'являється пластична аустенітна складова, майже в 2 рази зростає кількість евтектики. При цьому макротвердість зберігається приблизно на тому ж рівні – 52...54 одиниць HRC.

Характер формування структури при ЕШН в СПК дробом з високохромистого чавуну представлено на рис. 7 та в табл. 5. Як видно з табл. 5, при ЕШН у СПК обертання шлакової ванни є важливим технологічним параметром для різного виду переплавлених матеріалів.

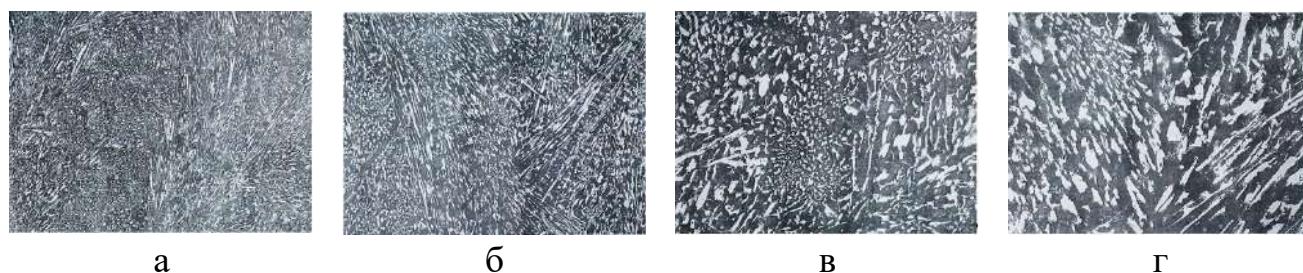


Рис. 7 – Мікроструктура металу зразка наплавленого у СПК дробом ( $\varnothing 0,8 \dots 1,6$  мм) із високохромистого чавуну: а – край  $\times 100$ ; б – середина  $\times 100$ ; в – край  $\times 400$ ; г – середина  $\times 400$

Таблиця 5 – Результати металографічного дослідження металу, наплавленого у СПК дробом ( $\varnothing 0,8 \dots 1,6$  мм) із високохромистого чавуну

Зона дослідження у зразку	Зміст структурних складових, %			Дендритний параметр, мкм	HRC
	Аустеніт	Евтектика	Карбід		
Край	47,7	43,7	9,2	13,8	52...54
Середина	45,8	47,6	6,6		

Відмінною рисою ЕШН рідкою присадкою (рис. 8) є формування в структурі великої кількості ( $\sim$  до 80%) аустенітної складової, що, звісно ж, відображається на зниженні макротвердості наплавленого чавуну – до 44 одиниць HRC (табл. 6). Порівняно з наплавленням дробом практично в 2 рази (край зразка) зростає дендритний параметр. Мабуть, такий спосіб наплавлення можна використовувати лише в тому разі, якщо ударний вплив є визначальним під час експлуатації виробу, що наплавляється.

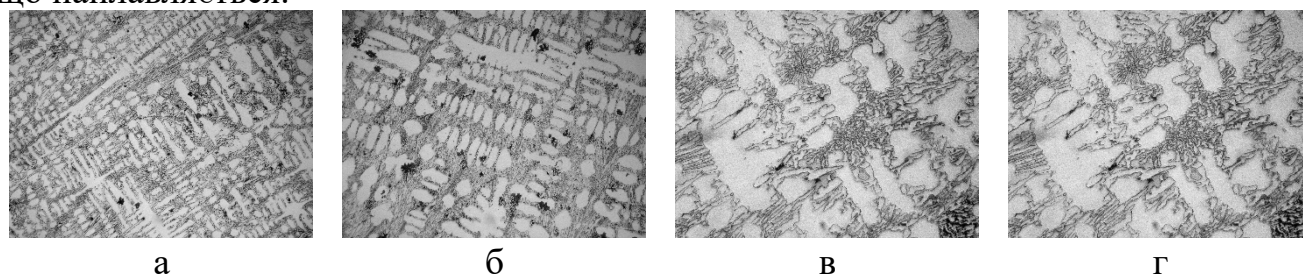


Рис. 8 – Мікроструктура металу зразка наплавленого рідкою присадкою із високохромистого чавуну: а – край, б – середина  $\times 100$ ; в – край, г – середина  $\times 400$

Таблиця 6 – Результати металографічного дослідження металу, наплавленого у звичайному кристалізаторі рідкою присадкою із високохромистого чавуну

Зона дослідження у зразку	Зміст структурних складових, %		Дендритний параметр, мкм	HRC
	Аустеніт	Евтектика		
Край	75...79	21...25	20...30	44
Середина	50...53	47...50	40...60	25



Оцінено можливість застосування при ЕШН у СПК плавких безструмних заготовок замість електродів і показані структурні зміни в наплавленому чавуні, що відбуваються при такій заміні.

Порівнюючи дані Табл. 2 і 3, слід рекомендувати для ЕШН технологію наплавлення у СПК з використанням у якості наплавного матеріалу дробу. Особливо це слід враховувати при наплавленні виробів, що експлуатуються в особливо складних умовах із підвищеними ударними навантаженнями.

Показано ефективність використання при ЕШН у СПК дискретних присадок у вигляді дробу з високохромистого чавуну в порівнянні з наплавленням рідкою присадкою того ж хімічного складу.

Для металу ЕШН у СПК підтверджено наявність структурної спадковості при переплавленні електродів з високовуглецевої сталі Х12МФ різного способу виготовлення (рис. 9). У Табл. 7 представлені результати такого дослідження, виконаного на сталі Х12МФ, наплавленої у звичайному кристалізаторі для недопущення впливу обертання шлакової і металевої ванн, що має місце при ЕШН у СПК.

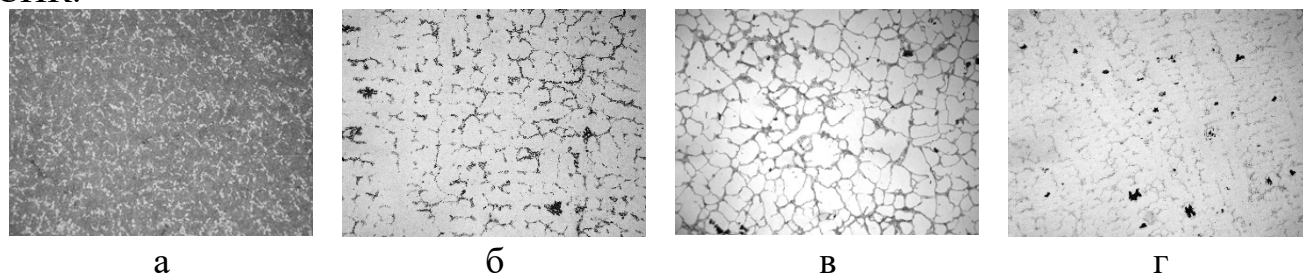


Рис. 9 - Мікроструктура металу зразка  $\times 100$ : а – катаний електрод; б – наплавлений метал катаним електродом; в – ливарний електрод; г – наплавлений метал ливарним електродом.

Таблиця 7 - Результати металографічного дослідження металу ливарних і катаних електродів і наплавленої ними сталі Х12МФ

Об'єкт дослідження	Вид електрода та спосіб наплавлення	Зона дослідження зразка	Структурні складові та їх кількість (%)			Розмір комірок, мкм
			П	КД	$\alpha$ фаза (> 50)	
Електрод	Катаний	$\frac{1}{2}$ R	П	КД	$\alpha$ фаза (> 50)	40...60
	Ливарний	$\frac{1}{2}$ R	А	Е	Тр (6)	90..100
Наплавлений метал	Катаним електродом	К	А	Е	Тр (10)	50...60
		С	А	Е	Тр (17)	90...100
	Ливарним електродом	К	А	Е	Тр (2,8)	80...100
		С	А	Е	Тр (3,2)	120...150

Примітка: R – радіус електрода; К і С - край і середина наплавленого шару відповідно; А – аустеніт; Е – евтектика; П – перліт; КД – дисперсні карбіди; Тр - троостит;  $\alpha$  фаза - перліт + троостит.

Показано перспективність використання наплавлення у СПК у порівнянні з ЕШН у звичайному кристалізаторі. При ЕШН у СПК високохромистого чавуну

формується менша кількість евтектики, і вона розподілена практично рівномірно по всьому поперечному перерізу наплавленого шару. Розміри евтектичних колоній у 2...4 рази менше, одержуваних при ЕШН у звичайному кристалізаторі. Спостерігається збільшення приблизно на 10% кількість карбідів віялоподібної форми. Такі структурні зміни сприяють підвищенню макротвердості чавуну, наплавленого СПК, приблизно на 3 од. HRC.

Таким чином, на підставі проведених досліджень для наплавлення реальних виробів було запропоновано використовувати як наплавочні матеріали у вигляді електродів великого перерізу та дискретну присадку у вигляді дробу.

**У п'ятому розділі** представлені результати практичного використання двох наплавних технологій – виготовлювальної і відновлювальної. У порівнянні зі звичайними кристалізаторами, конструкція СПК більш складна і, крім цього, через його струмопровідну стінку протікає весь або більша частина струму (при наплавленні електродом). Тому для виконання цих робіт попередньо були проведені дослідження з вибору оптимального способу виготовлення двосекційного СПК і технологічної схеми наплавлення.

На першому етапі виконувались наплавлення у СПК різного виконання і уточнювалася працездатність кожного з використаних приладів. Для дослідження були прийняті СПК різного діаметра (72, 85, 152 і 180 мм) і типів виконання. У якості наплавкових матеріалів використовували чавунні електроди  $\varnothing 90$  мм і наплавний дріб  $\varnothing 0,8...2.0$  мм одного хімічного складу. Основним металом служили заготовки з листової сталі Ст3 товщиною 16...20 мм. Робочим флюсом було обрано АНФ-29. Усі наплавлення виконувалися з твердим стартом.

Наплавлення у двосекційних мідних СПК  $\varnothing 85$  і 180 мм дозволяють отримувати наплавлені шари необхідної товщини з гарним формуванням наплавленого шару і оптимальним проплавленням основного металу.

Але в ряді випадків при наплавленні спостерігалось локальне оплавлення струмопідвідної секції в нижній частині її вертикального розрізу, і навіть невелика ерозія на верхньому торці формуючої секції. Такий результат у деяких наплавленнях обумовлений недостатнім тиском води у водній магістралі і незадовільною якістю зварних швів у зоні проходження зварювального струму.

Тому були випробувані при наплавленні в СПК  $\varnothing 152$  мм зі сталеву струмопровідною секцією і різного виготовлення формуючих секцій. Як показали дослідні наплавлення, обидві секції, виготовлені зі сталі, не забезпечують тривалу роботу СПК, відбувається поступове підплавлення торцевих поверхонь секцій з подальшим (через 3 – 4 наплавлення) виходом СПК з ладу.

Виготовлення формуючої секції у вигляді шамотної втулки призводить до того, що при електрошлаковому процесі відбувається активна взаємодія шлаку і шамоту з порушенням внутрішнього розміру секції і, відповідно, якості формування наплавленого шару.

Сталеву струмопідвідну секцію  $\varnothing 72$  мм використовували в наплавленнях разом з мідною формуючою секцією. Під час наплавлення спостерігалось невелике підплавлення у нижній частині вертикального розрізу струмопідвідної секції. З формуючою секцією жодних змін не відбувалося.

Таким чином, як показали виконані експерименти, для ЕШН у стаціонарному СПК слід використовувати двосекційні мідні кристалізатори. Очевидно, можна

отримати кращі результати щодо працездатності й при використанні сталевих секцій СПК у разі їхнього виготовлення не зі сталі Ст3, а з армо-заліза, що має кращу теплопровідність при тій самій товщині стінки 3 мм.

Другий етап дослідження полягав у тому, щоб оцінити технологічну доцільність і економічну ефективність способу отримання і використання біметалу:

- ЕШН на сталеві заготовки певного розміру;
- наплавлення зносостійких шарів безпосередньо на зношені поверхні;
- виконання виготовлювального наплавлення з вибором основного металу оптимального хімічного складу;
- отримання наплавлення багат шарового зливка з подальшим використанням його біметалевих складових.

Технологія отримання біметалевих заготовок досить проста, дозволяє знаходити оптимальне поєднання металів, що з'єднуються, наприклад, низьковуглецева добре зварювана сталь типу сталі Ст3 і високохромистий чавун. Підбираючи біметалеві заготовки за розмірами, що відповідають розмірам зношуваних зон, можна оптимізувати їхню кількість і розташування.

Ця технологія була багаторазово випробувана при ЕШН на сталеві заготовки товщиною 16...20 мм при використанні кристалізаторів різного виконання і виду наплавних матеріалів (електроди великого перерізу і дріб).

Було встановлено, що при застосуванні оптимальної техніки наплавлення можна одержувати добре сформовані шари чавуну завтовшки 15...20 мм при пропавленні основного металу приблизно до 3 мм.

Отримання багат шарових наплавлених злитків передбачає використання при напавленні двох наплавних матеріалів, один з яких формує метал сталеві основи, а другий – метал зносостійкого шару. Найпростіше ця технологія наплавлення виконується з використанням дискретних наплавних матеріалів (дробу). З точки зору економіки, застосування такої технології доцільне, однак, як показали дослідження, за такої технології отримання багат шарового напавленого металу складно забезпечити рівномірне сплавлення двох різнорідних сплавів. Тому для дослідно-промислового напавлення було прийнято технологію одно шарового напавлення.



Рис. 10 – Струмopідвідний кристалізатор з внутрішнім перерізом 200x200 мм

Для підвищення можливості напавлення великих площ і отримання напавлених шарів з іншими формами у порівнянні з циліндричними поверхнями розроблено та виготовлено СПК квадратного перерізу.

Для виготовлення плит квадратного перерізу було виготовлено мідний двосекційний струмопідвідний кристалізатор з внутрішнім перерізом 200x200 мм, в конструкції якого було враховано досвід розробки та експлуатації струмопідвідних кристалізаторів круглого перерізу (рис. 10).

Наведено результати промислових випробувань обох наплавлених виробів. Виготовлення нової деталі було застосовано при наплавленні в СПК Ø 152 мм бічних футеровок щоквої дробарки СМД-111, з використанням як електродів великого перерізу, так і дробу. Товщина наплавлених шарів становить ~ 15 мм. На рис. 11. показано наплавлену футеровку з армуючими елементами, що безпосередньо наплавлені на сталеву заготовку, до експлуатації та після 4-х і 9 місяців роботи при дробленні базальту (категорії міцності 20). Як видно з рис. 11, наплавлені «шайби» зберегли свою форму і мають відносно невелике зношування робочих поверхонь.



а

б

в

Рис. 11 – Зовнішній вигляд напавленої поверхні футеровки через: а – до експлуатації; б – 4 місяці; в – 9 місяців

Ремонтні роботи були застосовані при відновленні зношених зон передньої стінки ковша кар'єрного навантажувача «Caterpillar» ємністю 15 м<sup>3</sup>. Для ремонту ковша було виготовлено 30 біметалевих заготовок квадратного поперечного перерізу розміром 200x200мм з товщиною наплавленого електродом шару 20±2мм, з яких за допомогою гідроабразивного різання були виготовлені армуючі плитки. За допомогою ручного дугового зварювання електродом плитки (сірого кольору) були розміщені в найбільш зношуваній нижній частині стінки ковша. Розташування плит після приварки та зовнішній вигляд ковша показано на рис. 12.

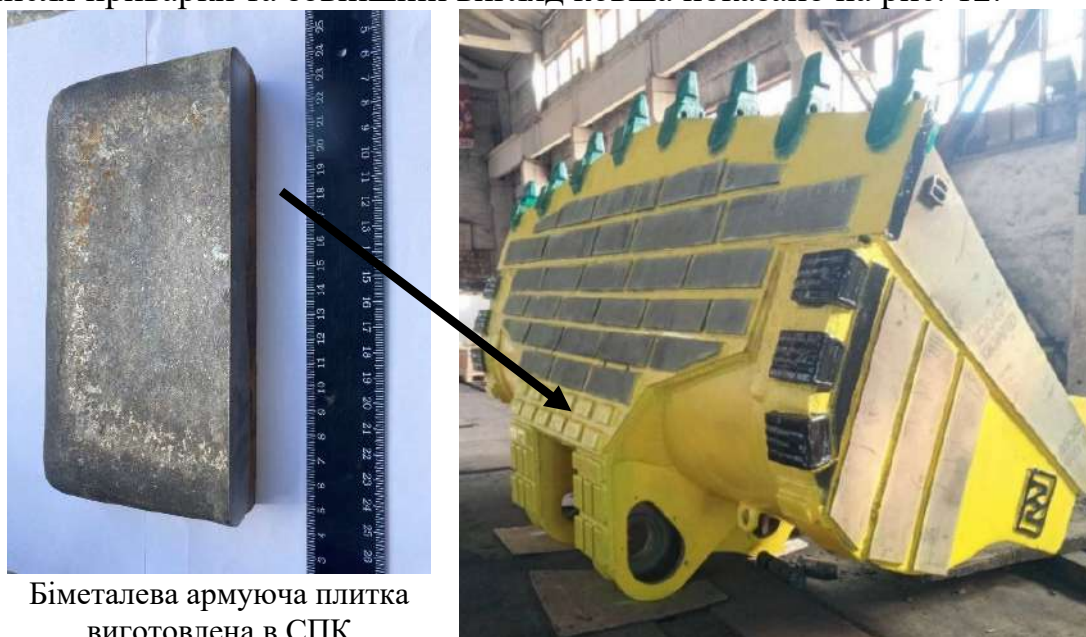


Рис. 12 – Ківш навантажувача «Caterpillar» ємністю 15 м<sup>3</sup>, зміцнений зносостійкими листами і біметалевими армуючими елементами (світлого кольору)

Біметалева армуюча плитка виготовлена в СПК квадратного перетину





Рис. 13 – Ліва сторона зношеної поверхні передньої стінки ковша

Як показали результати експлуатації навантажувача протягом 3-х місяців, прийнятий міжремонтний термін експлуатації, довговічність наплавленого чавуну як у ливарному стані, так і в термообробленому не відрізняється. На рис. 13 показано ліву сторону зношеної поверхні ковша. Вертикально розташовані біметалеві плитки мають незначне зношування. Плитки, які були розташовані горизонтально в найбільш зношеній зоні, були повністю зношені. При цьому вони виявилися хорошим бар'єром подальшого зношування листів зі зносостійкої сталі, які згідно з існуючими технологіями ремонту приварюються для захисту всієї поверхні стінки ковша, які після віддалення від зони максимального зношування мало змінили розміри.

Таким чином, встановлена можливість зміцнення ковшів імпортованих навантажувачів «Caterpillar» шляхом використання біметалевих армуючих елементів, отриманих електрошлаковим наплавленням високохромистого чавуну в струмопідвідному кристалізаторі квадратного перерізу. Досвід експлуатації навантажувача показав, що його довговічність можна значно збільшити шляхом приварювання армуючих елементів з великою товщиною шару чавуну. Орієнтовно така товщина шару може становити близько 30 мм. При цьому, як показали експерименти, при наплавленні як у кристалізаторах круглого перерізу, так і квадратного, якість наплавленого чавуну не залежить від товщини його шару.

товщиною шару чавуну. Орієнтовно така товщина шару може становити близько 30 мм. При цьому, як показали експерименти, при наплавленні як у кристалізаторах круглого перерізу, так і квадратного, якість наплавленого чавуну не залежить від товщини його шару.

## ВИСНОВКИ

1. Показано, що ефективним способом електрошлакового наплавлення високовуглецевих матеріалів, зокрема високохромистими чавунами є ЕШН в струмопідвідному кристалізаторі.

2. Результатами виконаних практичних наплавлень підтверджено правильність прийняття технологічних рішень на підставі вивчення структур наплавленого металу, що формуються при різних способах ЕШН у СПК.

3. Розроблена тривимірна математична модель електромагнітних характеристик СПК, яка показує шляхи ефективного регулювання швидкості обертання шлакової ванни за рахунок змінення положення струмопідводу до верхньої струмопідвідної секції кристалізатора.

4. Показано необхідність при ЕШН у СПК обертання шлакової ванни як при наплавленні електродом великого перерізу, так і при використанні дискретної присадки. У порівнянні з ЕШН електродом великого перерізу у звичайному

кристалізаторі дисперсність структурних складових високохромистого чавуну підвищується приблизно в 3 рази. Завдяки електромагнітному обертанню ванни метал, наплавлений у СПК, має приблизно в 2 рази дрібнішу структуру, ніж у разі відсутності обертання ванни.

5. Встановлено, що в металі отриманого ЕШН у СПК, спостерігається явище структурної спадковості залежно від способу виготовлення наплавних матеріалів. При наплавленні катанним електродом зі сталі Х12МФ дисперсність структури підвищується приблизно на 50% у порівнянні з ЕШН ливарним електродом того ж хімічного складу і діаметру.

6. На характеристики структури наплавленого металу великий вплив має вид найбільш застосовуваних при ЕШН у СПК наплавкових матеріалів: електроди великого перерізу, дискретна і рідка присадки. Найкращі результати для більшості умов експлуатації дає змогу отримати ЕШН з дискретною присадкою. У порівнянні з рідкою присадкою вона дозволяє знизити дендритний параметр структури наплавленого чавуну практично в 2 рази і підвищити його твердість приблизно на 20%. Хороші результати забезпечує і наплавлення електродом великого перерізу.

7. У разі застосування при ЕШН у СПК у якості наплавного матеріалу безструмових заготовок замість електродів з метою зменшення глибини проплавлення основного металу слід враховувати структурні зміни, що відбуваються при цьому. У структурі наплавленого високохромистого чавуну відбувається зменшення у 2,5...3 рази кількості евтектики, змінюються тип і кількість карбідної фази, і її розподіл у наплавленому металі.

8. Отримані результати промислових випробувань наплавлених електродом та дробом бокових футерувань шокової дробарки СМД-111 і відновленої передньої стінки ковша кар'єрного навантажувача «Caterpillar» ємністю 15 м<sup>3</sup> підтвердили правильність обраних технологій зміцнення. Виробниче наплавлення футеровок змогло підвищити їхню довговічність. Відновлення зношених зон передньої стінки ковша способом зміцнення біметалевими армуючими елементами дозволило виключити її заміну під час планових ремонтів ковша.

## **ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ВІДОБРАЖЕНІ В НАСТУПНИХ ПУБЛІКАЦІЯХ**

1. Kuskov Y.M., Zhdanov V.A., Proskudin V.N., A.V. Netyaga. Production of Bimetallic Reinforcing Elements Using Electroslag Cladding for Hardening of Products of the Mining and Smelting Industry. *Steel Trans.* 2021, volume 51, issue 4, pages 267-269.

2. Моделювання електромагнітних процесів в секційному кристалізаторі для електрошлакового наплавлення металу / Ю.М. Гориславець, О.І. Бондар, В.М. Проскудін, Ю.М. Кусков, С.В. Римар, А.В. Нетяга // *Технічна електродинаміка.* 2022. № 4. С. 64-68.

3. Формування шару високохромистого чавуну при електрошлаковому наплавленні в струмопідвідному кристалізаторі квадратного перерізу / А.В. Нетяга, Ю.М. Кусков, В.М. Проскудін, В.О. Жданов, І.П. Лентюгов // *Сучасна електрометалургія.* 2021. № 4. С. 16-19.

4. Вплив струмопідводу на електромагнітні процеси в кристалізаторі для електрошлакового наплавлення металу / Ю.М. Гориславець, О.І. Бондар, В.М.

Проскудін, Ю.М. Кусков, С.В, Римар, А.В. Нетяга // ISSN 1727-9895. Праці ІЕД НАН України. 2022. Вип. 62. С. 19-24.

5. Особливості кристалізації металеві ванни під час електрошлакового наплавлення в струмопідводному кристалізаторі / А.В. Нетяга, Ю.М. Кусков // *Металургія – Запоріжжя*, 2021. – Вип. 2. С. 30-34.

6. A. Netyaga. Features of Electroslag Cladding in Current-supply Crystallizers with Different Designs. *Polish journal of science*. 2022. № 48. vol. 1. Pages 43-49.

7. Технології отримання футерувальних елементів методом електрошлакового наплавлення в струмопідводному кристалізаторі / А.В. Нетяга, Ю.М. Кусков, В.М. Проскудін, В.О. Жданов // *Автоматичне зварювання*. 2022. № 1. С. 46-48.

8. Вибір зносостійких матеріалів для електрошлакового наплавлення у струмопідводному кристалізаторі деталей обладнання гірничої техніки / А.В. Нетяга, Ю.М. Кусков, В.М. Проскудін, В.О. Жданов // *Автоматичне зварювання*. 2022. № 2. С. 37-40.

9. Получение электрошлаковой наплавкой биметаллических армирующих элементов для упрочнения деталей машин и механизмов / Ю.М. Кусков, В.Н. Проскудин, А.В. Нетяга // *Сварщик*. 2020. № 6. С. 6-7.

10. Нетяга А.В., Кусков Ю.М., Биктагиров Ф.К. Получение многослойного биметаллического слитка с использованием электрошлаковых технологий. – *Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві»*. 21-24.09.21 р., м. Краматорськ. Краматорськ. 2021. С. 90-91.

11. Кусков Ю.М., Рябцев І.О., Проскудін В.М., Нетяга А.В. Електрошлакове наплавлення деталей з підвищеним опором абразивному та ударноабразивному зношуванню. – *Збірка тез доповідей «Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України»*. 17 листопада 2022 р. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона. м. Київ. 2022. С. 43.

12. Кусков Ю.М., Биктагиров Ф.К., Ігнатов А.П., Нетяга А.В. Спадковість структури металу при електрошлаковій наплавці витратним електродом. – *Збірник тез Всеукраїнська науково-технічна конференція «Наука і металургія»*. 22-24 листопада, м. Дніпро. 2022. С. 55-56.

## АНОТАЦІЯ

Нетяга А.В. Зміцнення деталей машин і механізмів гірничо-металургійного обладнання електрошлаковим наплавленням у струмопідвідному кристалізаторі.

*Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології» (з технічних наук) – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, 2023.*

Дисертаційна робота присвячена розробленню ефективного технологічного рішення отримання наплавленого металу підвищеної якості, стійкого в умовах абразивного і ударно-абразивного зношування, на основі досліджень особливостей

електрошлакового наплавлення (ЕШН) в струмопідвідному кристалізаторі (СПК) з використанням електродів великого перерізу і дискретних присадок.

Вперше виконане комплексне оцінювання впливу способу виготовлення наплавлувальних матеріалів, їх виду та технологічних параметрів на мікроструктуру високовуглецевого зносостійкого металу, наплавленого в СПК. Досліджена працездатність СПК різноманітного конструкційного виконання.

Вперше встановлено, що при будь-якому способі ЕШН у СПК необхідно обов'язково забезпечувати обертання шлакової ванни як для створення оптимальних теплових умов в об'ємі шлакової ванни і досягнення рівномірного проплавлення основного металу, так і отримання металу з більш високими експлуатаційними характеристиками як за механічними властивостями, так і за стійкістю до абразивного зношування і ударних навантажень.

Показано необхідність при ЕШН у СПК обертання шлакової ванни як при наплавленні електродом великого перерізу, так і при використанні дискретної присадки. У порівнянні з ЕШН електродом великого перерізу у звичайному кристалізаторі дисперсність структурних складових високохромистого чавуну підвищується приблизно в 3 рази. Завдяки електромагнітному обертанню ванни метал, наплавлений у СПК порошком сталі 10P6M5, має приблизно в 1,3...1,5 рази дрібнішу структуру, ніж у разі відсутності обертання ванни.

Результати, отримані в роботі підтверджені дослідно-промисловою перевіркою, проведеною на ТОВ НВП «Промкомплект», для якої було виготовлено за допомогою наплавлення бокове футерування щоквої дробарки СМД-111, та на ТОВ «ВКФ КРИВБАСТЕХМАШ» відновлення передньої стінки ковша кар'єрного навантажувача «Caterpillar».

Отримані результати промислових випробувань наплавлених бокових футерувань щоквої дробарки СМД-111 і відновленої передньої стінки ковша кар'єрного навантажувача «Caterpillar» ємністю 15 м<sup>3</sup> підтвердили правильність обраних технологій зміцнення. Виробниче наплавлення футеровок змогло підвищити їхню довговічність. Відновлення зношених зон передньої стінки ковша способом зміцнення біметалевими армуючими елементами дозволило виключити її заміну під час планових ремонтів ковша.

*Ключові слова:* електрошлакове наплавлення, струмопідвідний кристалізатор, високохромистий чавун, електроди великого перерізу, дріб, математичне моделювання, обертання шлакової ванни, мікроструктура наплавленого чавуну.

## ABSTRACTS

**Netyaga A.V. Strengthening of parts of machines and mechanisms of mining and metallurgical equipment by electroslag surfacing in a current-supply crystallizer. – Qualifying scientific work as a manuscript.**

*Ph.D. Thesis in Engineering Science by specialty 05.03.06 - “Welding and related processes and technologies” (in engineering and industrial technology sciences) – The E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 2023.*

PH.D. Thesis is devoted to the development of an effective technological solution for producing a deposited metal of improved quality, resistant to abrasive and impact-abrasive



wear, based on studies of the features of electroslag surfacing (ESS) in a current-carrying crystallizer (SCC) using large-section electrodes and discrete additives.

For the first time, a comprehensive assessment of the influence of the method of manufacturing surfacing materials, their type and technological parameters on the microstructure of high-carbon wear-resistant metal deposited in the SCC was performed. The performance of the various design versions of the SCC was investigated.

For the first time, it has been established that any method of ESS in a CSC must necessarily ensure the rotation of the slag bath to create optimal thermal conditions in the slag bath volume and achieve uniform melting of the base metal, as well as to obtain a metal with higher performance characteristics in terms of mechanical properties and resistance to abrasive wear and shock loads.

The necessity of slag bath rotation both during surfacing with a large-section electrode and when using a discrete additive is shown. Compared to ESS with a large-section electrode in a conventional crystallizer, the dispersion of structural components of high-chromium cast iron increases by about 3 times. Due to the electromagnetic rotation of the bath, the metal deposited in the CSC with 10R6M5 steel powder has a structure that is about 2 times finer than in the absence of bath rotation.

The results obtained in this work are confirmed by the pilot test carried out at Promkomplekt Ltd. for which the side lining of the SMD-111 jaw crusher was manufactured by surfacing and at Kryvbastekhmash LLC for the restoration of the front wall of the bucket of the CATERPILLAR mining loader.

The results of industrial tests of the welded side linings of the SMD-111 jaw crusher and the restored front wall of the 15 m<sup>3</sup> bucket of the CATERPILLAR mining loader confirmed the correctness of the chosen strengthening technologies. The production surfacing of the linings increased their durability. The restoration of worn areas of the bucket front wall by strengthening with bimetallic reinforcing elements made it possible to eliminate its replacement during scheduled bucket repairs.

*Key words:* surfacing, high-chromium cast iron, electroslag surfacing, current-supply crystallizer, surfacing technologies, microstructure, properties of the deposited metal.



Підписано до друку 28.08.2023 р. Формат 60x84/16. Пап. офс. № 1. Офс. друк.  
Ум. друк. арк. 1,8. Ум. фарбо-відб. 2,1 Тираж 100 прим. Зам. № \_\_\_\_\_.  
ПОД ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150. Київ-150, вул. Антоновича, 69