

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Нетяга Антон Володимирович**

УДК 621.791.92:669-2/-9:66.065.5

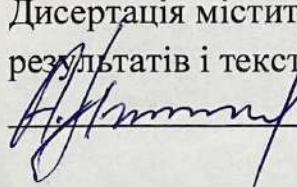
**ДИСЕРТАЦІЯ**

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

Спеціальність 05.03.06 – "Зварювання та споріднені процеси і технології"

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 А.В. Нетяга

Науковий керівник:  **Кусков Юрій Михайлович**  
доктор технічних наук,  
провідний науковий співробітник

Київ – 2023

## АНОТАЦІЯ

**Нетяга А.В. Зміцнення деталей машин і механізмів гірничо-металургійного обладнання електрошлаковим наплавленням у струмопідвідному кристалізаторі.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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 ефективної технології наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі високохромистого чавуну підвищеної якості, стійкого в умовах абразивного та ударно-абразивного зношування, на основі досліджень особливостей формування його структури під час використання різних видів наплавочних матеріалів.

Шляхом тривимірного математичного моделювання електромагнітних характеристик струмопідвідного кристалізатора було оцінено ступінь електромагнітного впливу індукованих у ньому струмів на рідкий шлак, що дало змогу запропонувати ефективний спосіб регулювання його обертання. Встановлено, що збільшення кута зсуву клеми струмопідведення струмопровідної секції кристалізатора від її вертикального технологічного розрізу на кут до  $180^\circ$  лінійно знижує електромагнітний вплив на шлакову ванну, що обертається. При цьому електричні параметри наплавлення та інтегральне виділення тепла в шлаку мало змінюються від можливого переміщення клеми струмопідведення. У такий спосіб з'являється можливість впливати як на проплавлення основного металу, так і на його рівномірність, а також на процес кристалізації наплавлюваного металу.

Основні результати моделювання були проведені на реальних наплавленнях у кристалізаторі круглого поперечного перерізу, що показали відповідність розробленої

моделі реальному процесу наплавлення і підтвердили правильність технологічних висновків її використання.

Металографічними методами дослідження встановлено закономірності формування структури високохромистого чавуну під час його наплавлення електродами та заготовками великого перерізу, рідкою та дискретною (шротом) присадками.

Показано перспективність використання наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі (СПК) у порівнянні з електрошлаковим наплавленням (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% кількості карбідів віялоподібної форми. Такі структурні зміни сприяють підвищенню макротвердості чавуну, наплавленого СПК, приблизно на 3 одиниці HRC.

Виключення обертального ефекту при ЕШН у СПК призводить до огрублення структури наплавленого чавуну. Розмір евтектичних колоній стає приблизно в 3 рази більшим, ніж при звичайному варіанті використання СПК. Макротвердість металу відповідно знижується приблизно на 3 одиниці HRC.

Використання при ЕШН у СПК безструмової заготовки з високохромистого чавуну в порівнянні з наплавленням електродами призводить до зменшення кількості евтектики в 2,5...3,0 рази. Спостерігається різка відмінність розподілу карбідів віялоподібної форми: від менш ніж 10% біля краю шару до 39% у його середині. У структурі додатково формуються карбіди ланцетоподібної форми: від 15% у центрі шару до 30% біля його краю. При цьому макротвердість наплавленого чавуну значно не знижується (приблизно на 1 одиницю HRC).

Застосування при ЕШН у СПК у якості наплавкового матеріалу дробу з високохромистого чавуну дозволяє отримувати дрібнозернисту структуру з відносно

рівномірним розподілом структурних складових. При цьому такий метал має підвищену макротвердість – 52...54 одиниць HRC.

Одержуваний при ЕШН рідким металом наплавлений високохромистий чавун має дендритний параметр структури більшої величини, ніж одержуваний при ЕШН дробом: на 81% біля краю шару металу і на 109% у його центрі. Відповідно знижується макротвердість чавуну: на 20% біля краю шару металу і майже на 90% у його середині.

На підставі отриманих результатів досліджень для виконання наплавлення високохромистого чавуну рекомендовано технології, що здійснюються під час обертання шлакової ванни зі швидкістю 30...50 об/хв та з використанням у якості наплавлювальних матеріалів електродів великого перерізу і дробу, які забезпечують одержання чавуну з оптимальним поєднанням міцності та зносостійких властивостей.

На прикладі швидкорізальної сталі Р6М5 показано визначальний вплив обертання шлакової ванни на отримання дрібнозернистої структури високовуглецевого металу, що наплавляється, порівняно з впливом на його кристалізацію інокулюючих дискретних присадок. Тим самим підтверджено доцільність використання під час наплавлення такого типу матеріалів не в звичайних кристалізаторах, а струмопідвідних.

Розроблено технологічні рекомендації щодо обладнання та режимів електрошлакового наплавлення високохромистого чавуну.

Виконано дослідне виготовлювальне наплавлення бічних футеровок цокової дробарки СМД-111 з нанесенням на сталеву основу локальних армуючих елементів завтовшки 15 мм, діаметром 150 мм, що займають 35...40% робочої поверхні виробу і дають змогу підвищити стійкість футерування щонайменше удвічі порівняно зі стійкістю звичайних футеровок, виготовлених зі сталі 110Г13Л.

Розроблено конструкцію та виконано відновлювальне наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі квадратного поперечного перерізу розміром 200x200 мм, яка дала змогу отримати біметалеві армувальні елементи, з яких було

виготовлено футерувальні плити з розмірами, відповідними розмірам поверхонь ковша кар'єрного навантажувача «Caterpillar» ємністю 15 м<sup>3</sup>, що зношуються найбільше, та встановленими на ці поверхні за допомогою ручного дугового зварювання. Така технологія зміцнення дала змогу в міжремонтні терміни експлуатації ковша зберегти працездатність зносостійких листів, які застосовуються для захисту всієї його поверхні від абразивного зношування.

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

### Список публікацій здобувача

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 металевої ванни під час електрошлакового наплавлення в струмопідвідному 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., Біктагіров 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.

## ABSTRACT

***Netyaga A.V.* Strengthening of parts of machines and mechanisms of mining and metallurgical equipment by electroslag surfacing in a current-supply crystallizer.**

The thesis for the scientific degree of candidate of technical science on the specialty 05.03.06 “Welding and related processes and technologies” – E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 2023.

The thesis is devoted to the development of an effective technology for surfacing high chromium cast iron of improved quality, resistant to abrasive and impact abrasive wear, in a current-supply crystallizer based on studies of the peculiarities of its structure formation when using different types of surfacing materials.

By means of three-dimensional mathematical modelling of the electromagnetic characteristics of the current-supply crystallizer, the degree of electromagnetic influence of the currents induced in it on the liquid slag was estimated, which made it possible to propose an effective way to regulate its rotation. It was found that an increase in the angle of displacement of the current supply terminal of the current-carrying section of the crystallizer from its vertical technological section by an angle of up to 180° linearly reduces the electromagnetic effect on the rotating slag bath. At the same time, the electrical parameters of the surfacing and the integrated heat generation in the slag change little due to the possible movement of the current supply terminal. This makes it possible to influence both the penetration of the base metal and its uniformity, as well as the crystallization process of the metal being deposited.

The main modelling results were carried out on real surfacing in a circular cross-section crystallizer, which showed the compliance of the developed model with the actual surfacing process and confirmed the correctness of the technological conclusions of its use.

Metallographic methods of research have been used to establish the regularities of formation of the structure of high-chromium cast iron during its surfacing with electrodes and large-section billets, liquid and discrete (meal) additives.

The prospects of using surfacing in a SPC in comparison with ESR in a conventional crystallizer are shown. During ESR in HFC, a smaller amount of eutectic is formed in the HFC, and it is distributed almost uniformly over the entire cross-section of the deposited layer. The size of the eutectic colonies is 2...4 times smaller than that obtained during ESR in a conventional crystallizer. An increase of about 10% in the number of fan-shaped carbides is observed. Such structural changes contribute to an increase in the macrohardness of the cast iron deposited by ESC by about 3 HRC units.

Elimination of the rotational effect during ESR in SPC leads to coarsening of the structure of the deposited cast iron. The size of eutectic colonies becomes approximately 3 times larger than in the conventional version of using SPC. The macrohardness of the metal is correspondingly reduced by about 3 HRC units.

The use of a non-current billet made of high-chromium cast iron in the ESC in comparison with surfacing with electrodes leads to a 2.5...3.0-fold reduction in the amount of eutectic. There is a sharp difference in the distribution of fan-shaped carbides: from less than 10% at the edge of the layer to 39% in its middle. Lanceolate carbides are additionally formed in the structure: from 15% in the center of the layer to 30% near its edge. At the same time, the macrohardness of the deposited cast iron does not decrease significantly (by about 1 HRC unit).

The use of high-chromium cast iron shot as a surfacing material in ESPs in SPCs allows obtaining a fine-grained structure with a relatively uniform distribution of structural components. At the same time, this metal has an increased macrohardness of 52...54 HRC units.

High chromium cast iron deposited by liquid metal EDM has a dendritic structure parameter that is higher than that obtained by shot: 81% at the edge of the metal layer and 109% in its center. Accordingly, the macrohardness of cast iron is reduced by 20% at the edge of the metal layer and almost 90% in its center.

Based on the obtained research results, for surfacing high-chromium cast iron, we recommend technologies that are carried out during the rotation of the slag bath at a speed



of 30...50 rpm and using large-section electrodes and shot as surfacing materials, which ensure the production of cast iron with an optimal combination of strength and wear-resistant properties.

Using the example of high-speed steel P6M5, the paper shows the decisive influence of slag bath rotation on the fine-grained structure of the deposited high-carbon metal in comparison with the effect of inoculating discrete additives on its crystallization. Thus, the expediency of using current-carrying rather than conventional crystallizers for surfacing this type of material was confirmed.

Technological recommendations for equipment and modes of electroslag surfacing of high-chromium cast iron were developed.

A pilot production surfacing of the side linings of the jaw crusher SMD-111 was performed with the application of local reinforcing elements 15 mm thick and 150 mm in diameter on the steel base, which occupy 35...40% of the product's working surface and allow increasing the lining's resistance by at least two times compared to the resistance of conventional linings made of 110G13L steel.

Reduction surfacing in a current-carrying crystallizer of a 200x200 mm square cross-section made it possible to produce bimetallic reinforcing elements, which were used to make lining tiles with dimensions corresponding to the most worn surfaces of a 15 m<sup>3</sup> bucket of a "Caterpillar" mining loader, which were installed on these surfaces using manual arc welding. This strengthening technology made it possible to maintain the performance of the wear-resistant sheets used to protect the entire surface of the bucket from abrasive wear during the overhaul period.

**Keywords:** electroslag surfacing, current-carrying crystallizer, high-chromium cast iron, large-section electrodes, fines, mathematical modelling, slag bath rotation, microstructure of deposited cast iron.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДЕТАЛЕЙ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ, ВИБІР НАПЛАВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ І СПОСОБУ ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ .....	22
1.1 Умови експлуатації деталей машин і механізмів гірничо-металургійного комплексу та причини їхнього виходу з ладу .....	22
1.2 Аналіз способів відновлення деталей з різним ступенем зношування і вибір оптимальних наплавних матеріалів.....	26
1.2.1 Способи наплавлення з нанесенням шарів відносно невеликої товщини.....	26
1.2.2 Електрошлакове наплавлення як високопродуктивний спосіб нанесення зносостійкого металу великої товщини .....	35
1.2.3. Вибір оптимальних наплавних матеріалів.....	44
1.3 Сутність та особливості відновлення деталей ЕШН з використанням струмопідвідного кристалізатора .....	50
Висновки за розділом 1. Мета та завдання досліджень .....	54
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ЕШН У СПК .....	56
2.1. Постановка задачі для математичного моделювання електромагнітних процесів у СПК.....	57
2.2. Розробка математичної моделі електромагнітних процесів у СПК і визначення граничних умов її реалізації.....	61
2.3. Дослідження впливу положення верхнього струмовідводу на електромагнітні процеси у СПК.....	65
2.4. Дослідження впливу положення нижнього струмовідводу на електромагнітні процеси у СПК.....	71
Висновки за розділом 2.....	75
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ І ДОСЛІДЖЕНЬ, ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛИ .....	76
3.1. Види наплавних матеріалів, способи їхнього виготовлення і вибір робочого флюсу.....	76
3.2. Методика проведення експериментів, наплавкове обладнання і прилади, що застосовуються для їхнього виконання .....	79

3.3. Методики виготовлення шліфів і виконання металографічних досліджень наплавленого металу.....	84
Висновки за розділом 3.....	88
<b>РОЗДІЛ 4. ВПЛИВ ВИДУ НАПЛАВКОВОГО МАТЕРІАЛУ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАПЛАВЛЕННЯ НА ФОРМУВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ НАПЛАВЛЕНОВОГО МЕТАЛУ .....</b>	<b>89</b>
4.1. Мікроструктура наплавленого металу при різних технологічних способах наплавлення .....	90
4.1.1. Ливарним електродом із високохромистого чавуну у звичайному кристалізаторі (базовий варіант) .....	90
4.1.2. Ливарним електродом із високохромистого чавуну у СПК.....	91
4.1.3. Ливарним електродом з високохромистого чавуну у СПК з електрично замкненою струмопідвідною секцією .....	93
4.1.4. Ливарною безструмовою заготівкою з високохромистого чавуну у СПК .....	95
4.1.5. Дробом із високохромистого чавуну у СПК.....	96
4.1.6 Рідкою присадкою із високохромистого чавуну .....	98
4.2 Вплив обертання шлакової ванни на формування мікроструктури металу, наплавленого у СПК дискретною присадкою (порошок сталі 10P6M5).....	101
4.2.1 Вплив відсутності обертання шлакової ванни на формування структури металу, наплавленого порошком сталі 10P6M5 у СПК .....	102
4.2.2 Вплив обертання шлакової ванни на формування структури металу, наплавленого порошком 10P6M5 у СПК.....	103
4.3 Мікроструктура наплавленого металу при різних технологіях виготовлення зі сталі X12MF наплавочного електроду великого перерізу у звичайному кристалізаторі .....	106
4.3.1 Мікроструктура металу катаного електроду та наплавленого ним шару.....	107
4.3.2 Мікроструктура металу ливарного електроду та наплавленого ним шару .....	109
4.4 Ефективність способів покращення якості наплавленого зносостійкого металу	112
Висновки за розділом 4.....	117
<b>РОЗДІЛ 5. ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СТРУМОПІДВІДНОГО КРИСТАЛІЗАТОРА ЗНОШУВАНИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЇХНІХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИПРОБУВАНЬ.....</b>	<b>119</b>

5.1. Дослідження технологічних схем і особливостей ЕШН у СПК різного виконання .....	120
5.2. Отримання багат шарових біметалевих армуючих елементів при ЕШН у СПК .....	125
5.3. Наплавлення і результати експлуатаційних випробувань наплавлених бічних футеровок шокової дробарки СМД-111.....	130
5.4. Наплавлення і результати експлуатаційних випробувань ковша навантажувача «Caterpillar» ємністю 15 м <sup>3</sup> , зміцненого наплавленими біметалевими елементами.	136
Висновки за розділом 5.....	146
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	148
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	150
ДОДАТОК А.....	170
ДОДАТОК Б .....	171

## ВСТУП

**Актуальність теми.** За вагою і розмірами використовуваного обладнання гірничо-металургійний комплекс можна віднести до найбільш металомістких галузей промисловості. Збільшення одиничної потужності дробильно-подрібнюючого обладнання посилює 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 та його інтенсивне використання в жорстких умовах експлуатації призводить до високих втрат зношуваних металевих робочих органів і передчасної відмови обладнання. Найпоширенішим способом відновлення працездатності зношених поверхонь деталей робочих органів обладнання є дугове наплавлення. Але йому притаманна низка недоліків, зокрема низька продуктивність способів, складність або неможливість наплавлення товстих шарів (понад 5...10 мм) металу, що особливо важливо для деталей, які експлуатуються в умовах підвищеного абразивного зношування, локальний нагрів поверхні, що наплавляється, часто не дає змоги якісно, без тріщин, наплавляти високотверді (крихкі) матеріали, або необхідно передбачати додаткові заходи для зниження термічних напружень, що виникають під час наплавлення. Одним із способів продовження терміну його служби є електрошлакове наплавлення (ЕШН), при якому практично відсутні недоліки, властиві дуговому наплавленню. Однак і при цьому способі виникають складнощі забезпечення якісного наплавлення, здебільшого через труднощі досягнення однорідного теплового поля по всьому перерізу поверхні, що наплавляється.

Будь-яке спрощення технології ЕШН з точки зору незалежного регулювання її параметрів при напавленні, покращення якості напавленого металу, а також підвищена надійність використовуваного обладнання, – все це дозволяє ширше

впроваджувати технологію ЕШН при реставрації виробів, що вийшли з експлуатації, або за його допомогою запропонувати оптимальні рішення виробничого наплавлення.

Однією з перспективних технологій наплавлення можна вважати ЕШН у струмопідвідному кристалізаторі (СПК). В його основі лежить оригінальна конструкція пустотілого, водоохолоджувального, невитратного електрода, що забезпечує одночасне виконання декількох функцій: підтримання електрошлакового процесу із забезпеченням формування наплавленого металу і обертання шлакової й металеві ванн у горизонтальній площині. Оригінальність цього пристрою підтверджена 6-ма зарубіжними патентами і численними авторськими свідоцтвами Радянського Союзу і патентами України.

Незважаючи на великі потенційні можливості використання СПК, ця технологія не отримала широкого застосування. Тим не менш, надана інформація дала певний поштовх до використання такого підходу при здійсненні електрошлакового процесу. Наразі відомі лише три напрями робіт з використанням СПК:

- роботи, що виконуються під керівництвом Б.І. Медовара, і знайшли практичне застосування при ЕШН прокатних валків, виробництві біметалевих електродів печей постійного струму тощо;
- технології, запропоновані у Волгоградському НТУ Г.М. Соколовим зі співробітниками для зміцнення пресового інструменту малого діаметра;
- технології, розроблені фірмою «Інтеко» (Австрія), щодо електрошлакового переплавлення швидкорізальної сталі.

Створена у 1970 році Г.В. Ксендзиком, і доведена спільно з Ю.М. Кусковим до промислового застосування, технологія пройшла довгий шлях у своєму розвитку і розумінні її можливостей. Основний досвід її використання було отримано при відновленні валків прокатних станів на металургійних підприємствах України. Однак деталі робочих органів гірничо-металургійного устаткування часто експлуатуються в складніших і жорсткіших умовах, зокрема під одночасним впливом

високоабразивного середовища та різного виду стаціонарних й ударних навантажень. Тому до металу, що наплавляється, для підвищення їхньої довговічності, висуваються підвищені вимоги, які можна забезпечити за рахунок регулювання його структури. 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 державної науково-технічної програми: «Дослідження впливу мікролегування та модифікування на формування структури високолегованого наплавленого металу, стійкого проти зношувань та циклічних термосилових навантажень» (2021-2023 рр.), № 0121U108387. Робота виконувалась в НТК «ІЕЗ ім. Є.О. Патона» НАН України в межах договору № 561 від 09.09.2020 р. між Інститутом 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 щокислової дробарки (код ДКПП ДК 016:2010 72.19)». Робота виконувалась в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України в межах договору № 656 від 03.01.2021 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.

**Завдання дослідження:**

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 під час використання 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 й 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 Х12МФ 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  $15 \text{ м}^3$  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. Запропонував оригінальну методику моделювання електромагнітних процесів у СПК. Усі основні результати дисертаційної роботи викладені автором у 12 наукових публікаціях особисто чи у співавторстві.

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

**Структура та 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.

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 мають високу стійкість до абразивного зношування. Як один з таких матеріалів обрано високохромистий чавун. Відзначено, що більші можливості притаманні електрошлаковому наплавленню в струмопідвідному кристалізаторі. Показано принцип дії струмопідвідного кристалізатора і особливості ЕШН з його використанням.

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

У третьому розділі визначено види наплавних матеріалів, що використовуються в експериментах, а також їхній хімічний склад, що представляє різні класи високовуглецевих легкосправних матеріалів: високохромисті чавуни, швидкорізальні і штампові сталі. Показано способи їхнього виготовлення. Представлені методики і відповідне обладнання та прилади для виконання як експериментальних, так і металографічних досліджень наплавленого металу.

Четвертий розділ присвячений можливостям регулювання експлуатаційних характеристик наплавленого металу шляхом оцінки його мікроструктур, отриманих різними технологічними способами наплавлення. Показано переваги ЕШН у СПК електродом великого перерізу з високохромистого чавуну у порівнянні з ЕШН у звичайному кристалізаторі. 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. Оцінено можливість застосування при ЕШН

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

У п'ятому розділі представлені результати практичного використання двох наплавних технологій – виготовлювальної і відновлювальної. Перша застосована при наплавленні бічних футеровок щокислої дробарки СМД-111, друга – при відновленні зношених зон передньої стінки ковша кар'єрного навантажувача «Caterpillar» ємністю 15 м<sup>3</sup>. У порівнянні зі звичайними кристалізаторами, конструкція СПК більш складна, і крім цього, через його струмопровідну стінку протікає весь, або більша його частина (при наплавленні електродом). Тому для виконання цих робіт попередньо були проведені дослідження з вибору оптимального способу виготовлення СПК і технологічної схеми наплавлення. Для підвищення можливості наплавлення великих площ і отримання наплавлених шарів з іншими формами в порівнянні з циліндричними поверхнями розроблено та виготовлено СПК квадратного перерізу. Наведено результати промислових випробувань обох наплавлених виробів.

# РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДЕТАЛЕЙ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ, ВИБІР НАПЛАВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ І СПОСОБУ ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ

## 1.1 Умови експлуатації деталей машин і механізмів гірничо-металургійного комплексу та причини їхнього виходу з ладу

Більшість робочих деталей машин і механізмів гірничо-металургійного комплексу експлуатуються в умовах абразивного та ударно-абразивного зношування, а в деяких випадках і складного термонапруженого стану. Такі умови експлуатації призводять до підвищеного зношування робочих поверхонь відповідальних деталей і технологічного інструменту та прискореного виходу їх з ладу. При цьому собівартість продукції, що випускається, істотно зростає не тільки за рахунок заміни масивних дорогих зношених деталей на нові, але й за рахунок зростання вимушених простоїв.

Нижче наведено перелік деяких деталей, що найчастіше виходять з ладу, і технологічного інструменту металургійного й гірничого обладнання та причини зменшення їхньої довговічності.

### Металургійне обладнання.

#### Обладнання агломераційних фабрик, шихтопідготовчих і копрових цехів:

- молотки, футерувальні плити, колосники молоткових дробарок – абразивне зношування зі значними ударними навантаженнями;
- бандажі і футерувальні плити чотиривалкових дробарок з гладкими бочками – абразивне зношування з великими питомими тисками (до 50 МПа);
- футерувальні плити рухомого і нерухомого конусів, приймальна лійка конусної дробарки – абразивне зношування з ударними навантаженнями і великими питомими тисками (до 50 МПа);
- броньові плити пластинчастих і тарілчастих живильників – абразивне і окислювальне зношування ( $t = 600-800^{\circ} \text{C}$ ).

**Обладнання доменних цехів:**

- футерувальні елементи лотків безконусних і завантажувальних приладів – абразивне і ударно-абразивне зношування;
- великий конус і чаша доменної печі, малий конус й воронка розподільника шихти – абразивне зношування робочої поверхні і газоабразивне зношування контактного поясу;
- броньові листи скіпів – абразивне зношування з ударними навантаженнями.

**Обладнання сталеплавильних цехів:**

- ролики машин безперервного лиття заготовок – абразивне і окислювальне зношування, термовтома, корозія;

**Обладнання обтискних цехів:**

- валки блюмінгів і слябінгів – окислювальне, теплове і абразивне зношування, термовтома (періодична дія високих температур і тисків).

**Обладнання цехів гарячого прокатування:**

- валки гарячого прокатування тонко- і товстолистових або штрипсових станів – окислювальне, теплове і абразивне зношування, термовтома;
- опорні валки товстолистових станів – зношування через тертя металу по металу, періодичний вплив високих тисків;
- валки гарячого прокатування сортових станів – окислювальне, теплове і абразивне зношування, термовтома;
- ролики правильних машин – зношування через тертя металу по металу, високі тиски, термовтома;
- ножі гарячого різання – теплове зношування, високі тиски і температури.

**Обладнання цехів холодного прокатування:**

- робочі валки холодного прокатування – зношування через тертя металу по металу, високий тиск, контактна і загальна втома;
- ролики правильних машин – зношування через тертя металу по металу, високі тиски, контактна і загальна втома;

- ножі холодного різання – зношування, зминання.

### **Обладнання грубопрокатних цехів:**

- валки пільгер-станів – окислювальне, теплове і абразивне зношування, періодичний вплив високих температур і тисків, ударні навантаження;

- валки станів безперервного прокатування труб – окислювальне, теплове і абразивне зношування, термовтома;

- ролики рольгангів – зношування через тертя металу по металу, окислювальне, теплове і абразивне зношування, термовтома.

### **Гірське переробне обладнання і гірничо-дорожньо-будівельна техніка:**

- біла роторних дробарок – ударно-абразивне зношування;

- футеровки кульових млинів – ударно-абразивне зношування;

- бандажі валкових дробарок – ударно-абразивне зношування;

- плити щоккових дробарок – ударно-абразивне зношування;

- зуби ковшів кар'єрних екскаваторів – ударно-абразивне зношування;

- козирки черпаючого апарату (черпаки) драг – ударно-абразивне зношування;

- ножі бульдозерів, скреперів, автогрейдерів – ударно-абразивне зношування.

Конкретні приклади терміну служби дробильного обладнання представлені у роботах [1-3]. У загальному технологічному комплексі збагачення руд механічне дроблення і подрібнення є найбільш трудомістким і дорогим процесом. Експлуатаційні витрати на дроблення і подрібнення досягають 50...70% від загальних витрат на переробку руди на гірничо-збагачувальних комбінатах (ГЗК). У разі використання для дроблення руди конусних дробарок через її високу міцність і низьку відносну стійкість броні дробарок витрата останньої на низці ГЗК становила 16 тис. т/рік. Аналіз терміну служби елементів футеровок дробарок залежно від стадії дроблення показує, що найнижчий термін служби в порівнянні з іншими елементами футеровок мають: у I стадії дроблення – броня подрібнювального конуса, та 1 і 2 пояси середньої частини корпусу дробарки (1...3 місяці); у II стадії дроблення – нижня броня подрібнювального конуса і броня нижнього поясу середньої частини



корпусу (1,5...6 місяців); в III і IV стадіях – нижня броня подрібнювального конуса і нерухома броня подрібнювального конуса і нерухома броня регулюючого кільця (1,3...1,7 місяців) [1].

Потреба у бронефутерувальних плитах доменного, агломераційного і коксохімічного виробництв може складати десятки тисяч штук лише в межах одного металургійного комбінату. Основною причиною є зношування в процесі стирання при зіткненні з абразивним матеріалом. У деяких випадках відбувається руйнування тіла вилівка, що пов'язано з високими ударними навантаженнями і її низькими механічними властивостями (табл. 1.1) [2].

Таблиця 1.1

**Термін служби і причини виходу з ладу деяких виливків зі сталі 110Г13Л металургійного і гірничо-збагачувального виробництва**

Агрегат	Відливка	Маса відливок, кг	Термін експлуатації, доба	Причина виходу з ладу
Щоковий подрібнювач	Броня середня нижньої щоки	1145	6...8	Стирання, злам
	Броня крайня нижньої щоки	690	6...8	Стирання
Шаровий млин	Футеровка	250	12	Стирання
Конусний подрібнювач	Броня конуса	890	12	
	Броня нерухома	900	12	
Скрубер	Полоса	43	10	Стирання, злам
	Облицювання	130	10	

В Україні в окремих районах видобутку та переробки руд зустрічаються руди підвищеної міцності (твердості), що призводить до інтенсивного зношування робочих органів обладнання. Зокрема у разі переробки абразивних залозистих кварцитів Інгулецького ГЗК швидкість зношування броні дробарок КМДТ-2000 змінюється від 0,15 до 0,20 мм/год [3].

## 1.2 Аналіз способів відновлення деталей з різним ступенем зношування і вибір оптимальних наплавних матеріалів

### 1.2.1 Способи наплавлення з нанесенням шарів відносно невеликої товщини

Найпоширенішими способами відновлення деталей машин і механізмів гірничо-металургійного комплексу є напівавтоматичне та автоматичне дугове наплавлення самозахисними порошковими дротами і стрічками або під шаром флюсу. [4-13] У якості наплавкових матеріалів переважно використовуються багатокomпонентні леговані сталі. Відповідно до класифікації Міжнародного інституту зварювання стосовно наплавлення деталей такого призначення можна віднести тип напавленого металу шести груп (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

#### Класифікація, хімічний склад і твердість напавленого металу на основі заліза

Тип напавленого металу	Масова частка елементів, %									Твердість, HRC
	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	V	Mo	Інші	
Хромовольфрамкові, хромомолібденові теплостійкі сталі	0,2–0,5	≤2,0	≤1,0	1,0–5,0	≤5,0	1,0–10,0	0,2–1,5	≤4,0	–	52–60
Вольфрамкові, вольфромомолібленові швидкорізальні сталі	0,6–1,5	≤0,5	≤0,4	4,0–6,0	–	1,5–18,0	≤3,0	≤10	Co≤15	52–60
Низьковуглецеві хромисті сталі	≤0,2	≤0,8	≤2,0	12–30	≤5,0	–	–	≤2,0	–	35–50
Хромисті сталі з підвищеним вмістом вуглецю	0,2–2,0	0,3–1,5	≤3,0	5,0–18,0	≤5,0	≤1,5	–	≤2,0	–	50–60
Високомарганцеві аустенітні сталі	0,5–1,2	11–18	≤4,0	≤5,0	≤4,0	–	–	≤1,0	–	25–35
Високохромисті спеціальні чавуни	2,0–5,0	0,5–8,0	≤5,0	18–35	≤4,0	≤5,0	≤1,0	≤8,0	Nb≤8,0; Ti≤4,0; B≤3,0; Co≤5,0	55–65

Хромовольфрамкові, хромомолібденові теплостійкі сталі використовують для наплавлення валків гарячого прокатування, ножів гарячого різання, пресового і штампового інструменту й інших деталей, що працюють у контакті з гарячим

металом. Вольфрамові, вольфрамомолібденові швидкорізальні сталі є найперспективнішим матеріалом для наплавлення прокатних валків. Низьковуглецеві хромисті нержавіючі сталі рекомендують для відновлення і зміцнення роликів машин безперервного лиття заготовок й інших деталей, що працюють при терті металу по металу. Хромисті сталі з підвищеним вмістом вуглецю, леговані вольфрамом, ванадієм, молібденом й іншими елементами мають високу стійкість до абразивного зношування. Високомарганцеві аустенітні сталі рекомендують для наплавлення деталей, що зазнають абразивного зношування у поєднанні з сильними ударами, і застосовують для відновлення деталей дробильно-розмельного обладнання. Для наплавлення деталей, що працюють в умовах абразивного, гідроабразивного і газоабразивного зношування й зазнають ударів різної інтенсивності, рекомендують матеріали типу високохромистих чавунів.

Деякі наплавні порошкові дроти та стрічки, розроблені в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [14], представлені в табл. 1.3 і 1.4.

Таблиця 1.3

### Хімічний склад і назва порошкової стрічки

Марка	Масова частка елементів в наплавленому металі, %						Твердість, HRC	Типові об'єкти наплавлення
	C	Mn	Si	Cr	Ti	Інше		
ПЛ-НП-300X25C3H2Г2 (ПЛ-АН101)	3,0	2,0	3,0	25,0	–	2,0 Ni	50–56	Била, зуби ковшів екскаваторів
ПЛ-НП-400X38ГЗРСТЮ	3,0	3,0	1,0	38,0	0,3	0,2 Al; 0,9 B	50–54	
ПЛ-НП-120X22P3ГC (ПЛ-АН171)	1,2	2,0	1,0	22,0	1,0	3,0 B	54–60	
ПЛ-НП-450X20Б7М6В2Ф (ПЛ-АН179)	4,5	–	2,0	20,0	–	2,0 W; 7,0 Nb; 6,0 Mo	58–64	
ПЛ-НП-500X40H40C2PГЦ (ПЛ-АН111)	5,0	1,0	2,0	40,0	–	40,0 Ni; 0,2 B	50–60	Конуси і чаша доменних печей
ПЛ-НП-550X44H34ГCР	5,5	0,8	0,8	44,0	–	34,0 Ni; 0,2 B	54–62	

Таблиця 1.4

## Марки порошкових дротів і галузі їхнього застосування

Марка	Твердість	Галузь застосування
ПП-АН194	250–320 НВ	Наплавлення відкритою дугою і під флюсом деталей, що працюють в умовах тертя кочення і ковзання металу по металу.
ПП- Нп -ТЗГМ	160–220 НВ	Наплавлення без підігріву підшару на деталі з високовуглецевих сталей.
ПП- Нп -200Х12ВФ (ПП-АН104)	40–44	Наплавлення під флюсом ножів холодного різання металу, робочих елементів змішувачів, роликів рольгангів, гальмівних шківів.
ПП- Нп -25Х5МСГФ	42–53	Наплавлення під флюсом валків чистових клітей сорто- і трубопрокатних станів.
ПП- Нп -35В9Х3ГСФ	43–54	Наплавлення під флюсом сталевих валків для гарячого прокатування, ножів гарячого різання, гальмівних шківів, роликів намотувачів тощо.
П ПП-АН132	48–52	Наплавлення під флюсом сталевих валків для гарячого прокатування, пресового і штампувального інструменту тощо.
ПП-АН147	44–54	Наплавлення під флюсом сталевих валків чистових клітей сорто- і трубопрокатних станів, валкової арматури тощо.
ПП-АН130	46–52	Наплавлення відкритою дугою ножів гарячого різання металу, пресового і штампувального інструменту тощо.
ПП-АН140	57–60	Наплавлення відкритою дугою відрізних і вирубних штампів холодного штампування.
ПП-АН159	38–42	Наплавлення під флюсом роликів машин безперервного розливу сталі (переважно горизонтальних ділянок).
ПП-АН174	38–44	Наплавлення під флюсом роликів машин безперервного розливу сталі (переважно радіусних ділянок).
ПП-АН105	160–240 НВ	Наплавлення відкритою дугою залізничних хрестовин, деталей дробильно-розмельного обладнання, виправлення дефектів лиття зі сталі Г13Л.
ПП-АН125	50–56	Наплавлення відкритою дугою зубів, козирків і стінок ковшів екскаваторів, ножів грейдерів і бульдозерів, колосників гуркотів.
ПП – АН135	50–58	Наплавлення відкритою дугою навісного інструменту бульдозерів, ковшів скельних екскаваторів, клапанів доменних печей.
ПП – АН170	58–67	Наплавлення відкритою дугою інструментів збагачувальних і гірничообробних машин.

У більшості випадків механізоване дугове наплавлення дозволяє підвищити довговічність відновлюваних деталей в середньому в 1,5...3,0 рази.

На одному з металургійних комбінатів відновлення і зміцнення наплавленням прокатних валків обтискних і сортопрокатних станів за допомогою дроту ПП-АН 132 дозволило підвищити їхню зносостійкість у 1,5...2 рази в порівнянні з новими валками, виготовленими зі сталі 50, 60ХН, 50ХН і ін. [15]. Запропоноване ТОВ «ТМ Велтек» наплавлення валків прокатного стану НЗС-730 цеху «Блюмінг 1» КДМК «Криворіжсталь» дротом Велтек Н505 (система легування Fe-C-Si-Mn-W-Cr-Mo-Ni-V) замість широко застосовуваного дроту ПП-Нп35В9ХЗСФ дозволила приблизно на 30% підвищити зносостійкість робочої поверхні бочки валка та в 2...4 рази зменшити утворення і розвиток тріщин розпалу по глибині їхнього проникнення, що суттєво знизило глибину проточування при ремонті валків [16]. Ця ж фірма має позитивний досвід наплавлення роликів машин безперервного лиття заготовок [16, 17]. Порівняльні випробування порошкових дротів Велтек-Н470 (з флюсами АН-20 і АН-26) і Велтек Н470С (самозахисний) показали, що вони знаходяться на рівні дротів провідних зарубіжних компаній ОК15.73 (ESAB), 4142 MM-SLC, 414 MM-S (Weldclad), WLDC-3N (Welding Alloys). Наплавлені ролики мають ресурс щонайменше 1,5 млн т.

Тридцятирічний досвід наплавлення засипних апаратів підтвердив доцільність наплавлення засипних апаратів порошковою стрічкою ПЛ-АН111, яка у поєднанні з композиційним наплавленням дозволяє досягти середньої стійкості цих деталей 14...16 місяців [18]. Також запропоновано порошкову стрічку для підвищення довговічності великого і малого конусів доменної печі, наплавлений метал якої (2,47% С; 1,99% SiO<sub>2</sub>; 0,77% Mn; 20,25% Cr; 4,82% Ni; 0,023% S; 0,028% P) при лабораторних випробуваннях показав зносостійкість на 70% вище, ніж метал, наплавлений стрічкою ПЛ-АН111, і на 39% вище, ніж метал, наплавлений стрічкою ПЛ-АН101 [19].

Слід зазначити, що дугове наплавлення високохромистих чавунів на деталі засипних апаратів практично завжди супроводжується появою в наплавленому металі тріщин. У роботі [20] визнається, що немає єдиної думки про допустимість тріщин у металі, наплавленому на проміжний і контактний пояси. Проте вважається, що

тріщини слугують осередками зношування. Щоправда, проведені дослідження показали, що інтенсивність газоабразивного зношування високохромистого чавуну залежить від розкриття тріщини і її орієнтації по відношенню до газового потоку.

Однією з найбільш зношуваних деталей гірничої техніки є зуби ковшів екскаваторів. За даними [21], щорічна витрата, наприклад, зубів ковша на один гірничий екскаватор типу ЕКГ-81 досягає 300...500 штук або 60...70 т лиття. При цьому для виробництва основних гірничих порід використовується лише 10...12% металу зубів (зношувана частина), а решта 88...90% – на металобрухт. Роторні екскаватори типу ЕРГ-1600/3000 використовуються на породах з коефіцієнтом міцності до 8, а окремих випадках до 13 за шкалою Протодьяконова (табл. 1.5) [22]. Термін служби зубів ковшів екскаваторів, що розробляють міцні породи, становить лише 2...3 доби [23]. Характер зношування клинових зубів екскаватора Е-652, залежно від категорії розроблюваних ґрунтів виглядає таким чином [24]: на ґрунтах II і III категорій повне зношування зубів (90...100 мм) відбувається через 450...500 год, а на ґрунтах III і IV та VI категорій (з урахуванням поломки зубів) – через 660...730 і 130...150 год відповідно.

Зуби ковшів екскаватора Э-652 запропоновано наплавляти порошковою стрічкою ПЛ-У30Х30ГЗТЮ під шаром флюсу АН-60 при товщині наплавлюваного шару 3 мм і ширині 45 мм [24]. Довговічність таких зубів на всіх категоріях ґрунтів у 2,0...2,5 рази вища, ніж довговічність зуба зі сталі 110Г13Л, і у 2,8...3,2 рази вища термічно зміцненої сталі 45. Термін служби наплавлених зубів становить у середньому 1100...1300 год на ґрунтах II і III категорій та 500...550 год на ґрунтах IV і VI категорій.

Розроблено технологію і устаткування для наплавлення зубів ковшів екскаваторів двома порошковими стрічками ПЛ-АН101 [9]. Технологія передбачає виконувати наплавлення у декілька шарів, товщина кожного не перевищує 4...6 мм. Перед нанесенням чергового шару витримується пауза 1...2 хв. Експлуатаційні

випробування таких наплавлених зубів показали у 2...3 рази кращу працездатність порівняно із зубами, наплавленими електродами Т-590.

Таблиця 1.5

### Коефіцієнт міцності $f$ за шкалою М.М. Протодьяконова

Категорія	Ступінь міцності	Порода	$f$
I	Надзвичайно міцні породи	Найбільш міцні, щільні і в'язкі кварцити і базальти. Виняткові за міцністю інші породи	20
II	Дуже міцні породи	Дуже міцні гранітні породи. Кварцовий порфір, дуже міцний граніт, крем'янистий сланець, менш міцні, ніж зазначені вище, кварцити. Найміцніші пісковики і вапняки	15
III	Міцні породи	Граніт (щільний) і гранітні породи. Дуже міцні пісковики і вапняки. Кварцові рудні жили. Міцний конгломерат. Дуже міцний залізняк	10
IIIa	Те ж саме	Вапняки (міцні). Неміцний граніт. Міцні пісковики. Міцний мармур, доломіт, колчедани. Звичайний пісковик	8
IV	Досить міцні породи	Залізняк. Піскуваті сланці	6
IV	Те ж саме	Сланцеві пісковики	5
V	Середні породи	Міцний глинистий сланець. Неміцний глинистий сланець і вапняк, м'який конгломерат	4
		Різноманітні сланці (неміцні). Щільний мергель	3
VI	Досить м'які породи	М'який сланець, м'який вапняк, крейда, кам'яна сіль, гіпс. Мерзлий ґрунт, антрацит. Звичайний мергель. Зруйнований пісковик, зцементована галька і хрящ, кам'янистий ґрунт	2
VIa	Те саме	Міцне кам'яне вугілля	1,5
VII	М'які породи	Глина (щільна). М'яке кам'яне вугілля, міцний нанос - глинистий ґрунт	1

Зміцнення зубів ковшів роторних екскаваторів досягається також за рахунок їхнього наплавлення порошковими дротами ПП-У20Х12М, ПП-У25Х17Т тощо. [25].

Аналогічними швидкозношуваними деталями гірничої техніки є козирки черпаків драг, ріжуча кромка яких працює в умовах інтенсивного абразивного зношування за наявності ударних і високих питомих статичних навантажень. Втрати металу при зношуванні одного черпака ємністю 400 л досягають 100 кг, а корпус, що залишився, масою близько 2000 кг направляється на металобрухт [26]. Відоме напівавтоматичне наплавлення черпаків драг порошковими дротами ПП-У30Х14МСФ-0, ПП-АН170, ПП-Г13М3-0. За результатами спостережень [27],

найбільшу зносостійкість має метал, наплавлений порошковим дротом ПП-АН170 при товщині двох наплавлених шарів 10...12 мм. Встановлено, що після відпрацювання 157 тис. м гірничої маси різниця по висоті кращих варіантів наплавлення та серійних козирків досягає 25...30 мм.

У переробних галузях гірничо-металургійного комплексу для помелу гірничої сировини (руда, вапняк, спік глинозему, граніт, кам'яне вугілля) застосовуються стрижневі, кульові млини, конусні, щоківні і молоткові дробарки. Останні завдяки малим розмірам і великій продуктивності дуже зручні в експлуатації. Їхнім робочим інструментом є молотки (била), стійкість яких в умовах ударних навантажень не перевищує 15...45 діб [28]. Використання для наплавлення молотків порошкового самозахисного дроту, що забезпечує отримання наплавленого металу 300X24H2C2ГТ4, дозволило підвищити зносостійкість молотків у 1,8...2,0 рази в порівнянні з наплавленням електродами Т-590 [29]. У більшості випадків передбачається наплавлення молотків (бил) з переробки вугілля для електростанцій і коксохімічних заводів. У зв'язку з інтенсифікацією процесу вуглеприготування для теплових електростанцій і переходом на видобуте відкритим способом дешеве вугілля, що містить до 30...40% золи, термін служби бил значно зменшується [30]. З іншого боку, ступінь подрібнення окремих вуглин і вугільної шихти істотно впливає на процеси спікання і коксоутворення [31].

Основним технологічним способом виготовлювального наплавлення було дугове наплавлення самозахисними порошковими стрічками [28, 30, 32-34].

Проблемою стійкості деталей стрижневих і кульових млинів є стійкість торцевих стінок [35] і бронефутерувальних плит [36, 37]. Стінки наплавляють самозахисним порошковим дротом, що забезпечує отримання наплавленого шару 79X4M4Г2ФТР (55 одиниць HRC), а плити – дротом ПП-АН125, що дозволяє зменшити їхнє зношування в 1,5 рази в порівнянні з плитами, виготовленими зі сталі 110Г13Л.



Крім широко поширених способів наплавлення порошковими дротами і стрічками при відновленні (виготовленні) деталей гірничо-металургійного комплексу використовують інші технології зміцнення. Плазмове наплавлення чавунним порошком пропонується застосовувати для відновлення чавунних валків стану 300 [38]. При цьому структура наплавленого білого чавуну отримана при температурі попереднього підігріву 400 °С. При нанесенні двох шарів жорсткість робочої поверхні досягає 50...52 одиниць HRC. На одному металургійному комбінаті пройшла випробування технологія плазмового наплавлення валків стану 350 з використанням у якості присадного матеріалу порошку ПР-30Х4В2М2ФС [39].

Встановлено, що для плазмового наплавлення зубів засипного лотка доменної печі доцільно використовувати порошок на основі заліза ПР-65Х25Г13Н3, а для зміцнення футерувальних плит, розташованих у носовій частині лотка, використовувати порошок 10Р6М5 [40]. Для зняття внутрішньої напруги і покращення експлуатаційних характеристик наплавленого металу після наплавлення футерувальних плит необхідно виконувати відпускання при температурі 560 °С.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона була доведена можливість наплавлення бил вугледробильних млинів повітряною стиснутою дугою [41]. За допомогою розробленого способу виконано наплавлення партії бил для шахтного млина ШМТ-1500/1680 Південноуральської ГРЕС. Присадкою слугували пластини зі сплаву типу У30Х28Г8Н3С3. Дослідні била пропрацювали 147 год, що у 4...6 разів більше у порівнянні з ненаплавленими билами зі сталі 35Л, і знаходилися ще у робочому стані.

У 70-80 роки минулого століття в Польській народній республіці плазмове наплавлення застосовувалося для зміцнення багатьох деталей гірничодобувних машин, що зазнавали інтенсивного стирання, а також ерозії і корозійного впливу води в шахтах [42]. Однією з таких деталей є корпус зубка гірничого комбайна «Alpine». Вставка (різець) зі спечених карбідів кріпиться до корпусу шляхом паяння. Довговічність різця визначається не природним зношуванням, а випадінням вставки з корпусу через стирання конічної частини, в якій закріплена вставка. Нанесення шару

завтовшки близько 1 мм на конічну поверхню корпусу значно покращує працездатність виробу.

Не часто, але все ж таки застосовуються технології електронно-променевого і аргонодугового наплавлення [43]. Показано, що покриття, виконані електронно-променевим наплавленням, мають зносостійкість на 20% вище в порівнянні з показниками, отриманими за допомогою аргонодугового наплавлення при зміцненні зубів барабанної дробарки для подрібнення вугільного палива. Незалежно від способу нанесення композиційного покриття (Fe–20% Mn–4% V–4% Mo)+15% WC – наплавлення робочих органів дробарки дозволяє збільшити їхню зносостійкість більш ніж у 4 рази в порівнянні з наплавленням електродами Т-590.

Ручне дугове наплавлення зазвичай представлене електродами Т-590 і Т-620 [44]. Однак супутні ударні навантаження навіть незначної інтенсивності суттєво знижують ефективність їхнього використання внаслідок викришування робочого шару. Крім того, наплавлення цими електродами більш ніж у два шари також пов'язане з викришуванням робочого шару практично без впливу робочого навантаження. Тому для зносостійкого наплавлення деталей, що піддаються абразивному і ударно-абразивному зношуванню (бурові шнеки, робочі органи бульдозерів, козирки черпаків драг тощо) рекомендують використовувати електроди ВСН-6, ВСН-8, ВСН-9, ЦН-16 (150Х8Т2РО,2) [45-48].

До технологій зміцнення деталей обладнання гірничо-металургійного комплексу, що не часто застосовуються, відноситься й індукційне наплавлення. Термін служби ковша породонавантажувальної машини значною мірою визначається зносостійкістю його зубів. Їх виготовляють зі сталі 30Г, і після приварювання до днища зміцнюють дуговим наплавленням електродами Т-590. Замість цієї технології запропоновано технологічний процес індукційного наплавлення зносостійким безвольфрамовим композиційним сплавом із наступною заміною зубів ковша. Товщина наплавленого шару 3...3,5 мм. Промислова експлуатація ковшів,

наплавлених за цією технологією, показала збільшення терміну їхньої служби у 2 рази [49].

Як видно з представленого огляду застосовуваних для відновлення деталей обладнання металургії та гірничодобувної техніки способів наплавлення, всі вони дозволяють якісно (без тріщин) наплавляти відносно невеликі шари металу. Це підтверджують інші джерела інформації промислового використання даних технологій наплавлення [50-54], згідно з якими товщина наплавлюваних шарів зазвичай становить 3...6 мм і не перевищує 10...12 мм. У випадках, коли необхідно наплавляти великі товщини металу, складно виключити появу мікротріщин [55,56].

### **1.2.2 Електрошлакове наплавлення як високопродуктивний спосіб нанесення зносостійкого металу великої товщини**

Основні прийоми електрошлакового наплавлення (ЕШН) були розроблені в ІЕЗ ім. Є.О. Патона ще у 50-ті роки минулого століття [57]. Перші дослід з ЕШН виконані І.К. Походней при виготовленні кернів кліщових кранів [58] – рис. 1.1.

При цьому у якості наплавочних матеріалів використовувалися не традиційні наплавочні матеріали (дроти, стрічки), а прокатаний пруток діаметром 20 мм зі штампової сталі 3Х2В8. Ця технологія дозволила відмовитися від ручного дугового наплавлення сплавом типу сормайт з підвищенням стійкості напавленого шару, що використовувалося раніше.

Подальший розвиток електрошлакових технологій наплавлення здебільшого супроводжувалося використанням при напавленні електродів великого перерізу. Це пов'язано з тим, що було встановлено, що електрошлаковий процес стійкий при щільності струму  $0,2...300 \text{ А/мм}^2$  і з однаковим успіхом можливий як при напавленні дротяними електродами діаметром 1,6 мм, так і електродами великого перерізу [58].

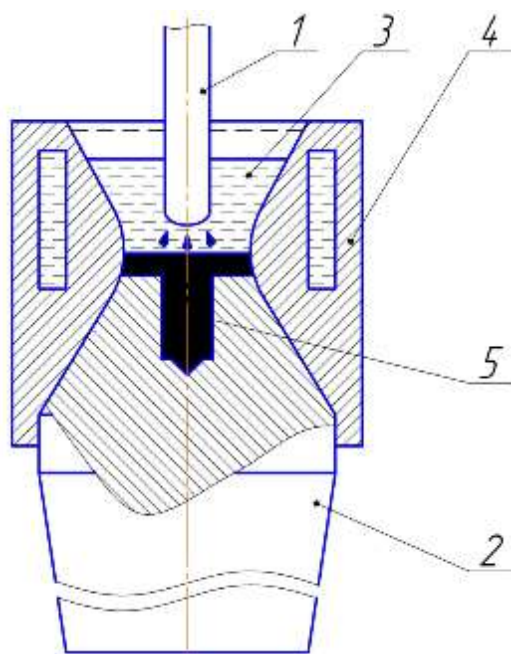


Рис. 1.1 Схема процесу наплавлення кернів кліщових кранів; 1 – електрод;  
2 – заготовка керна; 3 – шлакова ванна; 4 – водоохолодний кристалізатор;  
5 – наплавлений шар

Подальший розвиток електрошлакових технологій наплавлення здебільшого супроводжувався використанням при напавленні електродів великого перерізу. Це пов'язано з тим, що було встановлено, що електрошлаковий процес стійкий при щільності струму  $0,2 \dots 300 \text{ A/mm}^2$  і з однаковим успіхом можливий як при напавленні дрітряними електродами діаметром 1,6 мм, так і електродами великого перерізу [58].

Найбільш поширеними деталями обладнання гірничо-металургійного комплексу, що піддаються ЕШН, є біла дробарок і зуби ковшів екскаваторів. Стосовно них зазвичай виконують об'ємне напавлення, тобто таке, що супроводжується нанесенням металу масою в десятки кг.

Існує декілька технологічних способів ЕШН бил: з використанням витратних і невитратних електродів великого перерізу, дрітрянних і дискретних напавочних матеріалів, при вертикальному і горизонтальному розташуванні напавлюваних

поверхонь. ЕШН електродом великого перерізу використовується для відновлення бил молоткових дробарок, які виготовляються зі сталі 110Г13Л.

У процесі експлуатації зношення бил досягає 60...70 мм, а їхня маса зменшується на 13...15 кг [59]. Била при наплавленні можуть розташовуватися як вертикально [60], так і горизонтально [61]. Схема наплавлення бил при вертикальному розташуванні наплавлюваної поверхні представлена на рис. 1.2.

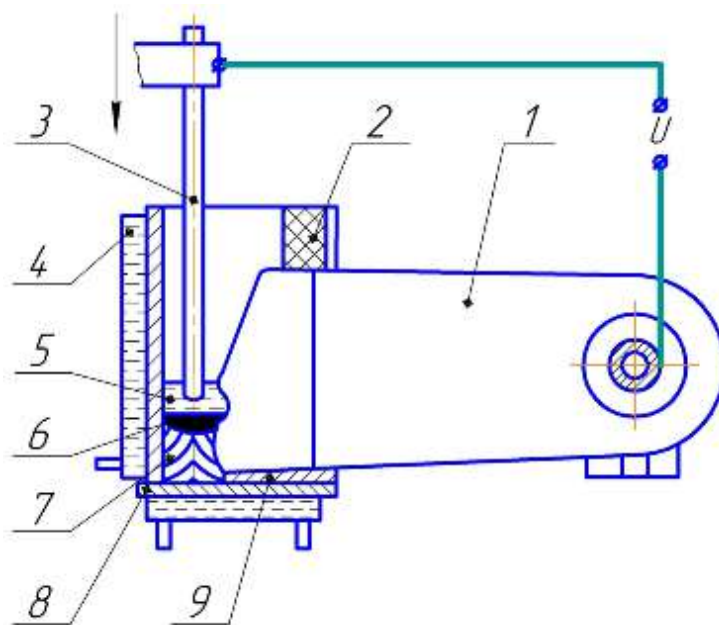


Рис. 1.2 ЕШН молотка подрібнювача: 1 – наплавляюча заготівка; 2 – графітова вивідна планка; 3 - електрод; 4 – кристалізатор; 5 – шлакова ванна; 6 – металева ванна; 7 – наплавлений метал; 8 - піддон; 9 – вхідна мідна планка.

Електрошлакова технологія відновлення бил молоткових дробарок на спеціалізованому устаткуванні та з використанням дротяного електрода дозволяє отримати наплавлений метал, що містить 1,9% вуглецю і 12% хрому. Час наплавлення одного била становить 1 год [62]. Для отримання композитного наплавленого металу робочої частини била електродний дріт і присадковий порошок подають окремими каналами плавкого мундштука [63]. Маса порошку присадки досягає 25% від маси наплавленого металу. При виготовлювальному наплавленні на хвостовик била зі сталі

звичайної якості наплавляють шар, переплавляючи два нелеговані сталеві електродні дроти, а на завершальному етапі при формуванні робочої поверхні біла в шлакову ванну починають додавати порошок високолегованого зносостійкого сплаву [64]. Продуктивність процесу досягає 20 кг/год. Техніка наплавлення з використанням неплавкого електрода реалізована при відновленні зношених бил дробарок СМ-170Б зі сталі 110Г13Л [65]. При цьому наплавлення роблять порошком сплаву сормайт графітовим неплавким електродом перерізом 20x100 мм з використанням флюсу АНФ-6. Витрата порошку становить 2,6 кг/год. Термін служби бил підвищується в 2,5 рази в порівнянні з ненаплавленими.

Велике розмаїття способів ЕШН запропоновано для відновлення зубів ковшів екскаваторів. Переважно, ці технології були розроблені під керівництвом А.Я. Шварцера в Донецькому політехнічному інституті. Однією з них є технологія, заснована на застосуванні стикошлакового наплавлення [66]. За цією технологією зношений зуб з привареним в стик до його торця витратним електродом з високо зносостійкого матеріалу подають вертикально в рідку шлакову ванну глибиною 50...60 мм, що знаходиться в плавильній формі (кристалізаторі), яка відтворює геометрію робочої частини зуба. Після розплавлення витратного електрода утворюється металева ванна і одночасно формується робоча частина зуба, а після оплавлення торця зношеного зуба останній занурюють у шлак і сплавляють з новою напавленою робочою частиною. При такій техніці наплавлення виключається утворення крихких структур у зоні з'єднання основного (торець зношеного зуба) і напавленого (витратний електрод) металів.

Запропоновано також технологію ЕШН зубів ковшів екскаваторів із постійною шлаковою ванною – шлаковим котлом [67]. За цією технологією немає необхідності розпочинати електрошлаковий процес з розведення шлакової ванни при напавленні кожного наступного зуба. Шлак постійно підтримується в рідкому стані в шлаковому котлі і по мірі необхідності заливається з нього у формуючий пристрій (кристалізатор).

Стійкість відновлених ЕШН зубів знаходиться на рівні або навіть вище за стійкість нових ливарних зубів зі сталі 110Г13Л [66-68].

Для відновлення зубів ковшів екскаваторів пропонується наплавлення і без заключної операції – стикового зварювання. У цьому випадку у кристалізатор, однією зі «стінок» якою служить торець горизонтально розташованого зношеного зуба, заливають рідкий шлак, а потім переплавляють витратний електрод. При цьому одночасно відбувається відливання робочої частини зуба і її сплавлення зі зношеним зубом. При такій схемі наплавлення полегшується видалення газових бульбашок і шлакових включень із металевої ванни та забезпечується висока якість наплавленого шару [69, 70].

Для одночасного відновлення і зміцнення робочої поверхні зуба за один прийом для наплавлення застосовують складні електроди. Для зміцнення передньої грані зуба використовують складний електрод 2 (рис. 1.3), верхня частина якого виконана зі зносостійкого сплаву, а нижня зі сталі типу 110Г13Л. Для наплавлення зносостійкого шару на обидві грані зуба складний електрод 3 виконують з трьох частин: середню частину зі сталі 110Г13Л, а верхню і нижню зі зносостійкого сплаву (зазвичай з високохромистого чавуну).

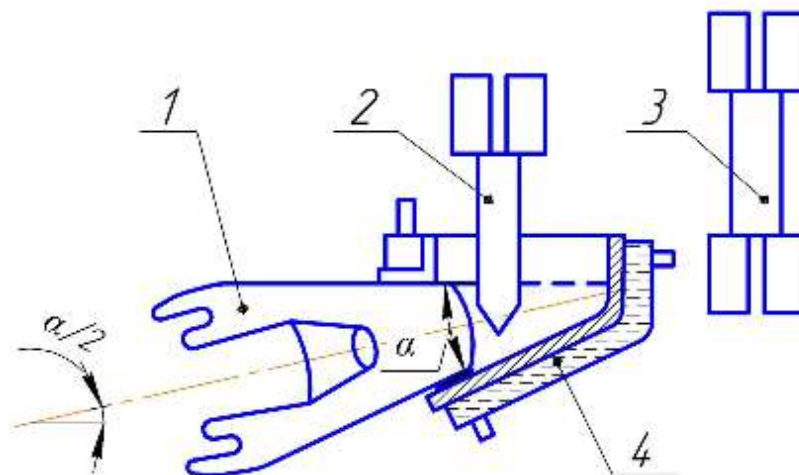


Рис. 1.3 ЕШН зубців ковшів екскаватора з використанням складних електродів:  
1 – заготівка зуба; 2 – витратний електрод першого типу; 3 – витратний електрод  
іншого типу; 4 – кристалізатор

Третім виробом масового виробництва гірничо-металургійного комплексу, електрошлакове наплавлення якого показало свої переваги, є прокатні валки, головним чином гарячого прокатування металу. У промисловості знайшли застосування технології наплавлення з використанням наплавочних дротів і електродів великого перерізу у вигляді труб. Вперше про досвід ЕШН електродним дротом прокатних валків було повідомлено в [71, 72]. Надалі ці роботи було продовжено [73-75]. Технологія дозволяє наплавляти валки з гладкою бочкою діаметром від 250 до 900 мм при вертикальному розташуванні осі валка. Під час наплавлення валок обертається, а електроди, кількість яких може досягати 27, здійснюють коливальні рухи по периметру бочки валка. Мають місце й повідомлення про інші варіанти технології ЕШН з вертикальним розташуванням осі наплавлюваного валка [76-79]. Обертання валка при наплавленні не передбачається, але використовуються регульовані коливання наплавочних дротів від початку виникнення дугового процесу, що переходить потім в електрошлаковий, до виходу шлакової ванни на вивідне кільце, розташоване на верхньому торці бочки валка. При використанні дроту діаметром 4 мм продуктивність наплавлення досягає 11,4 кг/год на один електрод. Швидкість наплавлення може змінюватися залежно від кількості дротів, що подаються, і діаметра валка – від 122 кг/год для валків діаметром 320 мм до 362 кг/год для валків діаметром 915 мм.

Позитивні результати й при горизонтальному розташуванні осі валка при наплавленні [74]. Така схема виявилася найбільш прийнятною для валків пілігримових станів для вальцювання труб. Наплавлення виконують з використанням водоохолоджувальних приладів. Час наплавлення валка пілігримового стану для вальцювання труб діаметром 222 мм при використанні п'яти електродів діаметром 3,15 мм й силі струму на один електрод 550 А становить приблизно 3 год.

За даними [74, 80], методом ЕШН можна отримувати біметалеві прокатні валки, вартість яких на 35...40% нижче вартості нових валків. У роботі [81] вперше було повідомлено про використання при ЕШН електродів у вигляді труб (рис. 1.4).



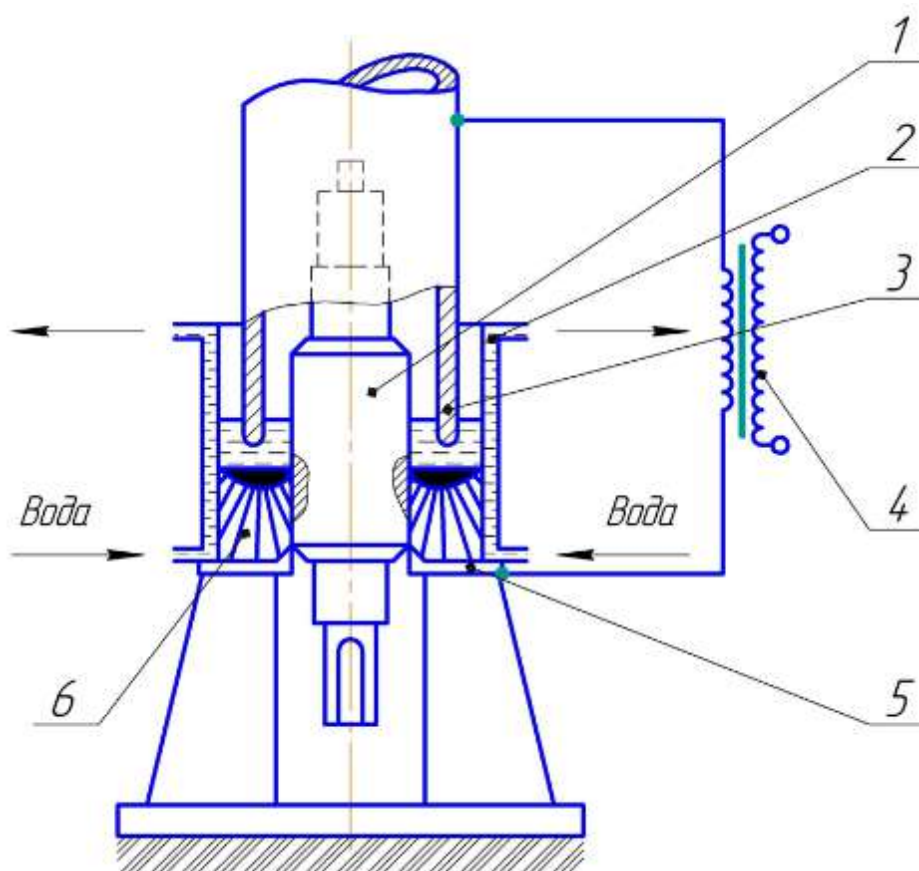


Рис. 1.4 Наплавлення прокатних валків електродом-трубою: 1 – наплавлюваний прокатний валок; 2 – кристалізатор; 3 – електрод-труба; 4 – трансформатор; 5 – стартове кільце; 6 – наплавлений шар

Для наплавлення сталевих і чавунних прокатних валків гарячого прокатування стану 300 використовували електроди-труби діаметром 370 мм із сірого чавуну. Наплавлений метал легується хромом і нікелем шляхом нанесення на поверхню труб обмазки із суміші феросплавів з рідким склом. За іншою схемою наплавляли валки холодного прокатування жерсті стану 450. Для наплавлення використовували електрод-трубу діаметром 215 мм, яка була складена з 30 прутків діаметром 18 мм зі сталі ШХ15. Промислові випробування показали, що стійкість наплавлених валків на рівні стійкості нових ливарних валків з робочим шаром аналогічного складу. У той же час вартість наплавлених валків у 2...3 рази нижча за вартість нових.

Надалі ці роботи були продовжені в основному стосовно валків гарячого прокатування з розширенням номенклатури наплавлюваних валків і наплавочних матеріалів [81-85].

Відносна простота техніки наплавлення і можливість з високою продуктивністю отримувати біметалеві валки з гладкою бочкою сприяли розвитку та поширенню цього способу ЕШН за кордоном [86-90]. Труднощі, пов'язані з отриманням ливарних електродів-труб із високолегованих матеріалів, сприяли створенню нової технології виробництва цього виду електродних матеріалів [91]. Було запропоновано виготовляти електроди з двох концентрично розташованих тонкостінних труб з маловуглецевої сталі, зазор між якими заповнюють металевим легованим порошком або сумішшю порошків феросплавів. Для виключення висипання порошку під час наплавлення підігрівають кінець труби з метою спікання порошку. Процес отримав назву Electroslag Remelting – Metal Powders (ESR – MP).

Різними способами ЕШН успішно відновлюються й інші вироби та інструменти, що застосовуються у металургійній і гірничорудній промисловості. Стійкість пресового і штампового інструменту, напавленого електродними дротами, підвищується від 20% до 5...10 разів [92, 93, 52]. Електрошлаковим наплавленням електродом великого перерізу відновлюють корпуси шарошок для роторного буріння шахтних стволів. При цьому їхня стійкість підвищується на 30...50% в порівнянні з новими при витратах на наплавочні роботи, що становлять 25% вартості нових шарошок [94, 95]. Підвищення терміну служби черпаків драг шляхом наплавлення пластинчастими електродами дозволяє виключити великі втрати високолегованої сталі 110Г13Л (для черпака ємністю 400 л вони досягають 100 кг) [96, 97].

Відновлення і зміцнення штампів так само є однією з галузей застосування ЕШН електродом великого перерізу. Наплавляема поверхня розташовується горизонтально [97, 99] або вертикально [100, 101]. У якості електродів для наплавлення використовують прутки або пластини. Використовуючи кристалізатори спеціальної

конструкції, за допомогою ЕШН можна отримати штампи з готовою гравюрою [69, 102, 103].

Є позитивний досвід наплавлення багатотонних станин ковальських молотів і молотових баб з використанням плавких мундштуків [69,104].

Електрошлакове наплавлення з використанням плавких мундштуків застосовують і при відновленні зубів великомодульних шестерень цементних печей, приводних шестерень поворотних платформ крокуючих екскаваторів [69, 105-108]. На відновлення зубів зношених шестерень потрібно зазвичай у 3...4 рази менше часу, ніж на виготовлення нових.

Наявність високотемпературної шлакової ванни розширює технологічні можливості наплавлення за рахунок формування наплавленого металу шляхом плавлення в ній одночасно з плавкими електродами різного виду присадкових матеріалів, зокрема дискретних і рідких.

Для наплавлення лопатей зірочок дробарок агломерату запропоновано технологію ЕШН композиційного металу [109]. Матрицю формують шляхом плавлення двох електродних порошкових дротів діаметром 3,6 мм, а у якості твердої фази використовують порошок реліту. Продуктивність процесу 30 кг/год, а зносостійкість зірочок підвищується не менше, ніж у 3 рази в порівнянні з наплавленням вручну сплавом типу сормайт. Аналогічна схема наплавлення композитного металу з використанням чотирьох суцільних дротів діаметром 4 мм і порошку карбіду вольфраму дозволила збільшити строк експлуатації малих корпусів доменних печей приблизно у 1,5 рази [110, 111].

Високу продуктивність має спосіб зносостійкої багатоелектродної горизонтальної ЕШН [112, 113]. Використовуючи кілька електродних дротів і шар легуючої шихти вдається за один прохід наплавляти шар товщиною 20 мм і більше, продуктивність процесу становить 100 кг/год й вище. Така технологія рекомендується для відновлення бронеплит ринв транспортування руди та інших подібних деталей [114, 115].

Розроблено технологію ЕШН невитратним електродом штампових кубиків із застосуванням у якості присадки стружки штампової сталі [116-118]. Експлуатаційні випробування показали, що стійкість наплавлених штампів у 1,5...4,0 рази вища за стійкість штампів з кованого металу, а їхня вартість у 2...3 рази нижча. Встановлено також [119], що цей спосіб наплавлення дозволяє додатково легувати наплавлений метал зі шлаку. Таке легування, наприклад, титаном або ніобієм, дозволяє підвищити стійкість штампів зі сталі 5ХНМ ще на 25...30%.

ЕШН рідким присадним матеріалом поки що не набуло широкого поширення, головним чином через складнощі, пов'язані з об'єднанням двох технологічних процесів – електрошлакового з використанням невитратного електрода і процесу отримання та дозування рідкої присадки. Проте розроблено спеціалізоване обладнання [120] і створено наплавні ділянки [121], що дозволяють отримувати багатощарові зливки та біметалеві штампи [122, 123]. Виробництво багатощарового металу з різних марок сталей та сплавів дозволяє зменшити його собівартість на 200...600 доларів США на тону [124].

Наявна інформація й про застосування ЕШН електродами великого перерізу з додаванням рідкої присадки для виготовлення двошарових валків [125]. Незважаючи на високу продуктивність процесу наплавлення та можливість регулювання проплавлення основного металу, технологічні складності його здійснення зберігаються, як і при напавленні з невитратними електродами.

### **1.2.3. Вибір оптимальних наплавних матеріалів**

Багато виробів, що застосовуються в машинах і механізмах гірничо-металургійного комплексу, особливо великих розмірів (ковші екскаваторів, черпаки драг тощо) або масового виробництва (била, молотки тощо) виготовляють зі сталі 110Г13Л. Причому часто при прийнятті рішення про використання цієї сталі з метою підвищення працездатності виробів, що експлуатуються в умовах абразивного зношування, не враховують її структурні особливості, що дозволяють досягти

позитивних результатів лише у випадку, якщо абразивне зношування супроводжується ударними навантаженнями. Встановлено, що в умовах абразивного зношування без ударів сталь 110Г13Л не має відчутних переваг у порівнянні зі сталлю 40 [36]. Такий вплив ударних навантажень на підвищення як твердості сталі, так і її зносостійкості найчастіше пояснюють мартенситним деформаційним перетворенням (наклепом) [126, 127]. Хоча існують й інші пояснення структурних змін сталі в умовах зовнішнього ударного впливу, пов'язані з процесами, що відбуваються в тонкій кристалічній структурі (подрібненням мозаїчних блоків і виникненням мікронапруг) або при поєднанні протікання обох структурних процесів [128, 129]. У роботі [130] навіть стверджується, що у сталі Гадфільда (110Г13Л) деформаційні мартенситні перетворення в помітних кількостях відсутні, та взагалі класична сталь із вмістом вуглецю 0,9...1,4% і марганцю 11...14% знаходяться в галузі стабільного аустеніту.

У практичному плані можна стверджувати, що сталь 110Г13Л тим більше виявлятиме свої зносостійкі якості, чим при більших навантаженнях вона експлуатуватиметься, хоча ступінь її зміцнення (підвищення твердості) при значному зростанні навантажень знижується [131, 132]. Слід зазначити, що глибина зміцненого шару при експлуатації виробів різного призначення за умов ударно-абразивного зношування відносно невелика. Так дослідження [133] показали, що поверхні навіть повністю зношеного зуба екскаваторів ЕКГ-4 на глибині до 1 мм мають твердість, що не перевищує 375 одиниць НВ, а на глибині 3 мм – понад одиниць 285 НВ. Зі збільшенням глибини шару вона наближається до показника твердості металу у вихідному стані, що і обумовлює загалом низьку зносостійкість зубів зі сталі 110Г13Л. Аналогічна оцінка отримана і за результатами експлуатації щік щокрової дробарки ЛД-58Б: глибина зміцненого шару становить 2,3...2,7 мм [131].

Одним зі способів підвищення зносостійкості сталі є її зміцнення шляхом виконання попереднього наклепу робочої поверхні виробу до його експлуатації. Найбільш ефективним способом такого зміцнення є обробка робочої поверхні енергією вибуху. Глибина такого зміцнення не перевищує 2 мм [134]. Однак

зносостійкість деталей гірничих машин, навіть зміцнених цим способом, залежить від міцності шматків перероблюваної гірничої маси (табл. 1.6) [135].

Таблиця 1.6

**Зносостійкість зміцнених вибухом деталей гірничих машин за різної міцності шматків гірничої маси**

Міцність шматків гірничої маси за шкалою М.М. Протодьяконова	Збільшення зносостійкості, %	
	Зубів ковшів екскаваторів ЭКГ-4, ЭКГ-8	Броні конусних дробарок КМД и КСД
6...8	55	65
10...12	30	44
14...16	15	23
18...20	0	5

Сучасні схеми зміцнення вибухом дозволяють забезпечити поверхневу жорсткість після зміцнення 380...420 одиниць НВ. Відповідно, ті деталі, які при роботі одержують наклеп більше, ніж глибина зміцнення під час вибуху, зміцнювати вибухом недоцільно [135].

Аналізуючи результати стійкості деталей різного призначення, виготовлених зі сталі 110Г13Л, і застосовуваних матеріалів з метою її заміни або зміцнення методами як дугового, так і електрошлакового наплавлення, слід визнати, що найбільш ефективними наплавними матеріалами можуть бути високовуглецеві леговані сталі та особливо високохромисті чавуни від 15 до 30% хрому з можливим додатковим легуванням іншими елементами [47, 136-141].

Основною вимогою до структури зносостійкості сплавів є гетерогенність. Оскільки більш м'які складові в процесі тертя зношуються сильніше, питома навантаження збільшується на більш зносостійкій фазі структурних складових і зменшується на менш зносостійкій [142]. Основний внесок в опір матеріалу зношування вносять більш тверді складові, якими найчастіше є карбіди. Спеціальні карбіди хрому мають підвищену мікротвердість – за даними Реріга вона становить

1200...1600 одиниць HV для карбідів типу  $M_7C_3$  [143] і приблизно 1400 одиниць HV для  $M_2C_6$  [144], тоді як твердість цементиту звичайних білих чавунів становить 840...1100 одиниць HV. На рис. 1.5 [145] показано вплив кількості комплексних карбідів типу  $(Cr,Fe)_7C_3$  на інтенсивність зношування хромистих чавунів із аустенітною структурою.

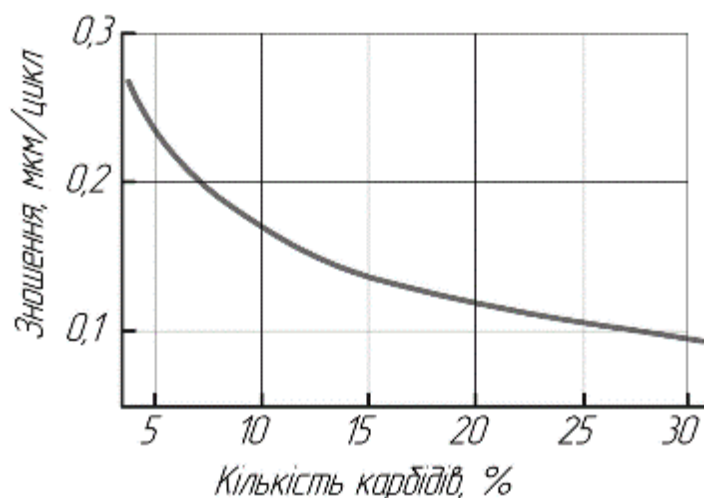


Рис. 1.5 Залежність інтенсивності зношування від кількості комплексних карбідів типу  $(Cr,Fe)_7C_3$

На зносостійкість чавуну впливають розміри карбідів. Подрібнення карбідних включень (наприклад, в результаті прискореної кристалізації при наплавленні) підвищує їхню зносостійкість [136]. Значно впливає також форма карбідів [146]. Карбіди у вигляді ізольованих включень найбільш інтенсивно підвищують зносостійкість. Карбіди в процесі зношування не повинні відкришуватися, тобто кількість і властивості м'якшої та менш зносостійкої складової повинні забезпечувати хороше утримання карбідів в структурі. Для звичайних білих чавунів це правило не дотримується. У ледебуриті матрицю утворює твердий та крихкий цементит, а більш пластичні та м'які включення аустеніту (перліту при кімнатній температурі) в значній мірі ізольовані один від одного. При ударних навантаженнях руйнування білого чавуну внаслідок появи тріщин відбувається, переважно, по крихкій цементній

матриці. З метою значного й одночасного підвищення зносостійкості і механічних властивостей чавуну його структура повинна піддаватися інверсії, тобто перетворена на обернене звичайному білому чавуну взаємне розташування карбідної та матричної структурних складових.

Часткова інверсія мікроструктури білого чавуну може бути досягнута його легуванням достатньою кількістю хрому, що забезпечує заміну цементиту комплексним карбідом  $M_7C_3$ . У роботах [147, 148] показано, що евтектична колонія аустеніт + карбід  $M_7C_3$  формується на базовому кристалі карбиду, та є безкристалічним утворенням циліндричної форми (рис. 1.6).

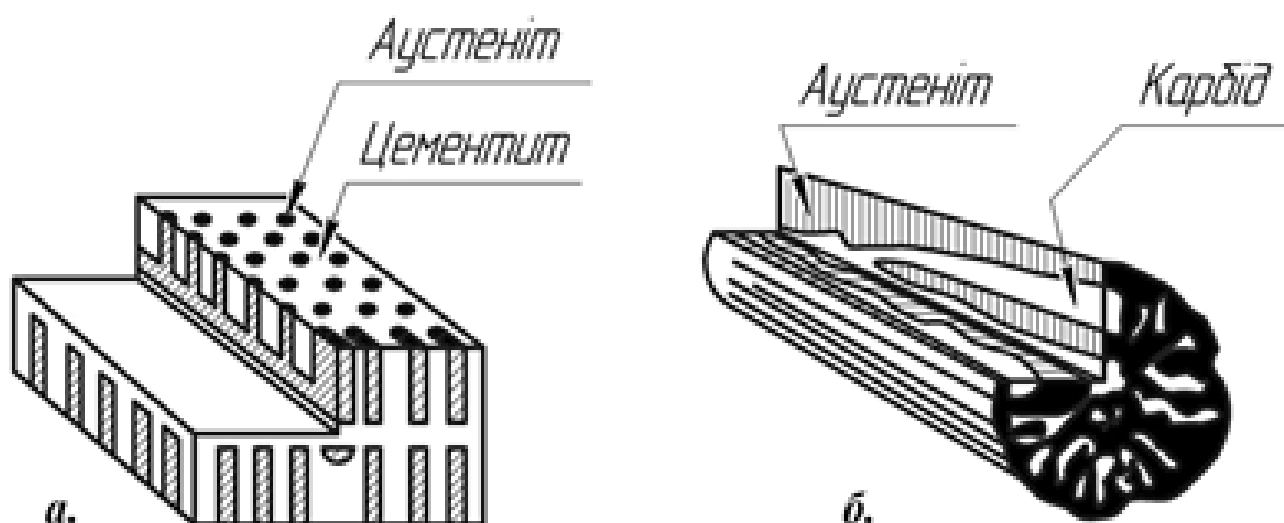


Рис. 1.6 Схематичне зображення структури ледебуриту (а) і хромистої евтектики (б)

У процесі зростання не тільки базовий кристал, але і відгалуження від нього розчленовуються, і карбідний скелет колонії перетворюється в пучок розбіжних стрижнів. При цьому аустеніт кристалізується в проміжках між стрижнями. Оскільки переважною за обсягом фазою колонії є аустеніт, і колонії стикаються одна з одною по аустенітним оболонкам, механічні властивості та зносостійкість білих хромистих евтектик чавунів, у порівнянні з ледебуритними, більш високі. Крім того, твердість карбиду  $M_7C_3$  в порівнянні з цементитом вище, що також підвищує зносостійкість чавуну.



Слід зазначити ще одну властивість високохромистих чавунів – вони, як і сталь 110Г13Л, іноді можуть зміцнюватися під впливом ударних навантажень. Але при експлуатації виробів з наплавленим чавуном поверхневий шар вже спочатку має високу твердість, приблизно 50 одиниць HRC, що не знижується при подальшому зношуванні. Це має сприяти підвищенню довговічності виробів. За міцністю наплавлень чавун відповідає характеристикам сталі 110Г13Л і значно перевищує характеристики ливарного зносостійкого чавуну аналогічного складу (табл. 1.7).

Таблиця 1.7

**Механічні властивості і твердість сталі 110Г13Л та високохромистого чавуну  
(~3% С , 16% Cr)**

Марка матеріалу	Механічні властивості							Твердість НВ (HRC)
	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\Psi$ , %	$\delta$ , %	КСU <sub>20</sub> , МДж/м <sup>2</sup>	$\sigma_{визг.}$ , Мпа	Стріла прогину, мм	
110Г13Л (після лиття)	400...500	300...450	–	0,5...5,0	0,1...0,3	–	–	200...230
110Г13Л (після гартування)	800...1000	250...400	35...45	40...50	0,12...0,22	–	–	170...230 (<18...22)
110Г13Л (після впливу ударних навантажень)	~1000	~650	–	–	–	–	–	≥300...430 (33...45)
Наплавлений високохромистий чавун (ЕШН)	600	–	–	–	0,13	1270	2,3	(~50)
Ливарний високохромистий чавун	420	–	–	–	–	280	1,7	(~50)

Як видно з розгляду механічних і, особливо, експлуатаційних властивостей сталі 110Г13Л (високовуглецева легована сталь) і високохромисті чавуни є перспективними матеріалами для наплавлення в умовах абразивного зношування та ударних навантажень. Однак для дугового наплавлення ці матеріали мало підходять – сталь 110Г13Л та високовуглецеві леговані сталі відносяться до сталей, що мають погану здатність до зварювання, а високохромисті чавуни практично взагалі не

підлягають дуговому наплавленню. Тому всі переваги цих матеріалів можуть бути використані лише при електрошлаковому наплавленні (ЕШН).

### **1.3 Сутність та особливості відновлення деталей ЕШН з використанням струмопідвідного кристалізатора**

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблена оригінальна конструкція неплавкого невитратного електрода – секційний струмопідвідний кристалізатор СПК [149, 150]. Конструктивна відмінність СПК від звичайних кристалізаторів, що застосовуються при електрошлакових переплавленні (ЕШП) і наплавленні (ЕШН), полягає в тому, що він є секційним пристроєм, всі секції якого розташовані один над одним і роз'єднані між собою електроізоляційними прокладками. Зазвичай таких секцій три: струмопідвідна, проміжна та формуюча, але іноді використовують і дві секції (рис. 1.7, 1.8). Саме завдяки підведенню напруги від джерела живлення до верхньої струмопідвідної секції такий кристалізатор дозволяє використовувати при наплавленні горизонтальних і вертикальних поверхонь не тільки застосовувані наплавні матеріали (дроти, стрічки, електроди великого перерізу), але й дискретні і навіть рідкі присадки різного хімічного складу. На відміну від звичайного кристалізатора ЕШП, в якому на стінку кристалізатора може протікати тільки частина струму [151, 152], через струмопідвідну секцію СПК протікає весь робочий струм. Крім того, струмопідвідна секція зроблена з незамкнутою поверхнею, завдяки чому вона є одновитковим індуктором, що дозволяє забезпечувати при наплавленні обертання шлакової ванни в горизонтальній площині. Кількість роз'ємів у секції може бути збільшено при ЕШН у кристалізаторах великих розмірів.

Враховуючи те, що через струмопідвідну секцію проходить весь струм наплавлення, її захищають від електроерозійних явищ, що спостерігаються на межі шлак – стінка кристалізатора [153-155], за допомогою змінних термостійких електропровідних футеровок, найчастіше графітових.



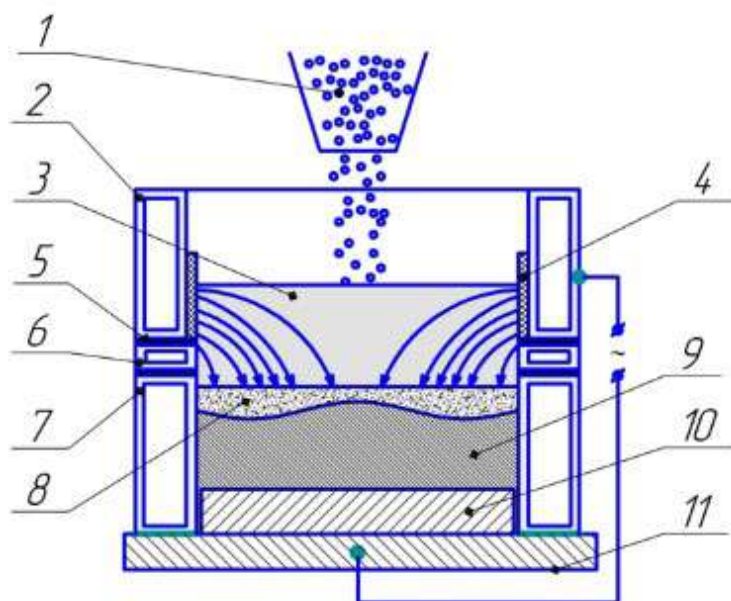


Рис. 1.8 Схема ЕШН дискретною присадкою в трисекційному СПК, в якій стрілками показано розподіл струму у шлаковій ванні: 1 – дискретна присадка; 2, 6, 7 - струмопідвідна, проміжна і формуюча секції кристалізатора, відповідно; 3 – шлакова ванна; 4 – захисна футеровка; 5 – ізоляційна прокладка; 8 – металева ванна; 9 – наплавлений метал; 10 – виріб; 11 – піддон

У зв'язку з тим, що струм наплавлення в основному розподіляється в пристінковій ділянці робочої поверхні СПК (див. рис. 1.8), то середня частина шлакової ванни (за її поперечним перерізом) може мати дещо меншу температуру, хоча за рахунок обертання ванни ця відмінність у температурах окремих областей ванни дещо нівелюється. Такий розподіл струму в шлаковій ванні визначає розміри кристалізатора, при яких у ній буде досягнуто відносно рівномірне теплове поле. Стосовно наплавлення в круглому кристалізаторі його діаметр, напевне, становитиме не більше 250-300 мм. Звичайно, таке обмеження розміру СПК відповідно обмежує і розміри наплавлювальних поверхонь. Якщо ж при напавленні в якості переплавного матеріалу використовувати витратні електроди певного перерізу, то завдяки перерозподілу струмів у шлаковій ванні можна досягти прогріву і її центральної

частини. Таке рішення дозволяє розширити можливості наплавлення поверхонь великих розмірів.

ЕШН у СПК може виконуватися у двох технологічних варіантах: при стаціонарному положенні СПК і при відносному переміщенні кристалізатора й наплавлюваної заготівки. Причому другу технологію з погляду простоти її реалізації найчастіше слід виконувати з переміщенням під час наплавлення кристалізатора.

При стаціонарному розміщенні кристалізатора максимальна товщина наплавлюваного шару становить приблизно 70...80 мм, залежно від складу застосовуваного флюсу [157]. У разі ЕШН з відносним переміщенням кристалізатора і заготівки товщина шару визначається довжиною колони наплавної установки, по якій під час наплавлення рухається каретка з СПК, або із заготівки, що витягується з нього.

Як зазначалося вище, струмопідвідний кристалізатор в основному виготовляється у вигляді трисекційного пристрою. Наявність проміжної секції між струмопідвідною і формуючою секціями дозволяє з більшою надійністю стежити за рівнем металевої ванни при наплавленні шару великої товщини (технологічний варіант щодо переміщення кристалізатора і наплавлюваної заготівки) зі зменшенням ймовірності виходу її металу на струмопідвідну секцію.

При наплавленні в стаціонарному варіанті кристалізатора можна використовувати двосекційний кристалізатор без наявності проміжної секції. У низці випадків виконання наплавлень з двосекційним виконанням кристалізатора вилучається не проміжна, а формуюча секція. Точніше, роль формуючої секції виконує робоча поверхня самої наплавлюваної заготівки [158]. Наразі працездатність двосекційного СПК ще недостатньо вивчена.

У роботах [159-161] показано, що обертання шлакової ванни є важливим технологічним параметром ЕШН у СПК, що впливає як на проплавлення основного металу, так і на процеси кристалізації наплавленого металу. Останнє визначається тим, що спільно зі шлаковою ванною обертається і металева [162]. Звичайно, що під

час відпрацювання оптимальної технології наплавлення може виникнути необхідність регулювати цю швидкість, при цьому це регулювання бажано здійснювати, використовуючи конструктивні особливості СПК, без застосування додаткових джерел електромагнітного впливу. Найпростіше таке завдання вирішувати за допомогою математичного моделювання.

### **Висновки за розділом 1. Мета та завдання досліджень**

1. Робочі поверхні деталей машин і механізмів гірничо-металургійного обладнання здебільшого експлуатуються в умовах абразивного та ударно-абразивного зношування. Будучи часто унікальним і високопродуктивним, його зношені робочі органи втрачають під час експлуатації великі маси металу. Це призводить або до заміни дорогих зношених деталей на нові, або до їх відновлення.

2. Одним із поширених способів відновлення такого типу деталей є різні технології дугового наплавлення. Їхній недолік – це можливість якісно наплавляти лише відносно невеликі шари металу, особливо такого, що містить підвищену кількість карбідів, зокрема найбільш придатного для даних умов експлуатації зносостійких високохромистих чавунів.

3. Відомі способи електрошлакового наплавлення як наплавочний матеріал переважно використовують електроди великого перерізу, але під час їхнього застосування складно керувати структуроутворенням наплавленого металу і відповідно впливати на його експлуатаційні характеристики.

4. Застосування під час електрошлакового наплавлення струмопідвідного кристалізатора дає змогу регулювати розподіл струму в шлаковій ванні та її поведінку під час наплавлення, тим самим змінюючи умови кристалізації наплавлюваного високохромистого чавуну з метою досягнення оптимального поєднання його міцнісних і зносостійких властивостей.

Метою даної роботи є 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 мети, поставленої в дисертаційній роботі, необхідно вирішити 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 зі зносостійких високохромистих чавунів.

## РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ЕШН У СПК

Г.В. Ксендзик – розробник ідеї та базової моделі СПК – надавав велике значення здатності кристалізатора забезпечувати обертання шлакової ванни в горизонтальній площині. Одна з його основоположних статей так і називалася: «Струмопідвідний кристалізатор, що забезпечує обертання шлакової ванни» [163].

Зазвичай, як позитивний вплив магнітного обертання у СПК розглядаються ослаблення руйнівної дії мікродуг (електроерозія) на межі шлак-стінка кристалізатора, досягнення вирівнювання температур і фізико-хімічних властивостей шлакової ванни, отримання рівномірного розподілу дроби (у разі застосування дискретного наплавлення). Крім того, встановлено, що обертання шлакової ванни сприяє прискоренню процесів теплообміну між шлаком і дробом, а також збільшенню відносної маси шлаку, що взаємодіє з нею, внаслідок чого інтенсифікуються процеси рафінування наплавленого металу.

Вже на початку розвитку електрошлакового зварювання і наплавлення як обов'язкового технологічного прийому для отримання на зовнішніх циліндричних поверхнях тіл обертання мінімального та рівномірного проплавлення рекомендувалося використовувати спільне обертання кристалізатора та заготівки (аналогія обертання шлакової ванни у СПК). Причому в роботі [164] зазначалося, що «глибина проплавлення основного металу залежить від швидкостей обертання, зменшуючись зі збільшенням останньої за інших рівних умов, швидкість обертання вибирається дослідним шляхом».

Таким чином, при ЕШН у струмопідвідному кристалізаторі електромагнітний вплив, переважно, розглядається, як технічний прийом, що забезпечує стабільність електрошлакового процесу і досягнення якісного з'єднання основного й наплавленого металів. Однак дані робіт [165, 166] по ЕШП у звичайних кристалізаторах з використанням електромагнітного впливу на шлакову ванну дозволяють припустити,



що такий зовнішній вплив може вплинути і на подрібнення структури наплавленого металу, що формується у СПК. Тому дослідження можливостей регулювання швидкості обертання шлакової ванни завдяки електромагнітним силам, що виникають у робочій зоні кристалізатора, є важливим завданням цієї технології ЕШН. Вирішити таке завдання можна за допомогою математичного моделювання.

## 2.1. Постановка задачі для математичного моделювання електромагнітних процесів у СПК

Як показали наші дослідження, швидкість обертання шлаку в робочому просторі СПК визначається переважно струмом наплавлення, а також електричною потужністю, що вводиться в шлакову ванну. Причому ця залежність має прямолінійний характер, як це видно на рис. 2.1.

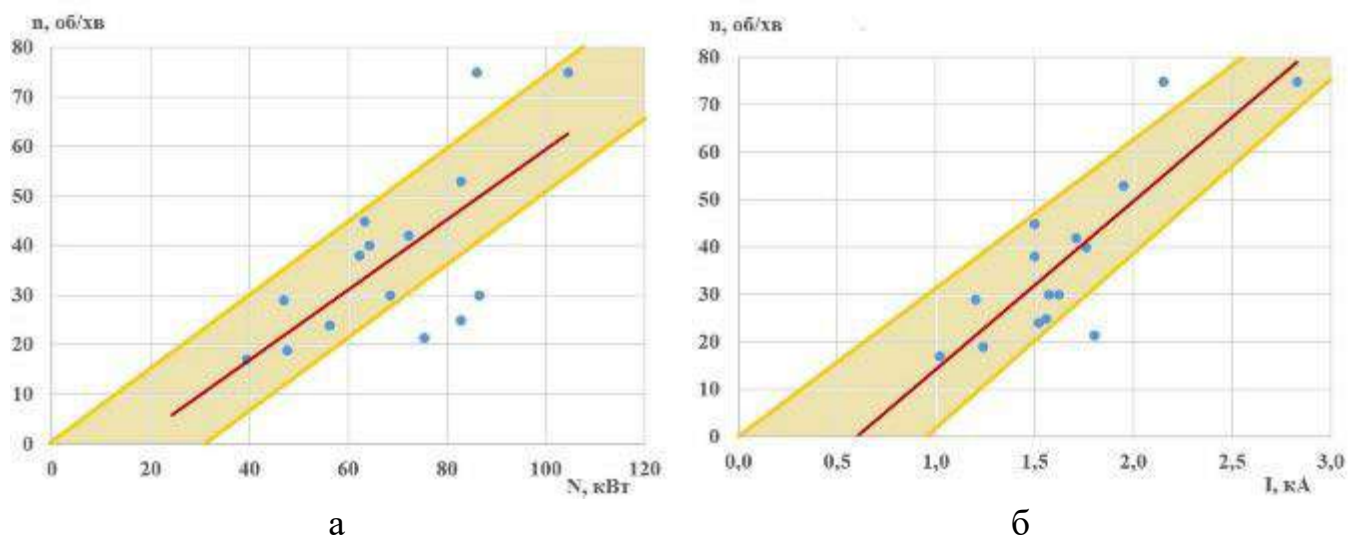


Рис. 2.1 Залежність обертання шлакової ванни: а – від потужності; б – від струму

У разі виникнення ситуації, наприклад, коли електричний режим наплавлення забезпечує стабільність електрошлакового процесу, а швидкість обертання підвищена, що негативно впливає як на проплавлення основного металу, так і на

мікроструктуру наплавленого металу, наявність плавного регулювання цієї швидкості розширює можливості технології ЕШН в отриманні якісного біметалу.

Розглянемо модель СПК для процесу електрошлакового наплавлення на горизонтальну поверхню. Загальний вигляд кристалізатора представлений на рис. 2.2(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. 2.2(б) у вертикальному перерізі, що проходить через вертикальний розріз верхньої струмопровідної секції.

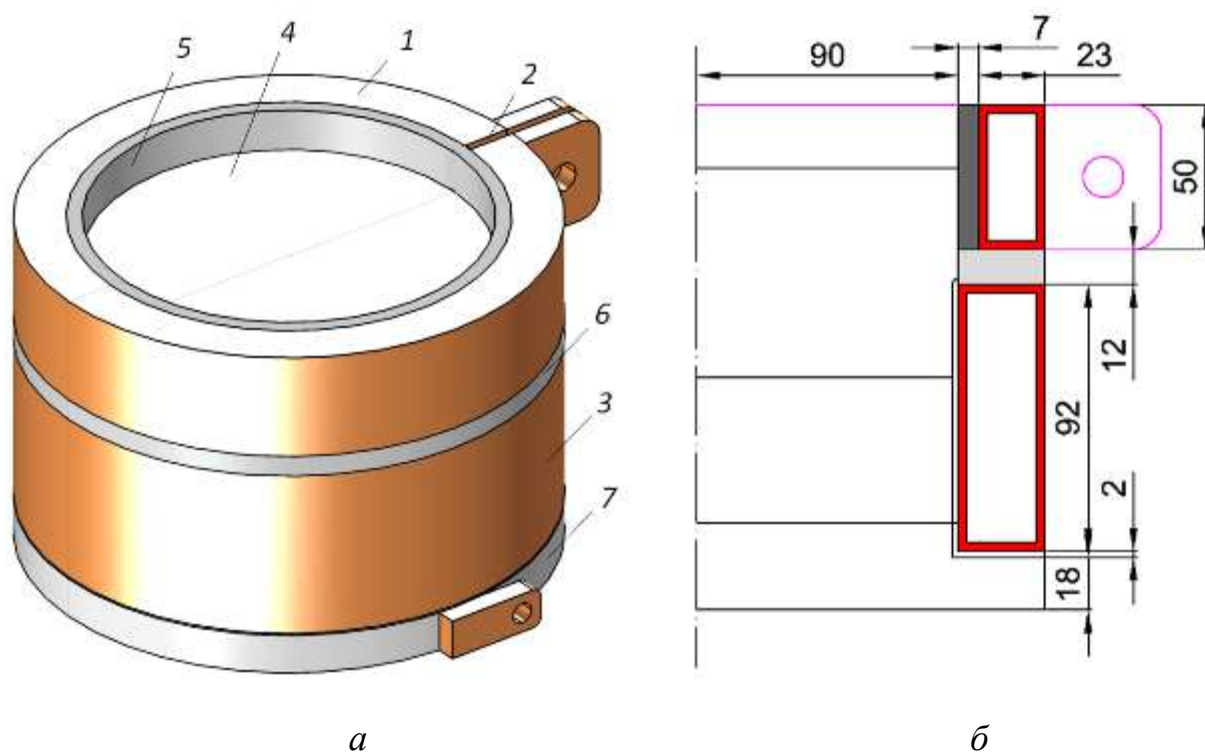


Рис. 2.2 Геометрія досліджуваної конструкції СПК

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.

Конструкція секційного кристалізатора, що забезпечує обертання шлакової ванни при підведенні струму до верхньої електрично ізолюваної секції, була описана в роботі [163]. Автор зазначає, що основний механізм виникнення обертового руху рідкого шлаку в такій конструкції – це сили, які виникають за рахунок вирівнювання напруженості магнітного поля. Згідно з роботою [167], в якій більш детально описуються магнітогідродинамічні процеси в рідкому електропровідному середовищі, показано, що подібний рух спричиняється під дією сил Лоренца, внаслідок взаємодії струму, що протікає в такому середовищі, з власним та (або) результуючим магнітним полем.

Технологічні особливості процесу електрошлакового наплавлення в секційному кристалізаторі експериментальним чином досліджувалися в роботі [168]. У роботі показано, що швидкість обертання шлакової ванни залежить від місця розташування клеми верхньої секції, на яку подається напруга, відносно вертикального розрізу. Сказано, що максимум швидкості припадає на кут  $90^\circ$  між ними і наведена залежність швидкості обертання шлакової ванни від цього кута в діапазоні від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . З огляду на відсутність наукового обґрунтування представленої залежності з максимумом швидкості, що припадає саме на  $90^\circ$ , це питання потребує додаткового дослідження.

Математична модель для дослідження процесу електрошлакового наплавлення в секційному кристалізаторі з водяним охолодженням була запропонована в роботі [169]. Модель описує стаціонарні теплові та електромагнітні процеси. Причому розподіл густини струму та інших похідних величин визначається шляхом вирішення рівняння Пуасона для електричного потенціалу в двовимірній постановці, що обмежує область застосування такої моделі до задач, де досліджуються процеси ЕШН

при підключенні кристалізатора до синусоїдної напруги з урахуванням руху рідкого шлаку і неможлива для застосування при наявності вертикального розрізу в СПК.

При дослідженні зазначених процесів важливим також є коректне урахування контактного опору мідь – графіт, графіт – рідкий шлак та графіт – шлаковий гарнісаж, адже його вплив на характер протікання процесу ЕШН може бути суттєвим. Значення імпедансу контактного опору залежить від фактичної площі контакту, яка, в свою чергу, визначається рельєфом поверхні, тиском між поверхнями контактної пари та частотою зміни прикладених електричних потенціалів. При дослідженні електромагнітних процесів ЕШН на промисловій частоті останнім можна знехтувати. Залежність питомого електричного контактного опору пари мідь-графіт від тиску стиснення ( $1...7$  МПа/см<sup>2</sup>) досліджувалася та порівнювалася з уже відомими результатами в роботі [170] при постійній температурі в зоні контакту, яка може бути використана при моделюванні процесу ЕШН.

Гідродинаміка шлаку та металу, що наплавляється, а також їх тепловий стан є наслідком електромагнітного впливу. Тому моделювання електромагнітного поля є важливим кроком при дослідженні зазначених процесів.

Труднощі моделювання зазначеного процесу пов'язані із асиметрією СПК в зв'язку з наявністю вертикального розрізу, а відповідно з тривимірним характером розподілу електромагнітного поля, а також з нестачею даних, що стосуються фізичних характеристик рідких та твердих шлаків, значення яких можуть варіюватися в широкому діапазоні [171]. Тому фізичні характеристики повинні обиратися таким чином, щоб результати моделювання якнайкраще узгоджувалися з експериментально отриманими даними.

Дослідження електромагнітних процесів дозволять якісно оцінити основні закономірності та особливості процесу електрошлакового наплавлення.

## 2.2. Розробка математичної моделі електромагнітних процесів у СПК і визначення граничних умов її реалізації

Сформулюємо математичну модель для дослідження електромагнітних процесів в тривимірній постановці, що відбуваються при електрошлаковому наплавленні в секційному кристалізаторі при підключенні його до джерела синусоїдної напруги, та на її основі якісно оцінимо ступінь електромагнітного впливу індукованих струмів на рідкий шлак, що є передумовою для створення його ефективної циркуляції в кристалізаторі, а відповідно отриманні якісних виробів.

Прийmemo спрощення та припущення. Не будемо враховувати залежності фізичних характеристик матеріалів від градієнту температур, густини магнітного потоку та напруженості електричного поля. Рух рідкого металу не розглядаємо, а отже напруженістю електричного поля, що виникає внаслідок такого руху в магнітному полі, знехтуємо. Рідка та тверда фаза металу, що наплавляється, вважаються такими, що мають однакові теплофізичні характеристики. Структура шлаку – однорідна, а його фізичні характеристики по всьому об'єму незмінні. Тобто не враховується наявність крапель рідкого металу та різноманітних неметалевих включень. Контакти вважаються однорідними, і такими, що їх опір не залежить від густини струму, напруженості електричного поля та об'ємних тепловиділень.

Дослідження процесу електрошлакового наплавлення в секційному кристалізаторі потребує використання значень скалярного електричного потенціалу на границях розрахункової області в якості граничних умов першого роду для моделювання ситуації підключення установки до напруги промислової частоти [172]. Тому рівняння електромагнітного поля повинні бути сформульовані таким чином, щоб містити скалярний електричний потенціал в якості незалежної змінної. Це можна забезпечити виразивши закон Максвела-Ампера та рівняння неперервності електричного струму в термінах векторного магнітного  $A$  та скалярного електричного  $V$  потенціалів. Для розрахунку полів, що змінюються за гармонічним законом,

система рівнянь, яка описує електромагнітні процеси в секційному кристалізаторі, з врахуванням зазначених вимог приймає наступний вигляд:

$$\nabla \times \frac{\nabla \times \dot{\mathbf{A}}}{\mu} + (\sigma + i\omega\varepsilon) \left( \nabla \dot{V} - \mathbf{u} \times (\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) \right) + (i\omega\sigma + \omega^2\varepsilon)\dot{\mathbf{A}} = 0; \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \left( -(\sigma + i\omega\varepsilon) \left( \nabla \dot{V} - \mathbf{u} \times (\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) \right) - (i\omega\sigma + \omega^2\varepsilon)\dot{\mathbf{A}} \right) = 0, \quad (2.2)$$

де  $\nabla$  – оператор Набла;  $\dot{\mathbf{A}}$ ,  $\dot{V}$  – комплексні амплітудні значення векторного магнітного та скалярного електричного потенціалів;  $\mu = \mu_0\mu_r$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$  – магнітна та діелектрична проникність середовища;  $\mu_0$ ,  $\varepsilon_0$  – магнітна та діелектрична проникність вакууму;  $\mu_r$ ,  $\varepsilon_r$  – відносні діелектрична та магнітна проникність середовища;  $\sigma$  – питома електропровідність;  $i = \sqrt{-1}$  – умовна одиниця;  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – кутова частота та частота напруги електромережі.

Для врахування руху рідкого шлаку, яке потрібно для дослідження його циркуляції та циркуляції металу не тільки на промисловій частоті, а й на нижчих частотах напруги живлення, де вплив індукованої за рахунок руху середовища в магнітному полі складової напруженості електричного поля проявляється сильніше, у наведених рівняннях можна зробити припущення, що шлак обертається з однаковою кутовою частотою в будь якій точці його об'єму навколо осі, що співпадає з геометричною віссю кристалізатора, а z-компонента його швидкості дорівнює нулю, при умові, що напрямок осі співпадає з віссю z декартової системи координат (вертикальна вісь). Це робить можливим на цьому етапі досліджень спростити задачу, уникнувши складного гідродинамічного розрахунку турбулентного руху.

Знаючи значення частоти обертання рідкого шлаку на поверхні для заданих параметрів живлення, яке відомо з експерименту, складові швидкості по осям x, y, z розраховуються для підобласті рідкого шлаку за формулами:

$$u_x = -2\pi\nu(y - y_0); u_y = 2\pi\nu(x - x_0); u_z = 0. \quad (2.3)$$

Для всіх інших під областей  $\mathbf{u} = 0$ . Тут  $x_0, y_0$  – початкові координати осі кристалізатора.

При розрахунку застосовувалися наступні граничні умови (рис. 2.3): на зовнішніх границях розрахункової області (за винятком границь з прикладеним електричним потенціалом) – електрична ізоляція ( $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0$ ); на всіх зовнішніх границях – магнітна ізоляція ( $\mathbf{n} \cdot \mathbf{A} = 0$ ); на зовнішній границі провідника, приєднаного до підкладки – нульовий потенціал ( $V = 0$ ); на зовнішній границі провідника, приєднаного до верхньої секції кристалізатора – електричний потенціал, що відповідає напрузі джерела живлення ( $V = V_s$ ); на поверхнях мідь – графіт, графіт – рідкий шлак та графіт – шлаковий гарнісаж, контактний імпеданс

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_1 = \left( \frac{1}{\rho_{s12}} + i\omega C_s \right) (V_1 - V_2); \quad (2.4)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_2 = \left( \frac{1}{\rho_{s12}} + i\omega C_s \right) (V_2 - V_1), \quad (2.5)$$

де  $\mathbf{n}$  – одиничний нормальний вектор,  $\rho_{s12}$  – питомий контактний опір, Ом·м<sup>2</sup>,  $C_s$  – питома ємність контактної поверхні (на промисловій частоті можна знехтувати).

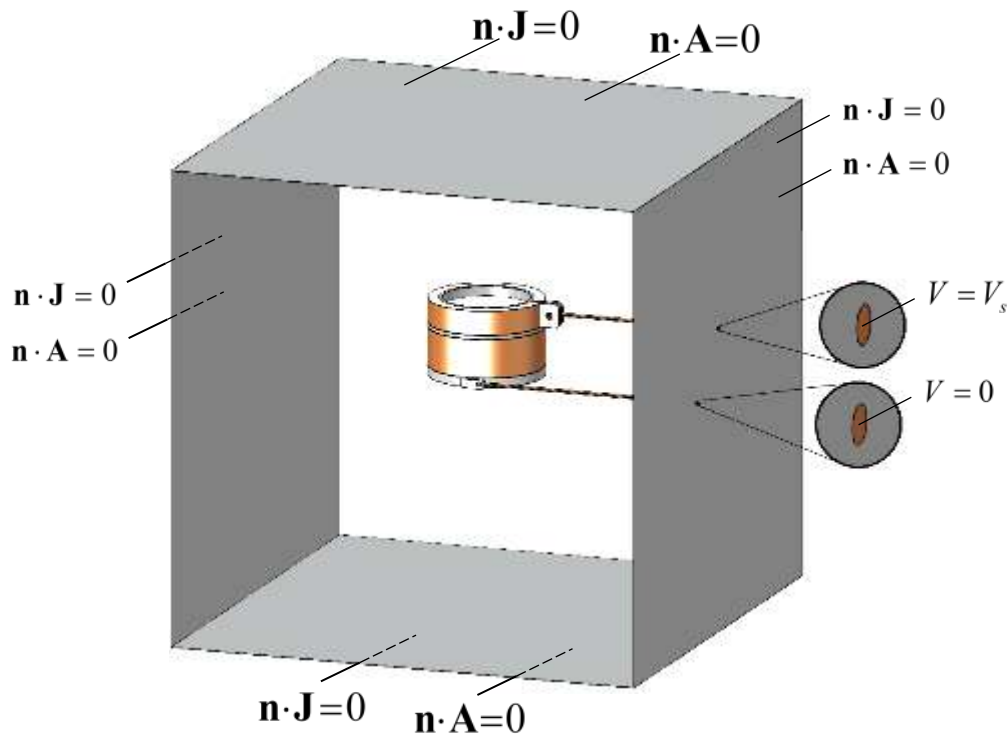


Рис. 2.3 Граничні умови

Сформульована таким чином електромагнітна задача забезпечує замкнутий шлях протікання електричного струму. Замкнутим його роблять зовнішні границі розрахункової області, по яким струм тече від границі з нульовим потенціалом, до границі з потенціалом джерела живлення.

Часто дослідження електромагнітних процесів не потребує розгляду скалярного електричного та векторного магнітного потенціалів. У такому випадку є можливість спростити розрахункові рівняння електромагнітного поля, зменшивши при цьому кількість невідомих. Дана процедура більш відома під назвою калібрувального перетворення потенціалів і, зазвичай, реалізована за замовчуванням в програмних пакетах, які використовують метод скінченних елементів. Щоб забезпечити унікальність електричного та магнітного потенціалів, що є критичним моментом при дослідженні зазначених процесів в представленій постановці, слід фіктивну змінну

$$\phi_0 = -\frac{i\dot{V}}{\omega} \quad (2.6)$$

в програмних пакетах прирівняти до константи (наприклад  $\phi_0 = 1$ ).

Фізичні характеристики матеріалів, що були використані в даному дослідженні, наведені в табл. 2.1, які обиралися відповідно до значень, наведених у [171].

Таблиця 2.1

### Фізичні характеристики матеріалів

Матеріал	Електрична провідність, $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$	Відносна магнітна проникність	Відносна діелектрична проникність
Графіт	$6,250\cdot 10^4$	1	1
Шлаковий гарнісаж	1	1	1
Рідкий шлак	140	1	1
Метал, що наплавляється	$1,667\cdot 10^6$	100	1
Підкладка	$1,667\cdot 10^6$	100	1
Мідь	$6,452\cdot 10^7$	1	1
Вода, азбест, повітря	0	1	1



Сітка розрахункової математичної моделі метода скінченних елементів представлена на рис. 2.4.

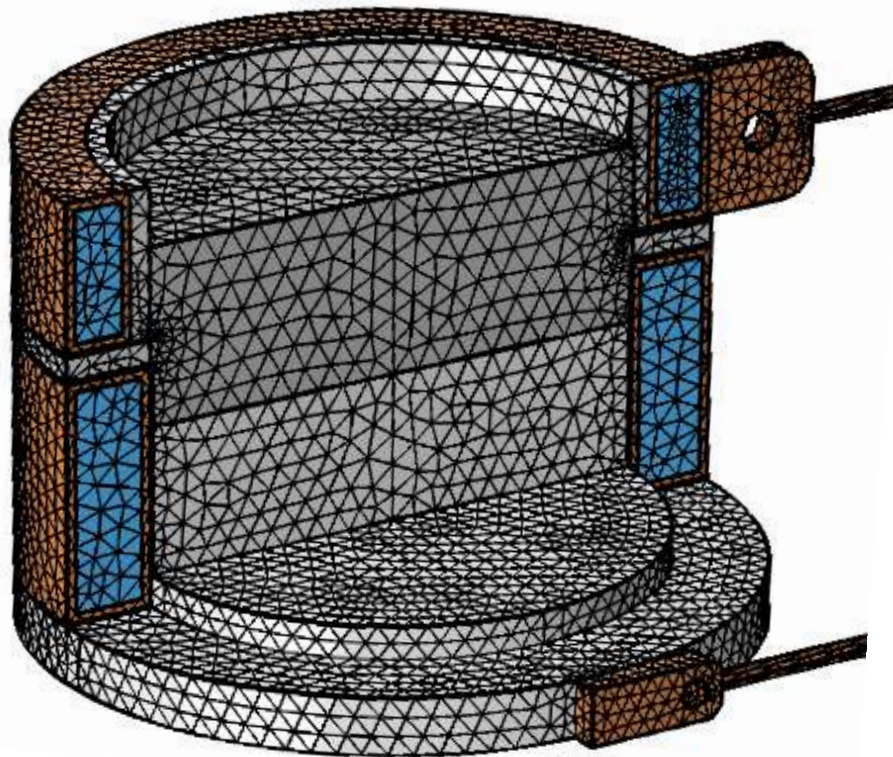


Рис. 2.4 Розрахункова сітка

### **2.3. Дослідження впливу положення верхнього струмовідводу на електромагнітні процеси у СПК**

Оцінка ефективності електромагнітної дії в діапазоні кутів між клемою живлення та радіальним розрізом від  $0^\circ$  до  $\sim 130^\circ$  (електричних градусів), де спостерігається одноконтурний рух рідкого шлаку (таке припущення справедливе поки зберігається однаковий характер руху при зміні зазначеного кута), може бути проведена на основі інтегрального значення окружної складової об'ємних електромагнітних сил:

$$F_{\psi} = \iiint_V \mathbf{f}_{em} \cdot \boldsymbol{\tau} dv, \quad (2.7)$$

де  $\mathbf{f}_{em}$  – питома електромагнітна сила;

$$\boldsymbol{\tau} = -\sin(\arctan 2(y, x)) \cdot \hat{\mathbf{i}} + \cos(\arctan 2(y, x)) \cdot \hat{\mathbf{j}} - \quad (2.8)$$

одичний вектор, спрямований в окружному напрямку відносно геометричної осі кристалізатора;  $\hat{\mathbf{i}}, \hat{\mathbf{j}}$  – одичні вектори в напрямках осей  $x$  та  $y$ .

Можна стверджувати, що чим більше значення  $F_{\psi}$ , тим інтенсивнішою є циркуляція рідкого шлаку (крім випадку кутів між клемою та радіальним розрізом, які не будуть призводити до одноконтурного руху, наприклад  $180^{\circ}$ , де інтеграл окружної складової об'ємних електромагнітних сил буде дорівнювати нулю, проте циркуляція рідкого шлаку все одно відбуватиметься, можливо у вигляді двох протилежно направлених потоків; тому таку оцінку можна проводити лише в діапазоні кутів, де точно відомо, що буде виникати одноконтурний рух рідкого шлаку) і, відповідно, більшою є турбулентна теплопровідність середовища. В свою чергу це призводить до більш однорідного розподілу температури як по об'єму шлаку, так і на поверхні рідкого металу, яка контактує з рідким шлаком. Загалом тепловий вплив характеризується потужністю об'ємних тепловиділень та визначається за наступним виразом:

$$P = \frac{I I^*}{\sigma}. \quad (2.9)$$

Інтегральне значення окружної складової електромагнітної сили залежно від кута між клемою живлення та вертикальним розрізом верхньої струмопровідної секції представлено на рис. 2.5. Із рисунка видно, що величина електромагнітних сил, яка впливає на швидкість обертання розплавленого шлаку лінійно зменшується при переміщенні верхньої струмопідвідної клеми від вертикального розрізу кристалізатора до точки, що розташована напроти розрізу. Після проходження цієї точки сила змінить свій знак на протилежний, що призведе до зміни напрямку обертання рідкого шлаку. Тобто місце розташування верхнього струмовідводу дозволяє впливати на швидкість обертання розплавленого шлаку за лінійним законом. Це важливо, оскільки

регулювати швидкість обертання шлаку за допомогою зміни струму і напруги не завжди можливо у зв'язку з прямим впливом цих параметрів на нагрів шлаку і металу в кристалізаторі, що може призвести до їх недогріву, або до їх перегріву.

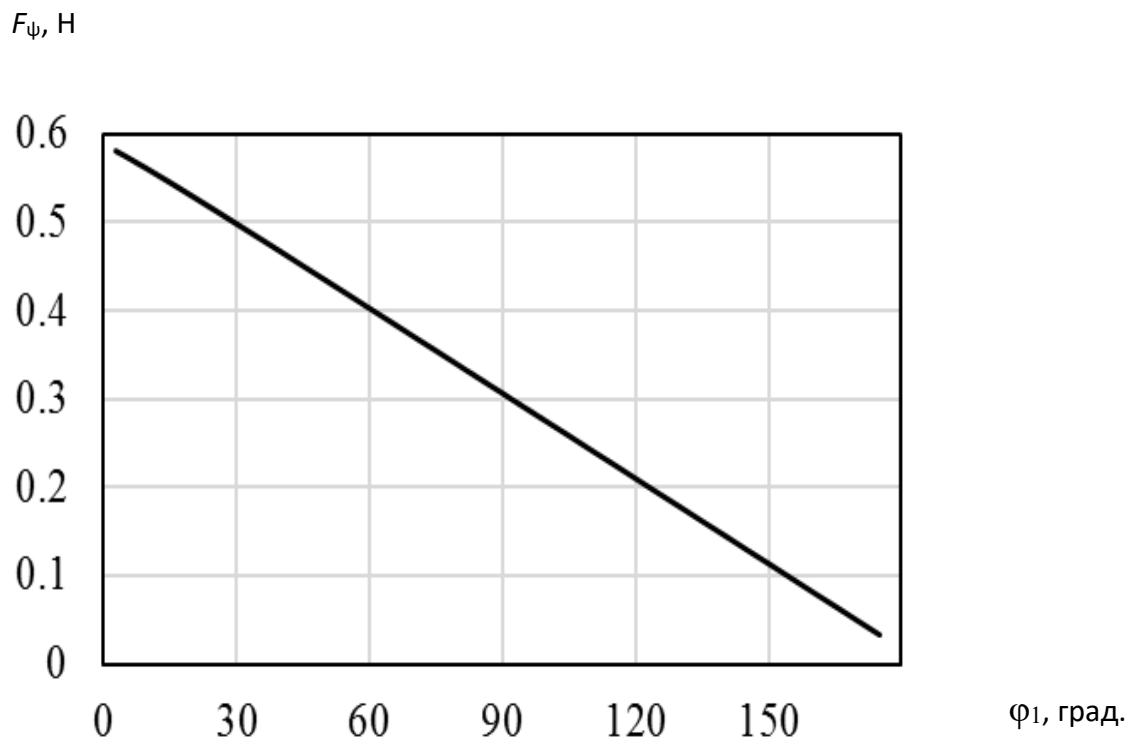


Рис. 2.5 Інтегральне значення окружної складової електромагнітної сили залежно від кута між клемою живлення та вертикальним розрізом верхньої струмопровідної секції

Отримані розрахункові величини електромагнітних сил опосередковано не підтверджують положення із роботи [168] стосовно найбільшої швидкості обертання шлакової ванни при місці розташування клеми верхньої секції, на яку подається напруга, розташованої під кутом  $90^\circ$  відносно вертикального розрізу.

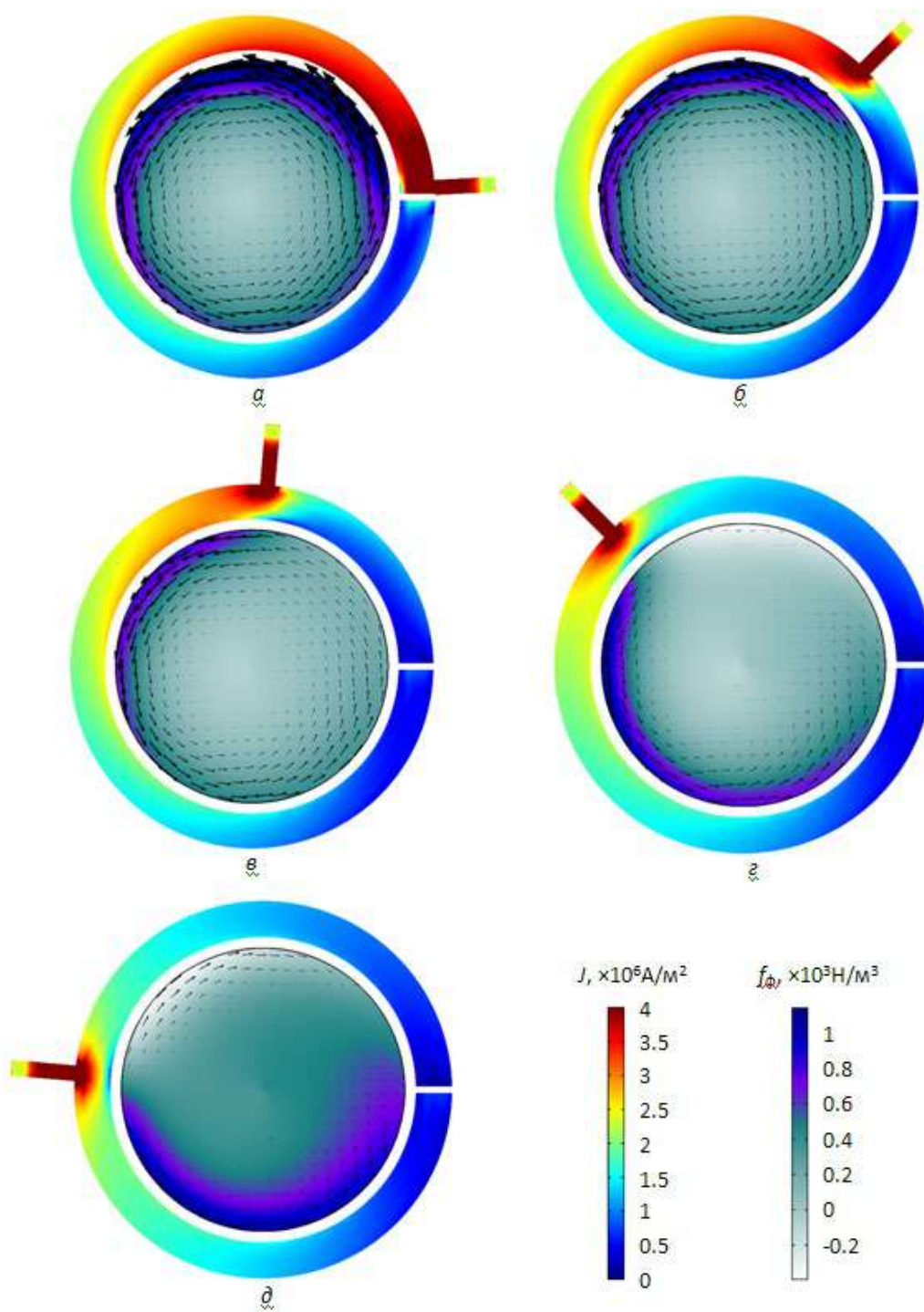


Рис. 2.6 Розподіл струму у верхній струмопровідній секції та розподіл електромагнітних сил в горизонтальному перерізі шлакової ванни на рівні 15 мм від її поверхні залежно від кута між клемою живлення та вертикальним розрізом верхньої струмопровідної секції:  $a - \varphi_1 = 3^\circ$ ,  $b - \varphi_1 = 45^\circ$ ,  $c - \varphi_1 = 85^\circ$ ,  $d - \varphi_1 = 135^\circ$ ,  $e - \varphi_1 = 175^\circ$

Розподіл струму у верхній струмопровідній секції та розподіл окружної складової електромагнітних сил в горизонтальному перерізі для різних кутів  $\varphi_1$  між клемою, на яку подається напруга, та радіальним розрізом представлено на рис. 2.6 в горизонтальному перерізі шлакової ванни на рівні 15 мм від її поверхні. Стрілками позначено електромагнітні сили, що діють на рідкий шлак.

На рис. 2.7, в якості прикладу показаний розподіл густини струму у верхній струмопровідній секції при куті  $\varphi_1 = 135^\circ$ , на рис. 2.8 показана густина струму та сили в горизонтальному перерізі шлакової ванни при 20 мм від поверхні і при куті  $\varphi_1 = 3^\circ$ , на рис. 2.9 – розподіл об'ємних тепловиділень при  $\varphi_1 = 3^\circ$ .

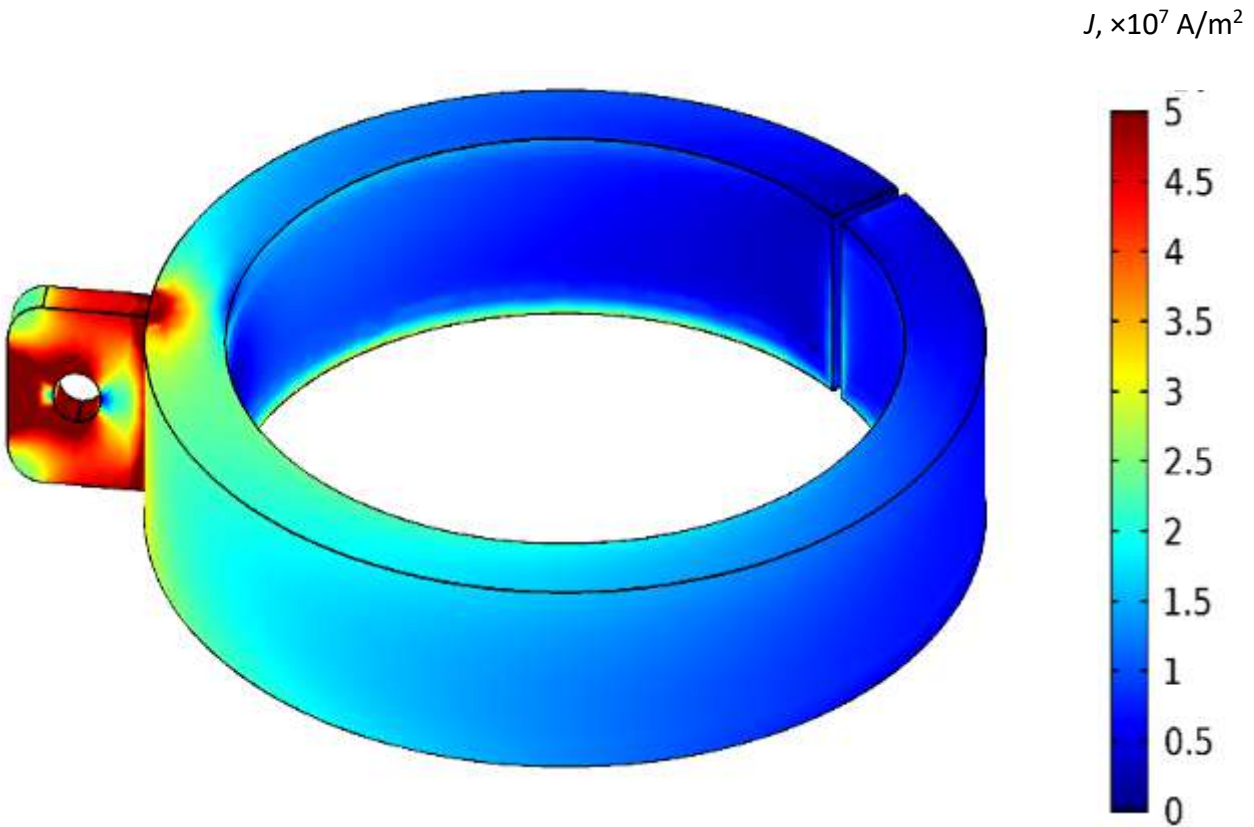


Рис. 2.7 Розподіл густини струму у верхній струмопровідній секції при  $\varphi_1 = 135^\circ$



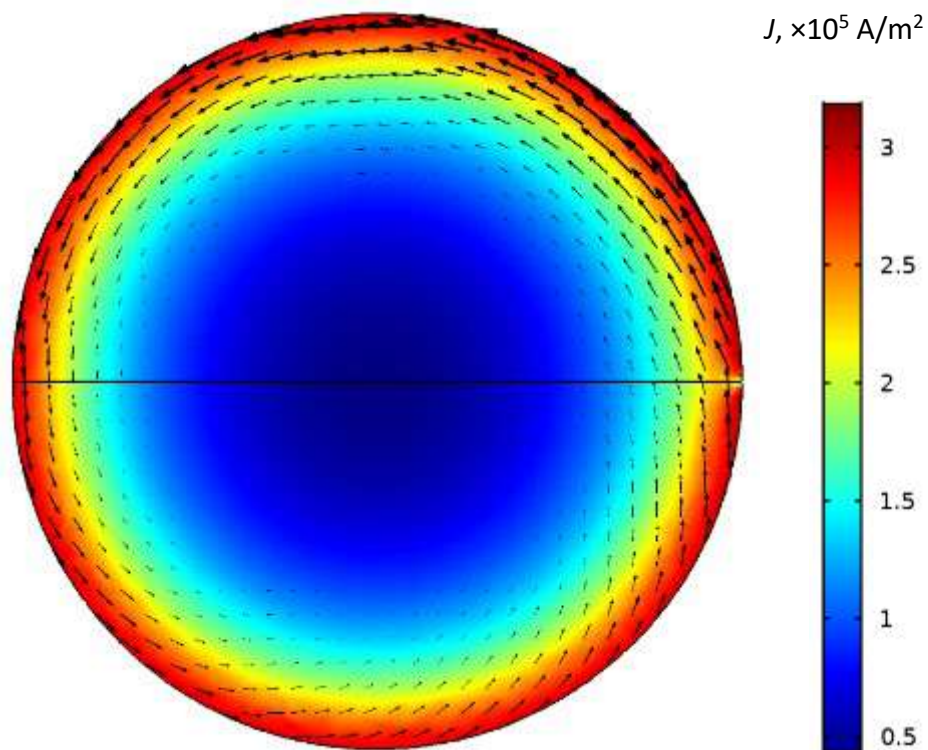


Рис. 2.8 Густина струму та сили в горизонтальному перерізі шлакової ванни при 20 мм від поверхні і при  $\varphi_1 = 3^\circ$

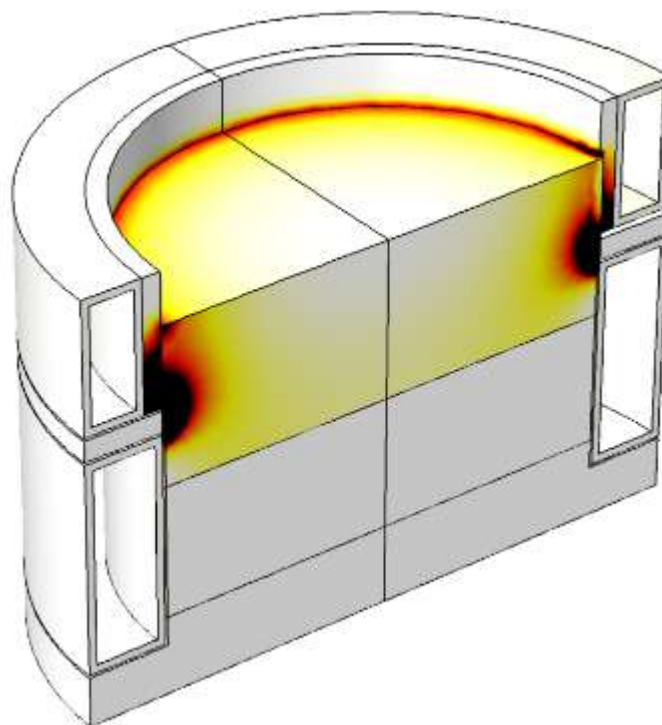


Рис. 2.9 Розподіл об'ємних тепловиділень при  $\varphi_1 = 3^\circ$

Результати моделювання показали, що параметри живлення та інтегральні тепловиділення мало залежать від місця розташування верхньої клеми живлення. Їх значення представлені в табл. 2.2, де  $U$  та  $I$  – напруга та струм джерела живлення відповідно,  $P_{slag}$  – тепловиділення в об’ємі рідкого шлаку,  $P_{cs}$  – тепловиділення в струмопровідній секції,  $P_{gr}$  – тепловиділення в графітовій футеровці. Тобто місце розташування верхнього струмовідводу, в першу чергу, впливає на швидкість обертання рідкого шлаку в кристалізаторі.

Таблиця 2.2

### Розрахункові інтегральні характеристики

Параметр	Значення
$U$ , В	40 (експеримент 35...45)
$I$ , кА	2,33 (експеримент 1,6...2,2)
$P_{slag}$ , кВт	88,4
$P_{cs}$ , Вт	17...60
$P_{gr}$ , Вт	193

### 2.4. Дослідження впливу положення нижнього струмовідводу на електромагнітні процеси у СПК

З’ясуємо, як впливає розташування нижнього струмовідводу на швидкість руху рідкого шлаку. Для цього дослідження були проведені моделювання для двох значень величини кута між клемою верхньої струмопровідної секції та її вертикальним розрізом  $\varphi_1 = 30^\circ$  та  $\varphi_1 = 180^\circ$ . Для кожного із зазначених випадків розглядалися два положення нижньої клеми живлення підкладки –  $\varphi_2 = -90^\circ$  та  $\varphi_2 = 90^\circ$ .

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. 2.10 та рис. 2.11, а

інтегральні характеристики та параметри живлення для досліджених випадків – в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

### Інтегральні характеристики та параметри живлення

Досліджений випадок	1	2	3	4
$\varphi$	$\varphi_1 = 3^\circ$ $\varphi_2 = -90^\circ$	$\varphi_1 = 3^\circ$ $\varphi_2 = 90^\circ$	$\varphi_1 = 180^\circ$ $\varphi_2 = -90^\circ$	$\varphi_1 = 180^\circ$ $\varphi_2 = 90^\circ$
$U, \text{В}$	40	40	40	40
$I, \text{кА}$	2,3103	2,3104	2,3115	2,3117
$P_{slag}, \text{кВт}$	87,416	87,432	87,523	87,522
$P_{cs}, \text{Вт}$	58,4	57,9	16,9	16,9
$P_{gr}, \text{Вт}$	244,1	244,2	244,3	244,3
$F_\psi, \text{Н}$	0,573	0,540	0,017	-0,017

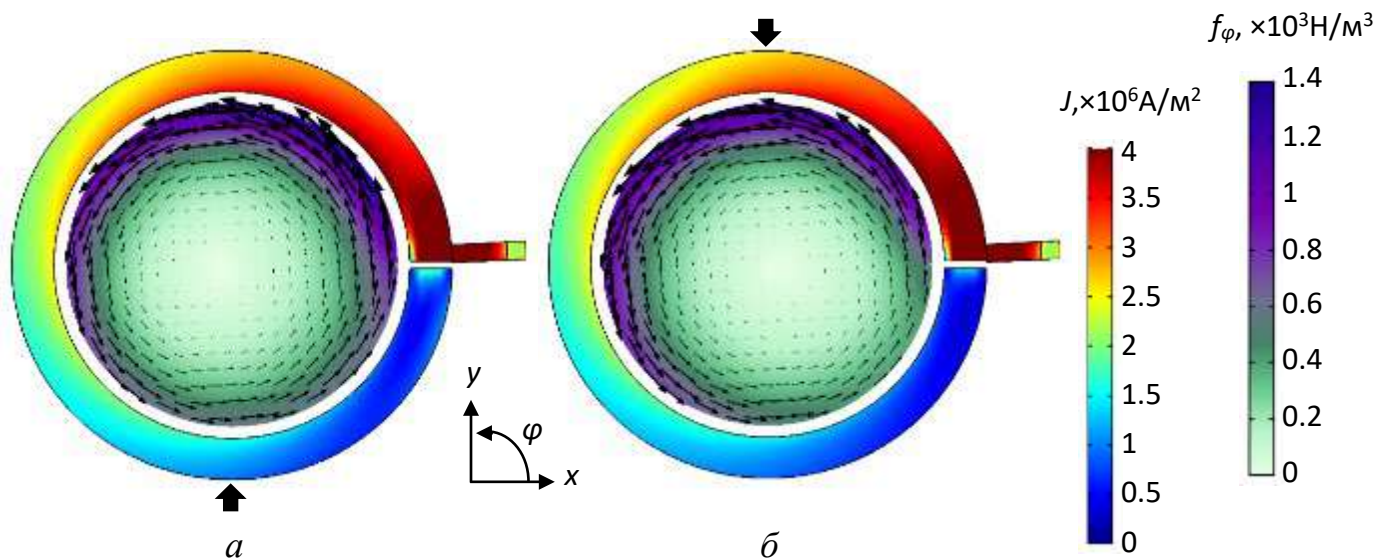


Рис. 2.10 Розподіл густини струму у верхній струмопровідній секції: *a* –  $\varphi_1 = 3^\circ$ ,  $\varphi_2 = -90^\circ$  (випадок 1); *б* –  $\varphi_1 = 3^\circ$ ,  $\varphi_2 = 90^\circ$  (випадок 2);  $\blacktriangleright$  – місце підключення нижньої клеми



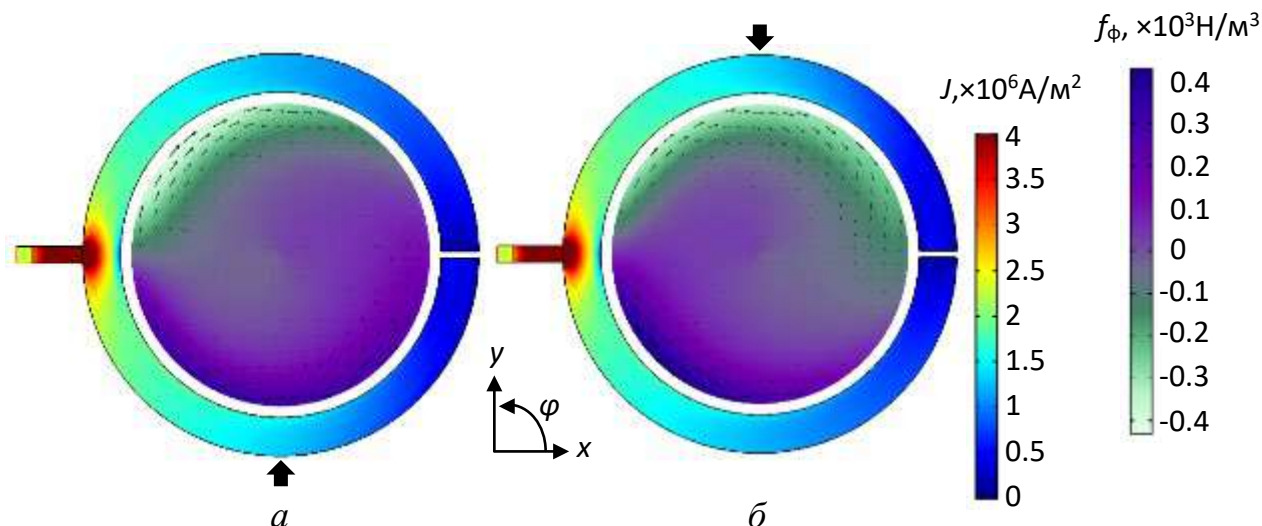


Рис. 2.11 Розподіл густини струму у верхній струмопровідній секції: *a* –  $\varphi_1 = 180^\circ$ ,  $\varphi_2 = -90^\circ$  (випадок **3**); *b* –  $\varphi_1 = 180^\circ$ ,  $\varphi_2 = 90^\circ$  (випадок **4**);  $\blacktriangleright$  – місце підключення нижньої клеми

Із табл. 2.3 видно, що параметри живлення та інтегральні тепловиділення також мало залежать від місця розташування нижньої клеми живлення.

Приклад розподілу інтегралу окружної складової електромагнітних сил по висоті шлакової ванни представлено на рис. 2.12 для досліджуваних випадків з табл. 2.3.

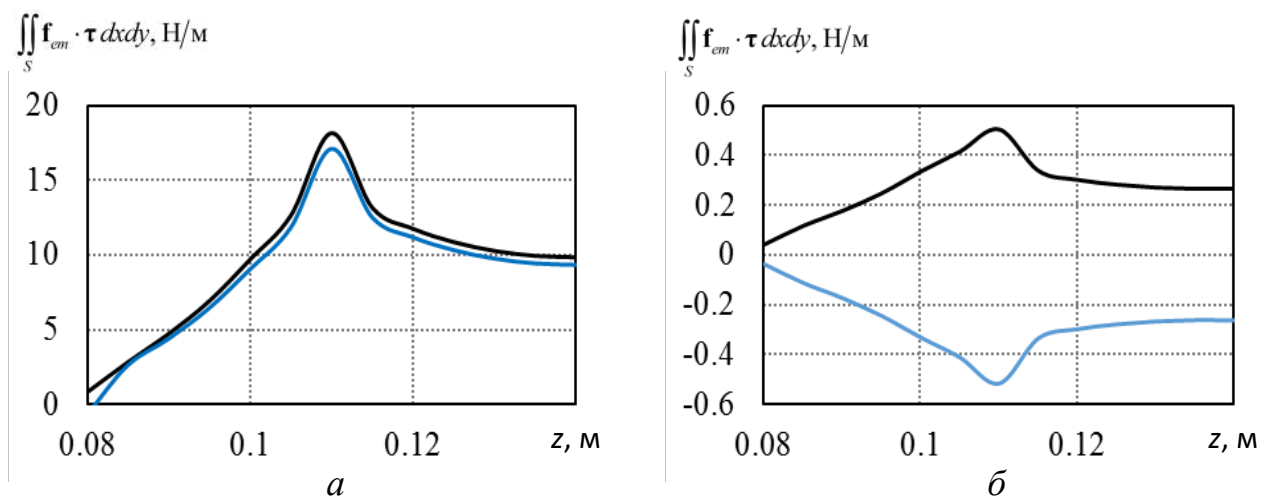


Рис. 2.12 Розподіл інтегралу окружної складової електромагнітних сил по висоті шлакової ванни: *a* – **1, 2**; *b* – **3, 4**

У випадку підключення однієї з клем живлення до верхньої струмопровідної секції під кутом  $\varphi_1 = 3^\circ$  положення нижньої клем впливає як на розподіл електромагнітних сил, так і на інтегральне значення їх окружної складової. Для досліджуваних випадків 1 та 2 (табл. 2.3) різниця в інтегральних значеннях окружної складової електромагнітних сил досягає 5,8%.

У випадку зміщення клем живлення верхньої струмопровідної секції на кут  $180^\circ$  відносно її радіального розрізу інтегральне значення окружної складової електромагнітних сил в шлаковій ванні може бути ненульовим за рахунок асиметрії клем живлення, що під'єднується до підкладки. Залежно від кута  $\varphi_2$  між клемою живлення підкладки та вертикальним розрізом верхньої струмопровідної секції інтегральні сили є додатними або від'ємними. Можна припускати, що характер руху під дією таких сил буде одноконтурним з відповідним напрямком, або двоконтурним з різною величиною та інтенсивністю циркуляції вихорів гідродинамічної течії.

Розподіл інтегралу окружної складової електромагнітних сил по висоті шлакової ванни залежить від положення точок контакту клем живлення з верхньою струмопровідною секцією та підкладкою. Форма кривих є практично однаковою, проте спостерігається різниця в значеннях до 5,8% на рівні 30 мм від поверхні шлакової ванни при порівнянні випадків 1 та 2. Для випадків 3 та 4 криві є ідентичними, проте протилежного знаку залежно від місця підключення нижньої клем.

Таким чином встановлено, що розташування нижнього струмовідводу впливає на величину інтегрального значення окружної складової електромагнітних сил в шлаковій ванні, але її вплив на швидкість обертання рідкого шлаку значно менший, на відміну від впливу місця розташування верхнього струмовідводу. Тому положення нижнього струмовідводу у розглянутих моделях не може бути рекомендований як чинник суттєвого впливу при регулюванні швидкості обертання шлакової ванни.

Зазначимо також, що взагалі найбільші тепловиділення зосереджені на периферії біля стінок кристалізатору, що може призводити до недостатнього

проплавлення центральних областей металу при занадто великих значеннях його діаметру. Але це питання потребує додаткових досліджень з урахуванням зв'язку електромагнітних, гідродинамічних та теплових процесів.

## Висновки за розділом 2

1. Результати тривимірної математичної моделювання електромагнітних характеристик струмопідвідного кристалізатора добре узгоджуються з експериментальними даними, похибка не перевищує 15%.

2. Показано, що ефективно регулювати швидкістю обертання рідкого шлаку можна завдяки місцю підключення верхнього струмовідводу до верхньої струмопровідної секції.

3. 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.

4. Місце розташування нижнього струмовідводу також впливає на величину інтегрального значення окружної складової електромагнітних сил в шлаковій ванні, але її вплив на швидкість обертання рідкого шлаку значно менший, на відміну від впливу місця розташування верхнього струмовідводу.

5. Параметри живлення та інтегральні тепловиділення мало залежать від місця розташування клеми живлення верхньої струмопровідної секції і нижньої клеми живлення підкладки.

6. Найбільші тепловиділення зосереджені на периферії, що може призводити до недостатнього проплавлення центральних областей металу при занадто великих значеннях діаметра кристалізатора.

## РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ І ДОСЛІДЖЕНЬ, ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛИ

### 3.1. Види наплавних матеріалів, способи їхнього виготовлення і вибір робочого флюсу

Для виконання експериментів і досліджень обрано три види наплавних матеріалів: електроди (або безструмові заготовки) великого перерізу, дискретна і рідка присадки. Хімічний склад наплавленого металу представлено у табл. 3.1.

*Таблиця 3.1*

**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 10Р6М5, фракція Ø 315 – 650 мкм	1,1	0,38	0,3	4,1	5,3	–	–	2,83	1,8	6,1	–

Електрод із високохромистого чавуну виготовляли шляхом отримання у відкритій індукційній тигельній печі (ІТП) ємністю 30 кг рідкого металу і його заливання у графітову форму діаметром 120 мм.

Рідку високохромисту наплавну присадку отримували в тій самій печі шляхом плавлення шихтових матеріалів.

Дискретні присадки було отримано за двома технологіями. Наплавний дріб із високохромистого чавуну отримували на пристрої типу «Град» за технологією ФТІМС НАН України шляхом розпилення рідкого струменя металу повітрям (рис.

3.1) [173]. Розмір дробу для виконання експериментів обрано з рекомендацій [174]. Для наплавлення швидкорізальної сталі використовували стандартний порошок ПР-10Р6М5, виготовлений за технологією розпилення рідкого струменя металу азотом.

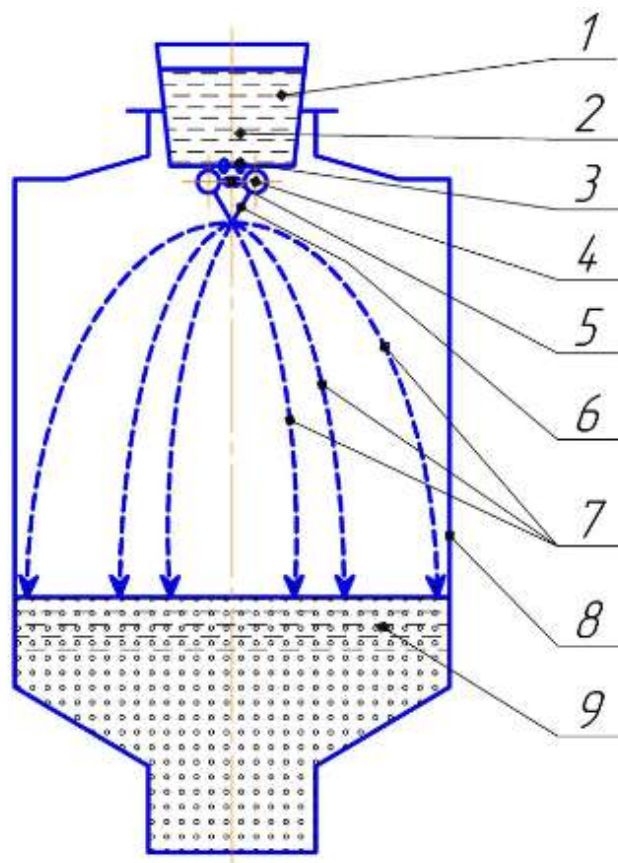


Рис. 3.1 Схема отримання дробу за допомогою енергоносіїв (газу): 1 – проміжний ківш; 2 – рідкий метал; 3 – розливальний стакан; 4 – колектор; 5 - струмінь розплавлення; 6 – потоки енергоносія; 7 – траєкторія падіння гранул; 8 – розпилювальна камера; 9 – охолоджувальна вода

Ливарний електрод зі сталі Х12МФ отримували шляхом переплавлення в ІТП шматків прокату того самого плавлення, що використовується в експериментах з наплавлення і заливання рідкого металу у графітову форму діаметром 70 мм.

Вибір кількох видів наплавних матеріалів, що відрізняються технологією виготовлення, обумовлений тим, що кожна технологія визначає формування своєї мікроструктури наплавного матеріалу. Виходячи з поняття «спадковості» [175], що

застосовується в ливарних технологіях, і при ЕШН в системі електрод-рідка металева ванна – наплавлений метал теж може проявлятися структурна спадковість. Відповідно, обираючи певним способом виготовлений електродний (присадковий) матеріал, можна впливати на структуру та експлуатаційні характеристики наплавленого металу, зокрема на його механічні властивості. Це важливо для розглянутих нами високовуглецевих легованих наплавних матеріалів, особливо високохромистих чавунів, які в більшості випадків використовуються в ливарному вигляді, без проведення термічної і механічної обробки [136]. У ливарному виробництві цими закономірностями передачі структури і властивостей вже успішно користуються [176, 177]. Хоча все ж таки навіть при литті ця тема поки що залишається дискусійною.

Тим більше виникають сумніви у разі припущення такого зв'язку властивостей між переплавним наплавним матеріалом і наплавленим металом стосовно електрошлакового наплавлення, при якому формується відносно невелика ванна рідкого металу, що швидко кристалізується. Однак Ю.М. Кускову з колегами на прикладі ЕШН у струмопідвідному кристалізаторі дробом з високохромистого чавуну вдалося довести, що в цій наплавній технології є можливість регулювання структури наплавленого чавуну шляхом плавлення присадки певного розміру [174].

Для електрошлакового наплавлення в стаціонарному струмопідвідному кристалізаторі було обрано флюс марки АНФ-29. Хоча спочатку він розроблявся для електрошлакового переплавлення у рухомих кристалізаторах [178], але згідно з результатами досліджень [157] цей флюс придатний для ЕШН не тільки в рухомих кристалізаторах, а й у стаціонарних. До його переваг можна віднести і те, що він виробляється у промисловому масштабі.

Для наплавлення електродами зі сталі Х12МФ застосовано найбільш поширений в електрошлакових технологіях флюс АНФ-6-1 ДСТУ 4025-2001.

### 3.2. Методика проведення експериментів, наплавкове обладнання і прилади, що застосовуються для їхнього виконання

Для наплавлення електродом і дробом з високохромистого чавуну та порошком зі сталі Р6М5 використовували трисекційний струмопідвідний кристалізатор діаметром 180 мм (рис. 3.2). Для виключення при напавленні обертання шлакової ванни, поздовжній розріз в струмопідвідній секції закорочували мідним вкладишем. Наплавлення катаним і ливарним електродами зі сталі Х12МФ виконували у звичайному водоохолодному кристалізаторі діаметром 120 мм. Звичайний кристалізатор діаметром 180 мм використовували і для наплавлення рідкою присадкою.



Рис. 3.2 Струмопідвідний кристалізатор  $\varnothing$  180 мм

Електрошлакові наплавлення виконували на наплавному приладі (апарат А-550У, призначеному для електрошлакового зварювання (ЕШЗ) пластинчастим

електродом), у якому замість струмопідвідного затискача і направляючого кронштейна (рис. 3.3) закріплено водоохолоджувальний невитратний електрод з графітовим наконечником (рис. 3.4). Таке конструктивне виконання дозволяє здійснити твердий старт у початковий період розведення у СПК шлакової ванни. Після її наведення (при цьому ванна електрично з'єднує струмопідвідну секцію з піддоном) і стабілізації електрошлакового процесу графітовий наконечник знімається і процес забезпечується за рахунок СПК. Замість наконечника закріплюється за допомогою проміжної втулки з внутрішнім різьбленням, що відповідає різьбленню водоохолоджувального ніпеля, витратний електрод (при наплавленні електродом). При наплавленні дискретною присадкою водоохолоджувальний електрод з графітовим наконечником видаляється з робочої зони кристалізатора і замість нього встановлюється електромагнітний дозатор подачі присадки (рис. 3.5).

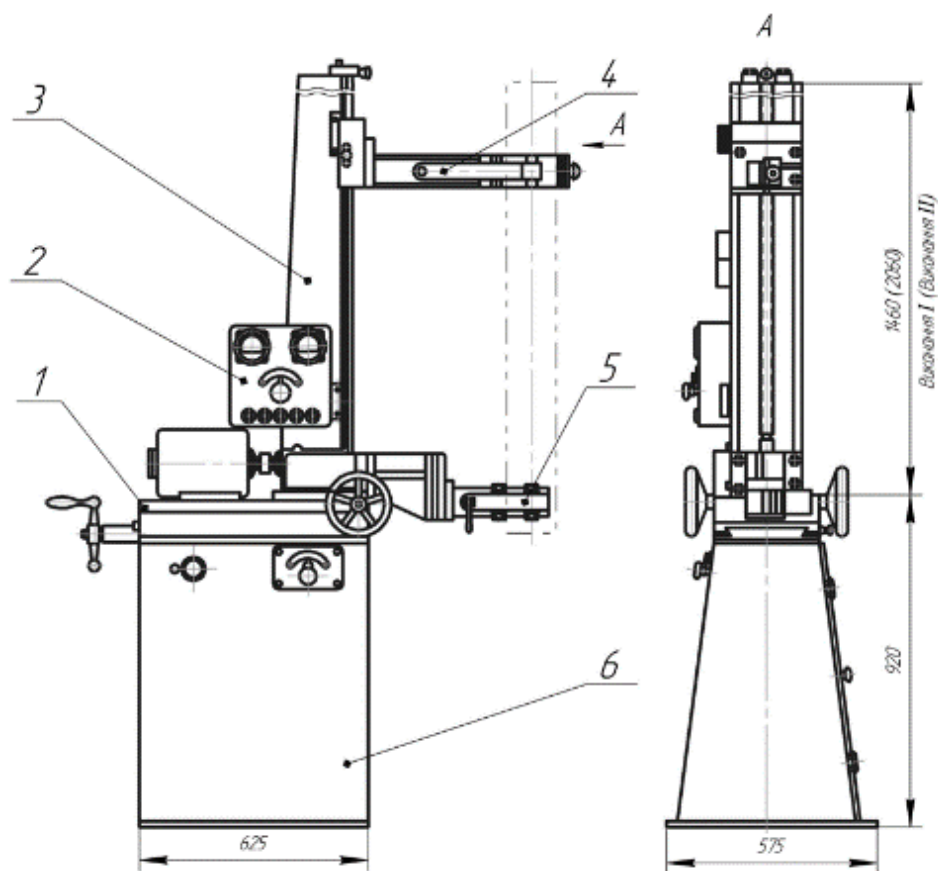
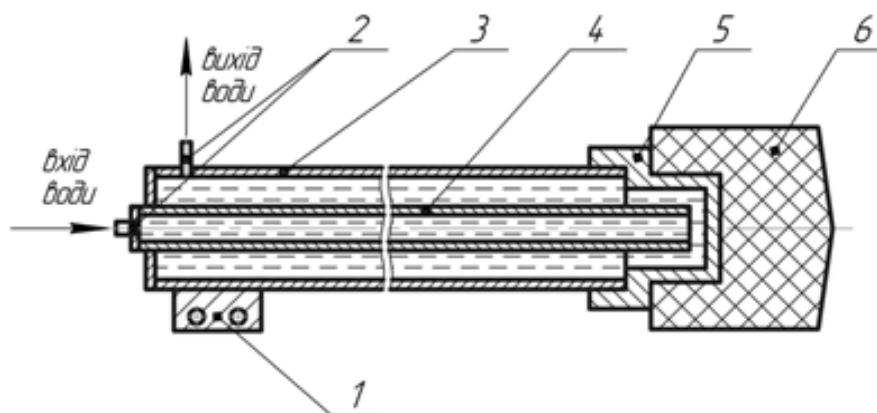


Рис. 3.3 Апарат А-550У для ЕШЗ: 1 – супорт налаштування; 2 – пульт управління;  
3 – колона; 4 – затискач струмопідвідний; 5 – кронштейн; 6 – станина





а



б

Рис. 3.4 Зовнішній вигляд (а) і схема конструкції неплавкого мідного водоохолоджувального електрода з графітовим наконечником (б): 1 – струмопідвід для приєднання силового кабелю; 2 – патрубки для підведення і виведення води; 3 – зовнішня труба (корпус); 4 – внутрішня труба; 5 – мідний ніпель; 6 – графітовий наконечник

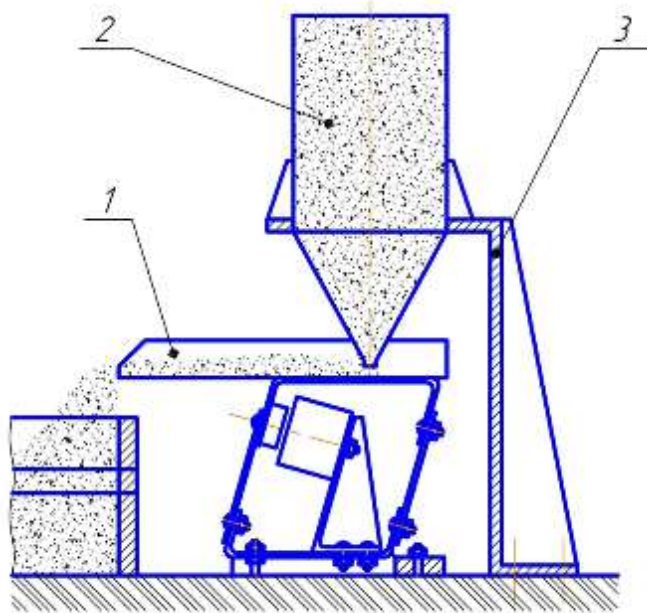


Рис. 3.5 Вібродозатор: 1 – робочий короб; 2 – щілинний бункер; 3 – кронштейн



У зв'язку зі складнощами забезпечення спільної роботи індукційної печі і струмопідвідного кристалізатора ЕШН рідкою присадкою було виконане за схемою з використанням звичайного кристалізатора (рис. 3.7).

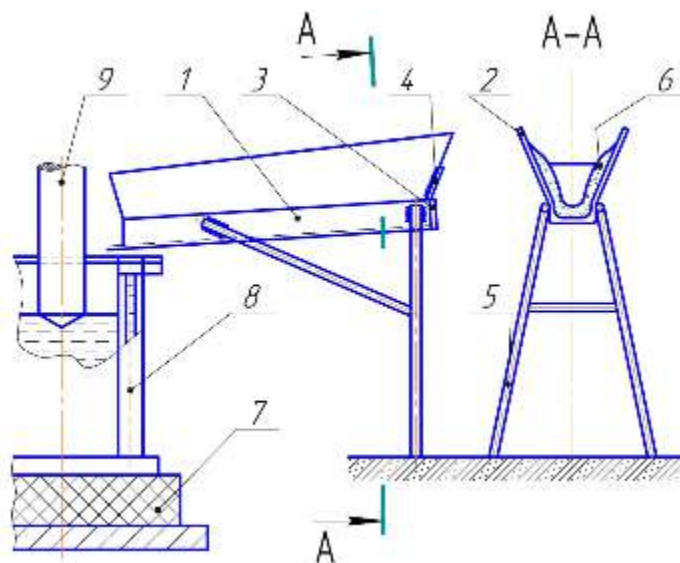


Рис. 3.7 Схема ЕШН рідкою присадкою: 1 – напрямна площина лотка; 2 – боковини лотка; 3 – заглушка; 4 – задня стінка лотка; 5 – стійка; 6 – магнезитове набиття; 7 – графітова шайба; 8 – кристалізатор; 9 – графітовий електрод

Технологію виготовлення рідкої присадки і виконання з нею електрошлакового наплавлення здійснювали таким чином: після розплавлення шихти в індукційній печі метал розкисляли Fe-Si і Fe-Mn та додатково розріджували шлак введенням невеликої кількості  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ . Паралельно у кристалізаторі діаметром 180 мм, встановленому на графітовій шайбі, графітовим електродом наводили шлакову ванну (флюс АНФ-29) глибиною приблизно 65 мм. Перед заливанням у кристалізатор рідкого металу електрод відключався від джерела живлення. При заливанні рідкий метал по похилому лотку зливався в кристалізатор (струмінь прямував на електрод). Час заливання приблизно 8...10 секунд. Після заливання на електрод знову подавалася напруга і здійснювався прогрів металу протягом приблизно 3 хвилин.

Наплавлення електродами (катаний і ливарний) зі сталі Х12МФ виконували у звичайному кристалізаторі діаметром 120 мм на флюсі АНФ-6-1 з використанням

сталевій заготовці товщиною 30 мм за звичайною технологією електрошлакового переплавлення. При цьому товщина наплавленого шару склала приблизно 80 мм, на відміну від шарів, наплавлених на шайбі графіту, що мають товщину 30...40 мм. Це дозволило при виготовленні шліфів виключити шар металу, що вийшов при перемішуванні наплавленого металу і металу заготовки (основного металу).

Виконання експериментальних наплавлень у звичайному кристалізаторі обумовлено прагненням не допустити можливий вплив на процеси кристалізації коливань кутової швидкості обертання шлакової ванни.

### **3.3. Методики виготовлення шліфів і виконання металографічних досліджень наплавленого металу**

У результаті наплавлення у СПК отримали якісні зливки з хорошим формуванням як верхньої (рис. 3.8), так і бічної поверхні. Зливки добре відокремлювалися від підкладки («шайби»), її робоча поверхня мало змінювала свої розміри.

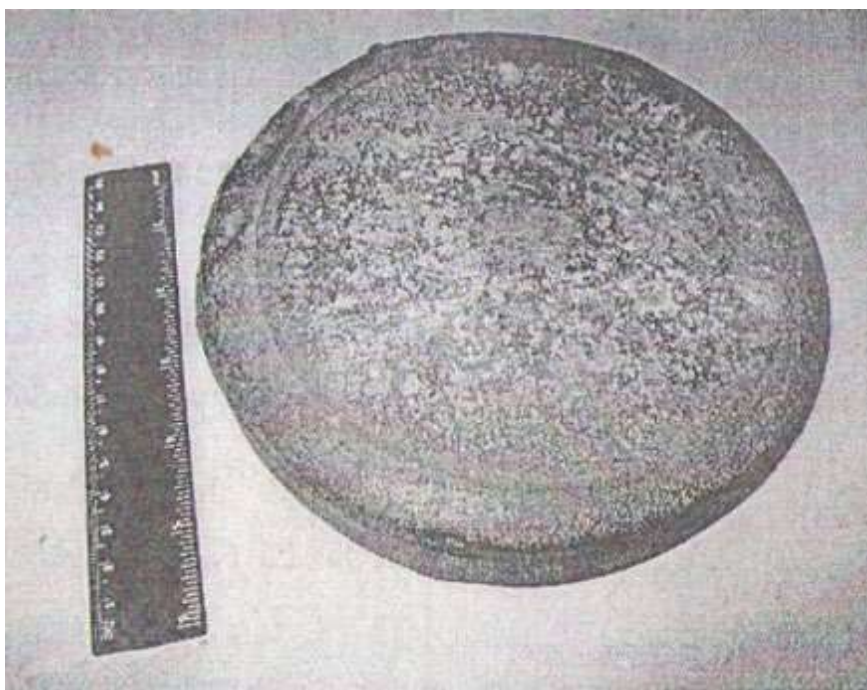


Рис. 3.8 Зовнішній вигляд експериментального зливка

З наплавлених злитків абразивними кругами вирізали зразки, згідно зі схемою, представленою на рис. 3.9.

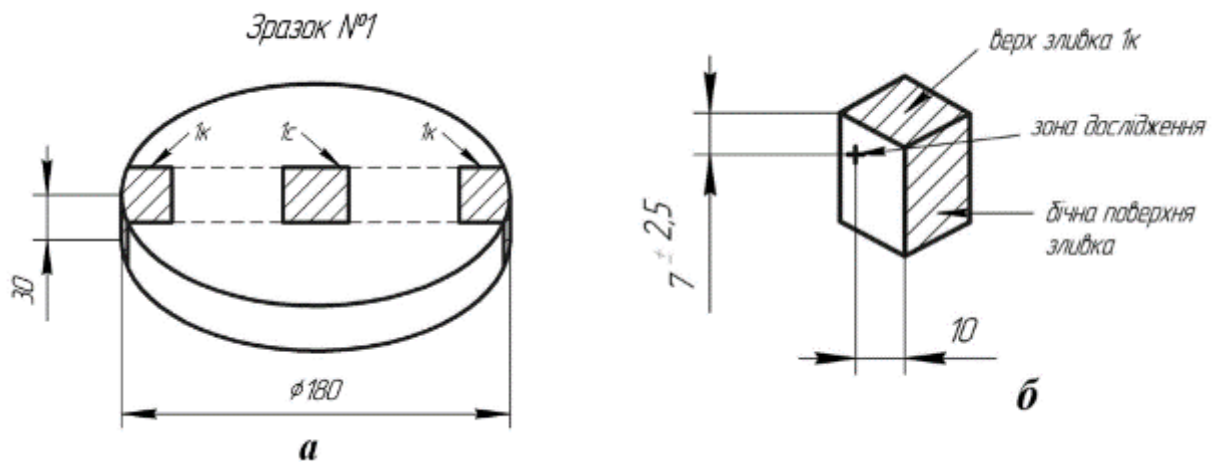


Рис. 3.9 Схема вирізки зразків для металографічного дослідження: 1к - край зливка; 1с – середина зливка

Для порівняння умов кристалізації по всьому перерізу зливка зразки вирізалися з країв «К» і середини «С». Для недопущення впливу на кристалічний метал поверхневого охолодження, термічного впливу при різанні абразивними кругами і охолодження від стінок кристалізатора зони металографічного дослідження обиралися згідно з рис. 3.9.

Аналогічних вимог було дотримано і при виготовленні металографічних зразків, отриманих зі злитків (заготовок), наплавлених у звичайних кристалізаторах. У зразках, вирізаних зі сталі Х12МФ (для оцінки структурної спадковості в системі метал електрода – метал зливка), досліджувалась лише одна зона, розташована в середині між зонами із символами «К» і «С».

Усі зразки для металографічних досліджень виготовляли із застосуванням алмазних паст різної дисперсності. Для виявлення мікроструктури зразки були протруєні хімічно в 4% розчині азотної кислоти в спирті.

Металографічні дослідження здійснювали на мікроскопі НЕОРНОТ-32 при різних збільшеннях. Цифрове зображення мікроструктур отримано за допомогою

фотокамери OLYMPUS. Для кількісного визначення фазового і структурного об'ємного складу металу використовували лінійний метод Розиваля. Кількісне визначення фазового складу засноване на такому положенні, що випливає з принципу Кавальєрі: якщо відрізки випадкової січної, що проходить через різні фази сплаву, виявлені на шліфі, знаходяться між собою в деяких постійних відношеннях, то відповідні фази знаходяться в тих самих кількісних відношеннях. При цьому зазначені співвідношення зберігаються й у відношеннях фаз в обсязі шліфу.

Для оцінки структурних відмінностей необхідно обрати критерій, який найбільш правильно відображає зміни, що відбуваються в структурі металу. Критерієм оцінки дендритної структури було обрано вимір середньої відстані між осями другого порядку (дендритний параметр) під мікроскопом VERSANET UNION зі збільшенням у 500 разів на 10...15 полях зору. Що стосується формування комірчастої структури (сталеві зразки) структурним критерієм слугував середній розмір осередків у полі зору мікроскопа.

На жаль, перед сучасними дослідженнями стоїть унікальне завдання – працювати з недосконалими мікрофотографіями реального світу, для чого потрібен гнучкий набір інструментів. Тому для оцінки найбільш складних структур додатково використовували програмне забезпечення MIPAR.

Вимірювання твердості за Роквеллом проводили на приладі ТК-2М при навантаженні 150 кг. Мікротвердість вимірювали на твердомірі М-400 фірми LECO при навантаженні 100 г. Кількість  $\alpha$ -фази вимірювали на феритометрі FERRITGEHALTMESSER 1.053.

Для металографічного дослідження представлено 10 видів зразків, виготовлених із металу, наплавленого за різними технологіями. У цьому передбачалося розв'язати завдання, зазначені у таблиці 3.2.

Як зазначалося раніше, електрошлакове наплавлення рідким металом (зразок №6) здійснювалося у звичайному кристалізаторі у зв'язку зі складністю поєднання



двох процесів: отримання в ІТП рідкої присадки і виконання нею процесу наплавлення. З іншого боку, у цьому випадку виключалося обертання шлакової ванни.

Використання для електрошлакового наплавлення катаним і ливарним електродом зі сталі Х12МФ (зразки №№ 9 і 10) звичайного кристалізатора дозволяло виключити вплив навіть невеликих коливань швидкості обертання шлакової ванни на структурування наплавленого металу.

Таблиця 3.2

### Способи наплавлення і завдання дослідження наплавленого металу

№ зразка	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 структурування 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 структурування наплавленого металу
3	Наплавлення у СПК електродом із високохромистого чавуну (без обертання шлакової ванни)	Оцінка впливу обертання шлакової ванни на структурування наплавленого металу
4	Наплавлення у СПК заготівкою із високохромистого чавуну (відключення електроживлення електрода)	Оцінка впливу виду переплавленого металу (електрод/заготівка) на структурування наплавленого металу
5	Наплавлення у СПК дробом із високохромистого чавуну	Оцінка впливу дискретної присадки на структурування наплавленого металу
6	Наплавлення рідким високохромистим чавуном у звичайному кристалізаторі	Оцінка впливу рідкої присадки на структурування наплавленого металу
7	Наплавлення у СПК порошком сталі Р6М5 (без обертання шлакової ванни)	Оцінка впливу обертання шлакової ванни на структурування наплавленого металу
8	Наплавлення у СПК порошком сталі Р6М5 (з обертанням шлакової ванни)	Оцінка впливу обертання шлакової ванни на структурування наплавленого металу
9	Наплавлення катаним електродом зі сталі Х12МФ у звичайному кристалізаторі	Оцінка впливу структури переплавленого металу на структурування наплавленого металу
10	Наплавлення ливарним електродом зі сталі Х12МФ у звичайному кристалізаторі	Оцінка впливу структури переплавленого металу на структурування наплавленого металу

### Висновки за розділом 3

1. Обґрунтовано та обрано основні види наплавкових матеріалів, які зазвичай застосовуються при ЕШН у СПК, показані способи їхнього виготовлення. Запропоновано робочі флюси для виконання електрошлакових наплавлень.
2. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень у кристалізаторах звичайного виконання та СПК з використанням як модифікованого стандартного наплавного обладнання, так і приладів, що забезпечують проведення експериментів.
3. Запропоновано методики виготовлення шліфів і виконання металографічних досліджень наплавленого металу, що дозволяють об'єктивно оцінювати отримані результати експериментальних досліджень.
4. Показано завдання дослідження, які необхідні вирішити під час виконання кожного технологічного способу наплавлення.
5. Показано можливість отримання якісного з'єднання основного та наплавленого металів при ЕШН у СПК у порівнянні з наявними способами отримання біметалу для виробів гірничо-металургійного обладнання.



## **РОЗДІЛ 4. ВПЛИВ ВИДУ НАПЛАВКОВОГО МАТЕРІАЛУ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАПЛАВЛЕННЯ НА ФОРМУВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ**

Працездатність виробу, наплавленого будь-яким наплавним матеріалом, особливо в умовах дії ударних навантажень і абразивного зношування визначається двома характеристиками наплавленого металу – його зносостійкістю і здатністю протистояти постійним або циклічним ударам, тобто міцнісними показниками, особливо ударною в'язкістю.

Високохромисті чавуни є найбільш застосовуваними зносостійкими сплавами. Кращі результати опору зношування показують лише тверді сплави, але застосування таких сплавів обмежене через їхню високу крихкість.

У зв'язку зі складністю механічної обробки високохромисті чавуни зазвичай застосовують у ливарному вигляді. Виготовляти їхні зразки з метою оцінки механічних властивостей металу дуже складне завдання. Однак відомо, що дрібнозерниста структура металу характеризується підвищеними показниками пластичності і найчастіше ударної в'язкості.

Тому в цих дослідженнях ставилося завдання непрямої оцінки міцнісних характеристик наплавленого високохромистого чавуну шляхом вивчення його мікроструктур, що відповідають металу, отриманому за тією чи іншою технологією наплавлення. Технологію, що забезпечує отримання в наплавленому металі найбільш дисперсної структури, слід рекомендувати для ЕШН у СПК деталей, що експлуатуються в умовах ударно-абразивного зношування і тим більше при зношуванні за відсутності таких навантажень, або при їхніх незначних величинах.

При цьому за базовий варіант приймався спосіб ЕШН у звичайному кристалізаторі, який являє собою формуючу секцію СПК, що використовується в дослідженнях, при відключеній від джерела живлення (після наведення шлакової ванни) його струмопідвідної секції.

#### 4.1. Мікроструктура наплавленого металу при різних технологічних способах наплавлення

##### 4.1.1. Ливарним електродом із високохромистого чавуну у звичайному кристалізаторі (базовий варіант)

Мікроструктура наплавленого металу зразка № 1 «К» – наплавлення у звичайному кристалізаторі електродом (табл. 3.2), відображена на рис. 4.1 і являє собою мартенситну матрицю з твердістю HV 1 – 4880 МПа, в якій розташовуються надлишкові карбіди у вигляді пластинчастих виділень віялоподібної форми, а також шестигранні та прямокутні карбіди, рівномірно розподілені на матриці. Ще одним елементом структури є евтектичні колонії (HV 1 – 6060...6130 МПа) витягнутої форми, що мають в середньому розміри 200x400 мкм, 150x240 мкм. Співвідношення структурних складових у зразку № 1 «К» – поверхня формування біля стінки кристалізатора така: евтектики 40...42 %, карбідів віялоподібної форми – 28...30 %, решта – матрична основа, що включає дисперсні карбіди.

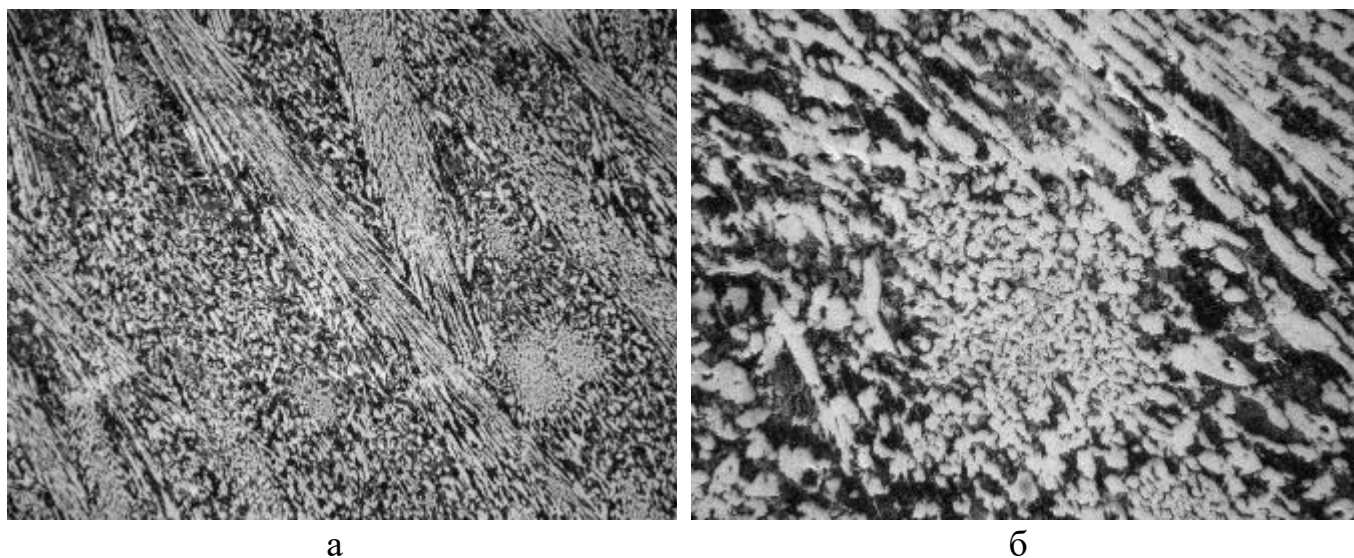


Рис. 4.1 Мікроструктура металу зразка № 1 «К»: а – x100; б – x400

На рис. 4.2 представлено структуру зразка № 1 «С». Видно, що відбулося дроблення карбідів витягнутої форми, збільшилася кількість евтектичної складової.

Вона набуває більш круглої форми із середнім діаметром 50...150 мкм. Загалом структура дисперсніша, ніж у зразку № 1 «К». Співвідношення структурних складових зразка № 1 «С» таке: 55...57 % евтектики, 10...18 % карбідів витягнутої форми, решта – матриця з рівномірно розподіленими карбідами. Твердість за Роквеллом становить 46, 49 одиниць HRC і 49 одиниць HRC для зразків №№ 1 «К» і 1 «С» відповідно.

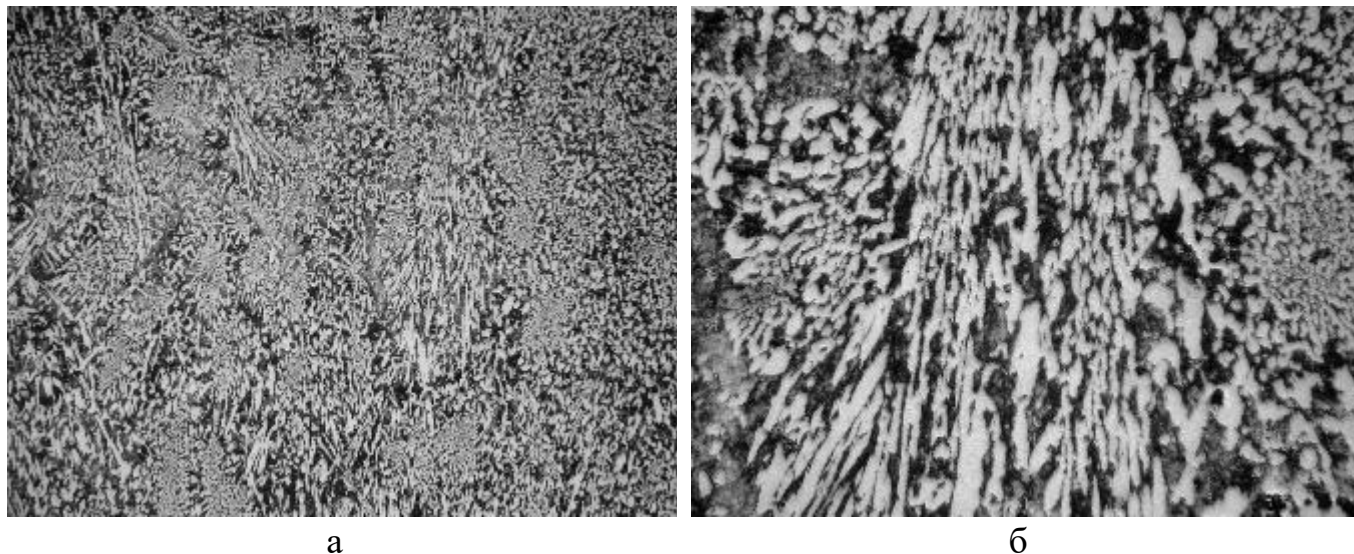


Рис. 4.2 Мікроструктура металу зразка № 1 «С»: а – х100; б – х400

#### 4.1.2. Ливарним електродом із високохромистого чавуну у СПК

Мікроструктури наплавленого металу зразків № 2 «К» і № 2 «С» (табл. 3.2) представлені на рис. 4.3 і 4.4 відповідно. У металі зразка № 2 «К» у мартенситній матриці розташовані витягнуті карбіди віялоподібної форми і карбіди шестигранного огранювання, часто оточені евтектичними колоніями. У структурі металу евтектика займає 25...36 %, карбіди віялоподібної форми – 28...36 %. Структура металу зразка № 2 «С» істотно не відрізняється від зразка № 2 «К». Евтектика займає 23...30%, карбіди віялоподібної форми – 28...30%. Розмір евтектичних колоній відносно невеликий – 50x100 і 70x120 мкм.

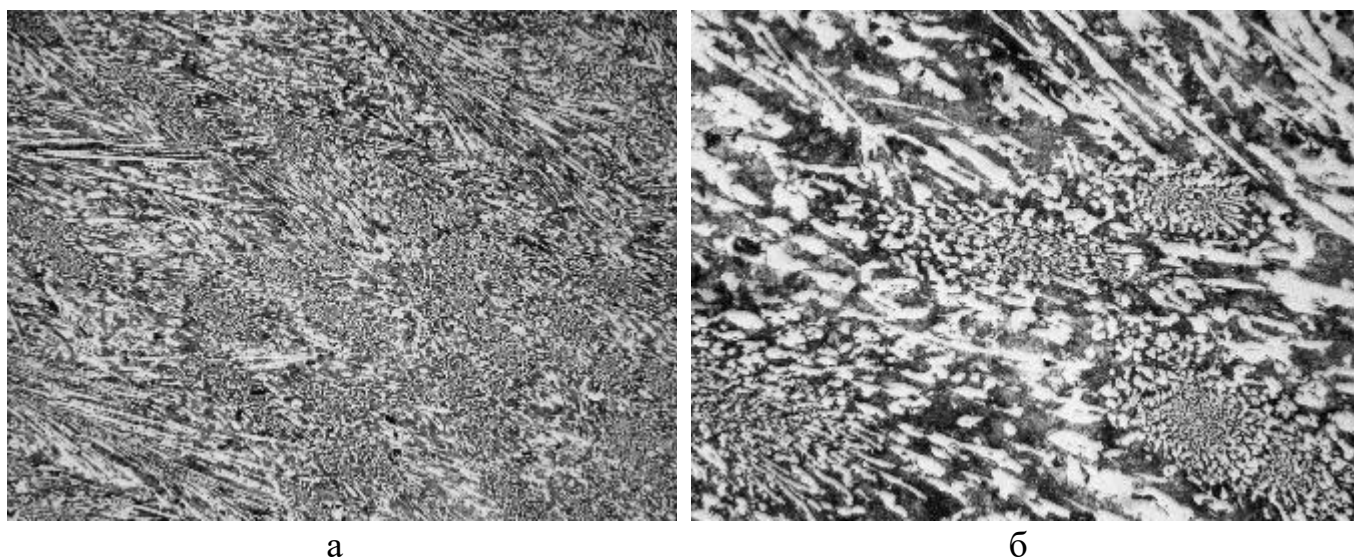


Рис. 4.3 Мікроструктура металу зразка № 2 «К»: а – x100; б – x400

Порівняння мікроструктур металу, наплавленого у звичайному кристалізаторі (базовий варіант) і СПК, показує такі відмінності: у структурі металу, наплавленого за базовою технологією, формується велика кількість евтектики – від 40...42 % до 55...57 % (об'ємна частка) залежно від зони дослідження (відповідно до типів «К» і «С»), і в середньому менша кількість карбідів віялоподібної форми – приблизно 10%. Причому при наплавленні у звичайному кристалізаторі спостерігається відносно велика відмінність у розподілі як евтектики, так і карбідів по поперечному перерізу шару – відповідно на 37 % і більш ніж удвічі. Розміри евтектичних колоній у металі базового варіанта у 2...4 рази більше.

Таке формування структур призводить і до відмінностей у значеннях макротвердості (HRC) металу, наплавленого за різними технологіями:

- базовий варіант: № 1 «К» – 49; № 1 «С» – 49.
- наплавлення у СПК: № 2 «К» – 52; № 2 «С» – 52.

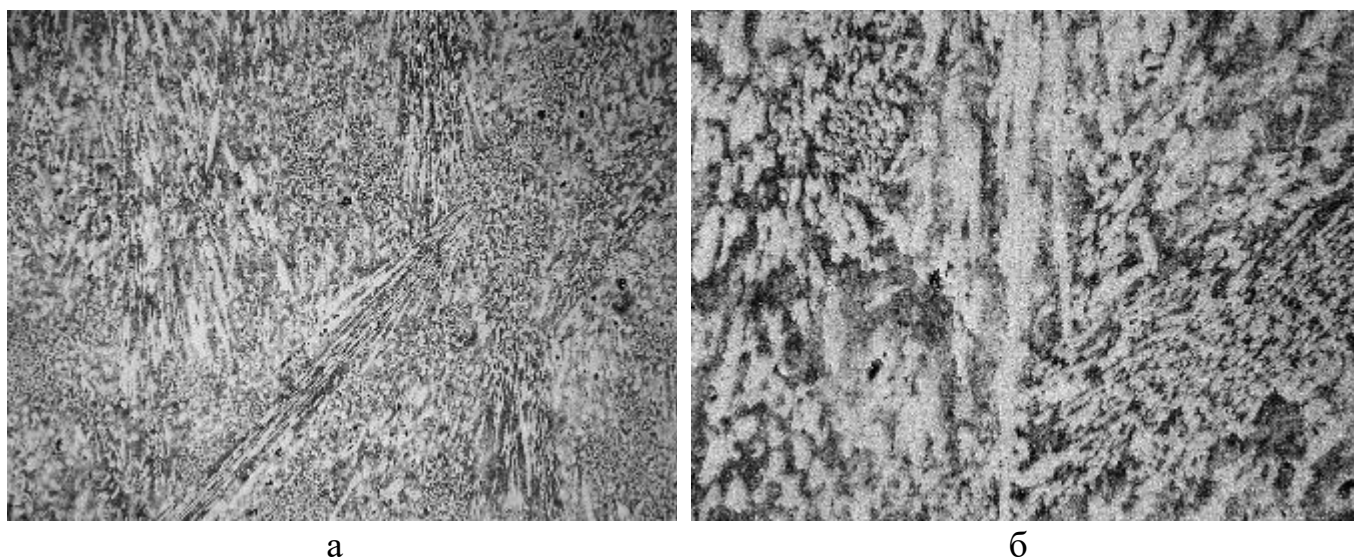


Рис. 4.4 Мікроструктура металу зразка № 2 «С»: а – х100; б – х400

#### **4.1.3. Ливарним електродом з високохромистого чавуну у СПК з електрично замкненою струмопідвідною секцією**

Як впливає з підрозділу 1.3, у разі виключення вертикального розрізу в струмопідвідній секції СПК вона з одновиткового індуктора перетворюється просто на струмопідвідну додаткову циліндричну секцію кристалізатора (по типу формуючої секції). Іншими словами, у такому конструктивному виконанні обертання шлакової ванни при наплавленні не відбувається.

Цей експеримент дозволяє оцінити при наплавленні електродом великого перерізу вплив обертання шлакової ванни на структуроутворення наплавленого металу.

На рис. 4.5 представлена структура наплавленого металу зразка № 3 «К» (табл. 3.2), її характер однаковий зі структурою металу зразка № 2. У мартенситній матриці, що має твердість HV 1 – 4590...4640 МПа, розташовані витягнуті карбіди віялоподібної форми і карбіди шестигранного огранювання (HV 1 – 11870...12880 МПа), часто оточені евтектичними колоніями, твердість яких становить HV 1 – 4930...6060 МПа. Евтектика займає 38...45 %, карбіди віялоподібної форми – 12...21 %, карбіди гексагонального огранювання – 6...8 %, решта – матриця.

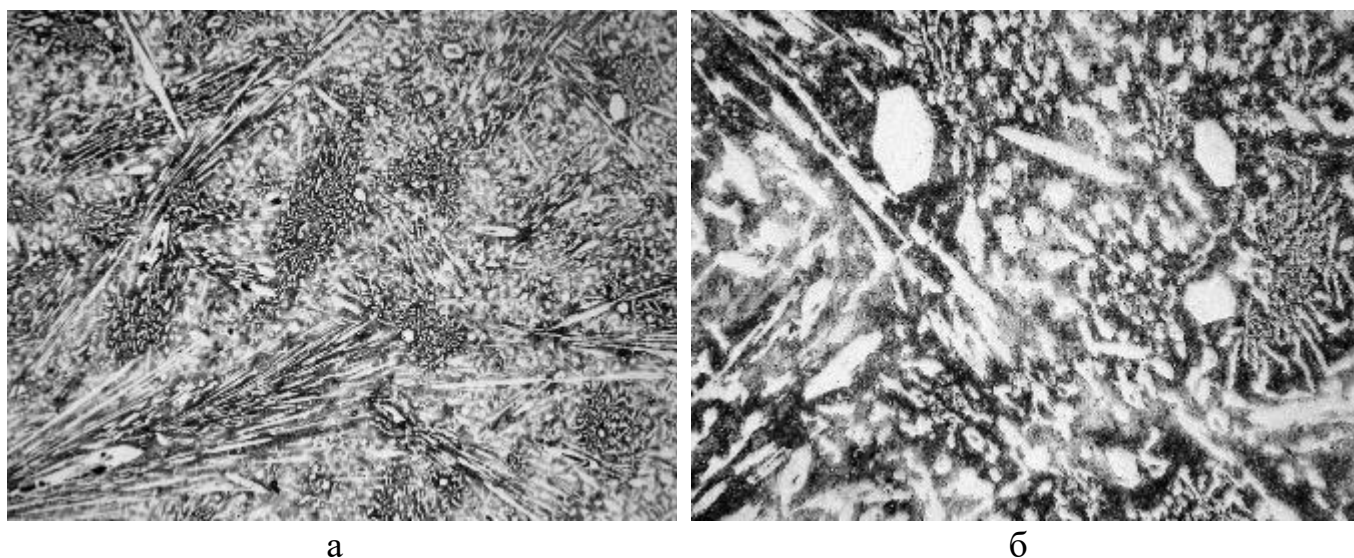


Рис. 4.5 Мікроструктура металу зразка № 3 «К»: а – х100; б – х400

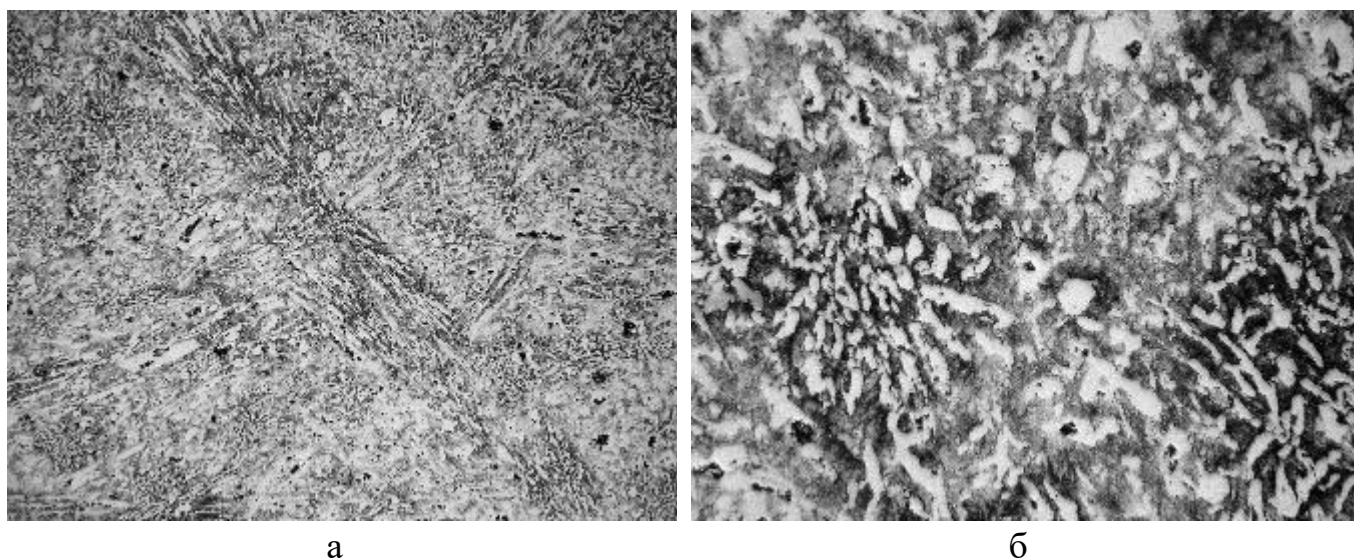


Рис. 4.6 Мікроструктура металу зразка № 3 «С»: а – х100; б – х400

Структура зразка № 3 «С» представлена на рис. 4.6 і вона суттєво не відрізняється від № 3 «К». Структурні складові ті самі, але характеризуються незначним подрібненням. Евтектика займає 38...40%, карбіди віялоподібної форми – 9...21%, карбіди гексагонального огранювання – 5...6%. Твердість за Роквеллом 46, 49, 48 і 49, 49, 51 одиниць НРС для зразків №№ 3 «К» і 3 «С» відповідно.



Порівняно з металом зразків № 2, усі структурні складові значно грубіші. Розмір евтектичних колоній приблизно в 3 рази більший, що позначається на загальній макротвердості металу.

#### 4.1.4. Ливарною безструмовою заготівкою з високохромистого чавуну у СПК

Відповідно до [158], розплавлення в шлаковій ванні, що нагрівається завдяки протіканню в ній електричного струму від струмопідвідної секції СПК, безструмової заготівки дозволяє отримати плоску металеву ванну. У роботі [179] зазначається, що наплавлення безструмової заготівкою доцільно застосовувати в тих випадках, коли, незважаючи на підвищену витрату електроенергії, отримання мінімального проплавлення є обов'язковою умовою з'єднання металів з властивостями, що різко відрізняються, і однозначно утворюють в зоні сплавлення крихкі структури навіть при незначному їхньому перемішуванні.

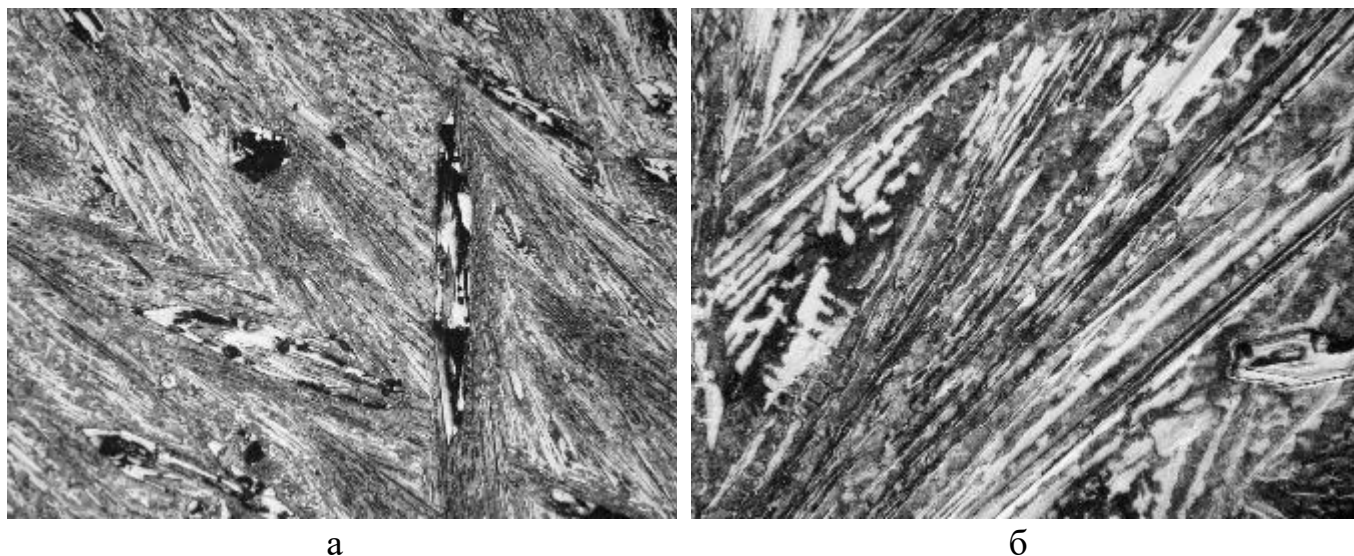


Рис. 4.7 Мікроструктура металу зразка № 4 «К»: а – х100; б – х400

Мікроструктура зразка № 4 «К» (табл. 3.2), зображена на рис. 4.7 являє собою витягнуті карбідні пластини, розташовані у напрямку тепловідведення і великі первинні карбіди ланцетовидної форми, що мають твердість HV 1 – 10970...11150 МПа. Спостерігаються евтектичні колонії, середній діаметр яких 100...120 мкм і

твердість HV 1 – 6060 МПа. Співвідношення структурних складових зразка № 4 «К» – 12% евтектики, 21...33% карбідів ланцетовидної форми, 39% карбідів витягнутої форми.

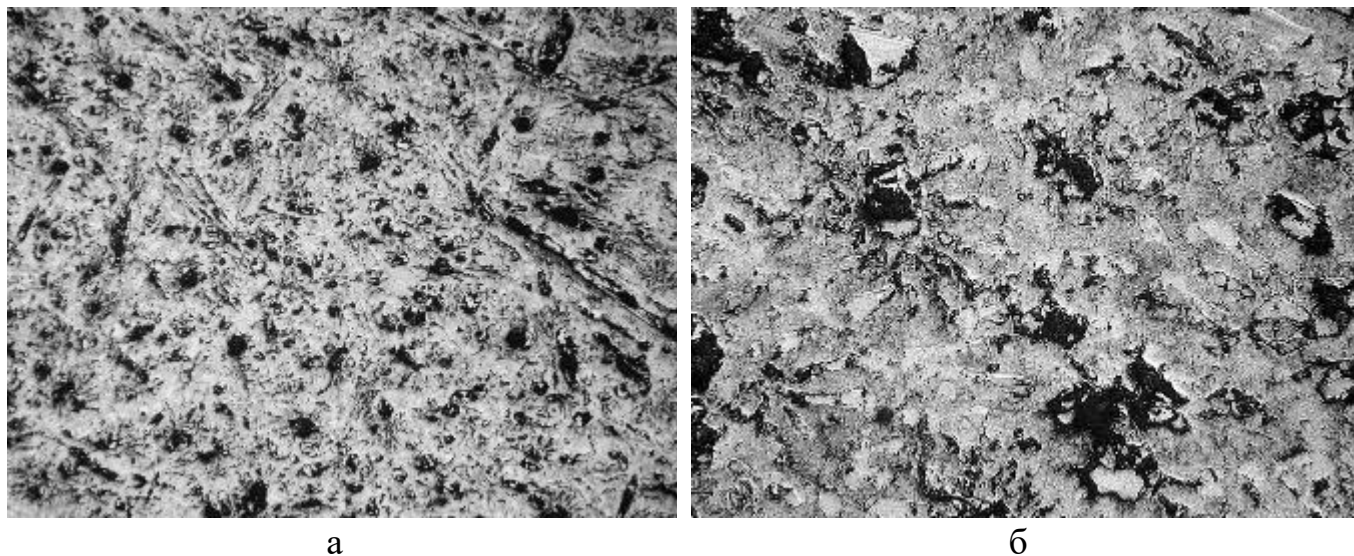


Рис. 4.8 Мікроструктура металу зразка № 4 «С»: а – х100; б – х400

У зразку № 4 «С» – структура роздроблена, дисперсна (рис. 4.8). Твердість HV 1 основи – 5420...5480 МПа, карбідних частинок – 10480...10970 МПа.

46, 50, 51 і 50, 50, 51 одиниць HRC для зразків №№ 4 «К» і 4 «С» відповідно.

Як видно з отриманих результатів металографічного дослідження, кількість евтектики в металі, наплавленому за цією технологією, у порівнянні зі стандартною формується приблизно в 2,5...3 рази менше. Розподіл карбідів віялоподібної форми по перерізу наплавленого шару суттєво відрізняється: від менше ніж 10% у зразках типу «К» до 39% у зразках типу «С». Крім карбідів такого типу в структурі виявляються карбіди ланцетовидної форми в кількості від 15 до 30% відповідно метал зразків типу «С» і «К».

#### 4.1.5. Дробом із високохромистого чавуну у СПК

У роботі [180] зазначається, що присадні матеріали можуть подаватися в шлакову ванну в струмопідвідному кристалізаторі в будь-якому вигляді: труби,



штанги, стрижні, прутки, стрічки, дроти суцільного перерізу і порошкові, дріб, порошки, гранули, стружка, рідкий присадний матеріал. Однак найбільш перспективним для наплавлення у СПК є дискретний матеріал присадки, за допомогою якого можна отримувати наплавлені шари не тільки заданих розмірів і хімічного складу, але і активно впливати на процеси кристалізації наплавленого металу і його властивості, зокрема зносостійкість, міцність, твердість тощо. В енергетичному відношенні застосування дискретних присадок також краще.

При наплавленні у СПК дробом діаметром 0,8...1,6 мм при масовій швидкості її подачі 1,7...2,0 кг/хв, в наплавленому металі зразків № 5 (табл. 3.2), формується аустенітна матриця з дендритною структурою, що характеризується дендритним параметром 13,8 у зразку типу «К» і 23,9 у зразку типу «С» (рис. 4.9 і 4.10).

Співвідношення структурних складових зразка № 5 «К» – 47,7% аустеніту, 43,7% евтектики, 9,2% карбідів. Співвідношення структурних складових зразка № 5 «С» – 45,8% аустеніту, 47,6% евтектики, 6,6% карбідів. Мікротвердість HV 1 легованого аустеніту становить 4910...6120 МПа, евтектики – 6440...6900 МПа. Макротвердість становить 54...54 одиниць HRC.

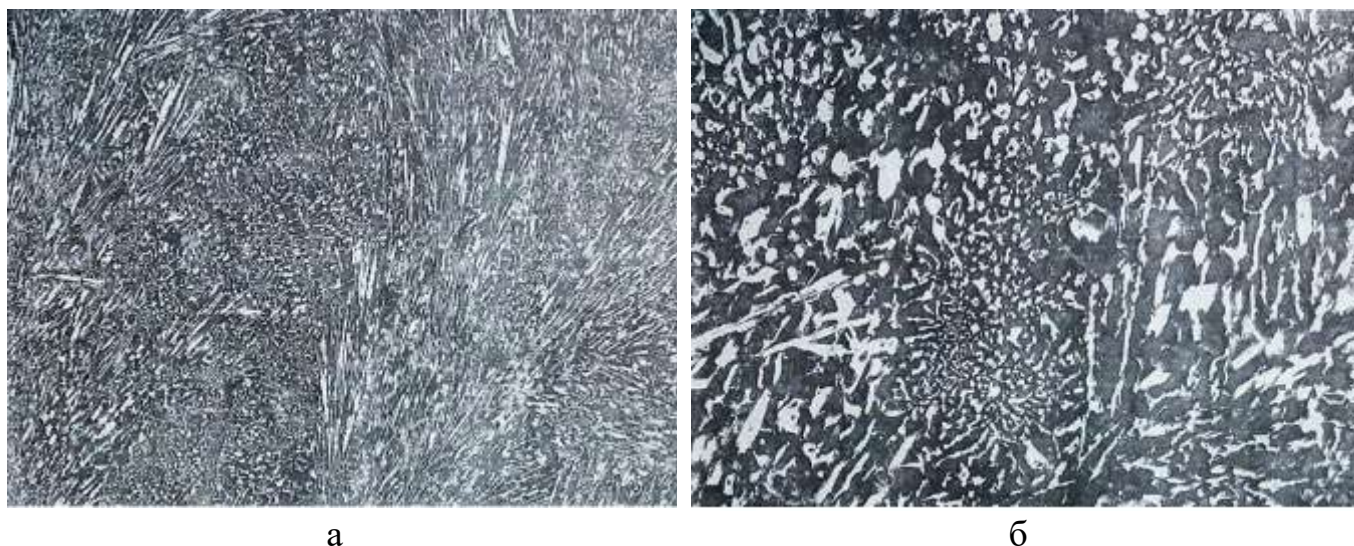


Рис. 4.9 Мікроструктура металу зразка № 5 «К»: а – х100; б – х400

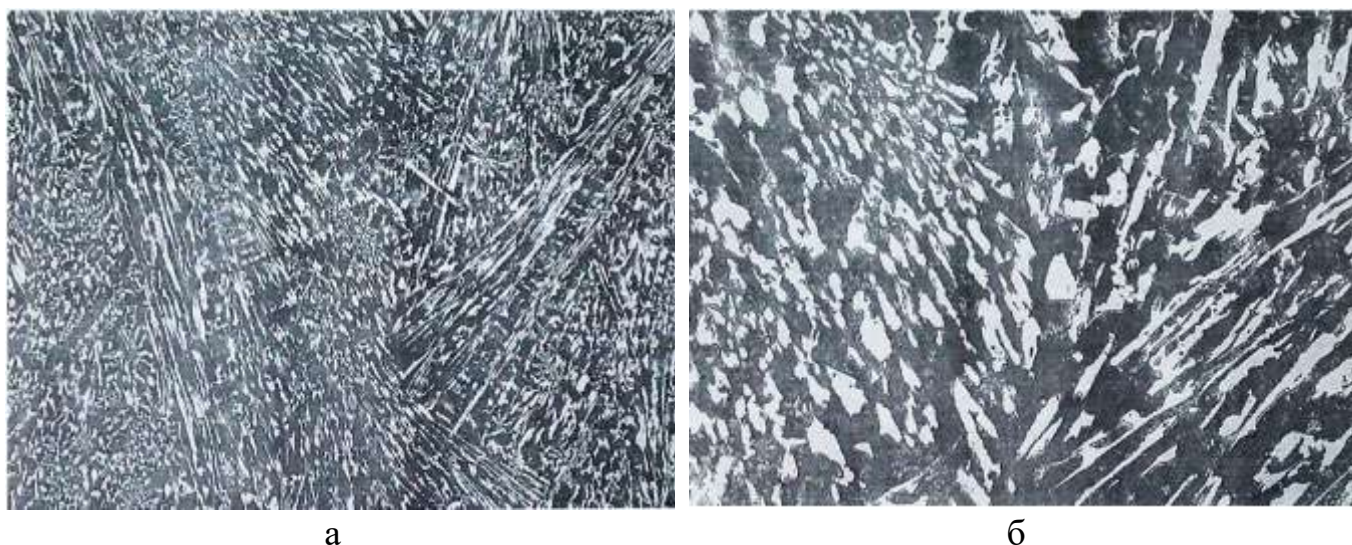


Рис. 4.10 Мікроструктура металу зразка № 5 «С»: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 400$

#### 4.1.6 Рідкою присадкою із високохромистого чавуну

Вперше наплавлення у СПК рідкою присадкою випробували на початку 90-х років минулого століття [181]. Однією з причин появи є розширення можливостей виробництва присадного матеріалу різного хімічного складу.

Прийнята нами методика виконання експерименту у звичайному кристалізаторі не дозволяла створити обстановку, ідентичну тій, яка має місце при ЕШН рідкою присадкою СПК (відсутність обертання шлакової ванни). Проте, як здається, основні закономірності у протіканні структурних перетворень простежити вдасться.

Мікроструктура зразка наплавлення зразка № 6 (табл. 3.2) характеризується формуванням дендритів твердого розчину (легованого аустеніту) з осями першого і другого порядку, що має твердість  $HV_1 - 4830...4880$  МПа, і карбідної евтектики з твердістю  $HV_1 6060$  МПа, що кристалізується в міждендритному просторі (рис. 4.11 та 4.12). Темні частинки – це, скоріше, шлакові включення. Було визначено дендритний параметр (відстань між осями другого порядку). У зразку № 6 «К», поверхня формування біля стінки кристалізатора, він становить  $20...30$  мкм. Співвідношення структурних складових таке:  $75...79\%$  легovanого аустеніту, решта – карбідна евтектика.

У зразку № 6 «С», середина наплавленого шару, дендритний параметр зростає до 40...60 мкм. Кількість легованого аустеніту становить 50...53%, решта – карбідна евтектика. Крім того, евтектичні колонії менш «щільні» – містять більше аустенітної складової (рис. 4.12 б), ніж у зразку № 6 «К» (рис. 4.11 б). Твердість за Роквеллом зразків №№ 6 «К» і 6 «С» – 44 одиниць HRC і 25 одиниць HRC відповідно.

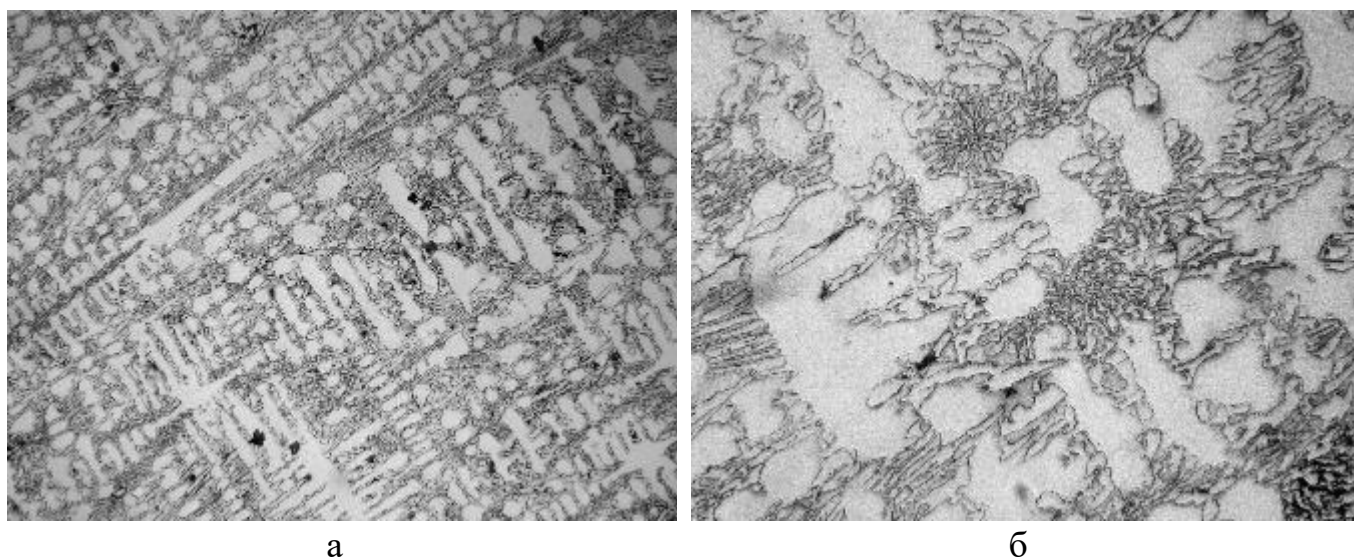


Рис. 4.11 Мікроструктура металу зразка № 6 «К»: а – х100; б – х400

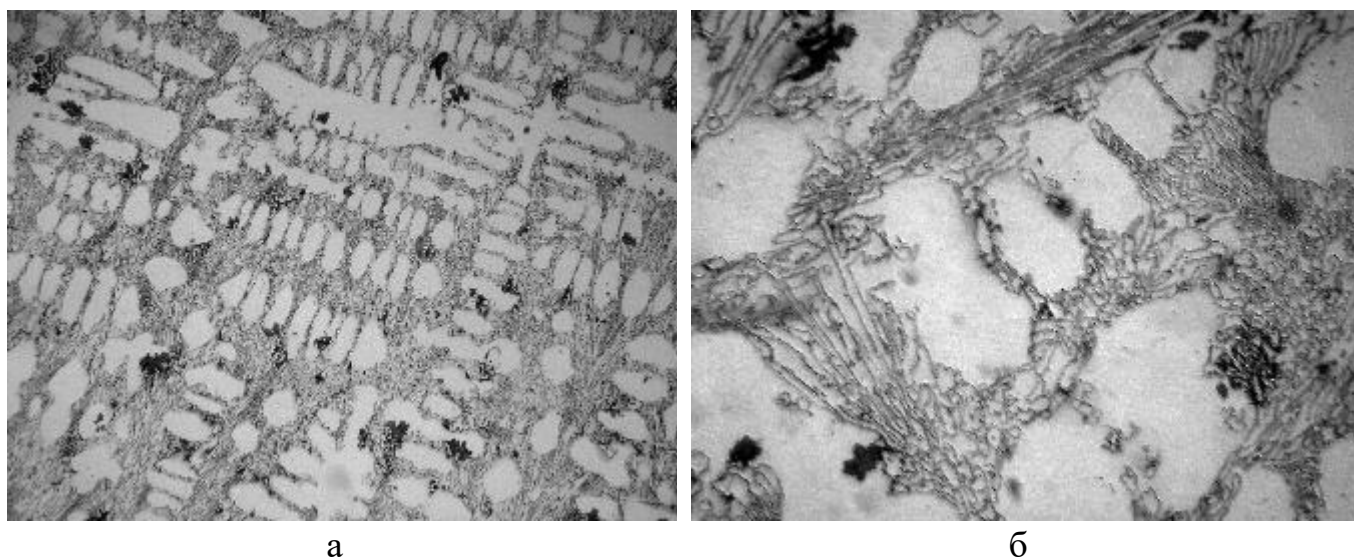


Рис. 4.12 Мікроструктура металу зразка № 6 «С»: а – х100; б – х400

Після появи технології наплавлення у СПК рідкою присадкою її результати з точки зору формування структури металу наплавленого зазвичай порівнюють з



наплавленням дробом. Як вже зазначалося, це пов'язано з тим, що розробники СПК пов'язували подальший розвиток технології наплавлення в цьому пристрої саме з використанням наплавкових матеріалів у вигляді дискретних присадок.

У той же час слід провести порівняння і з двома раніше розглянутими технологіями: ЕШН електродом великого перерізу (зразки № 2) і ЕШН за відсутності обертання шлакової ванни (електрично замкнута струмопідвідна секція СПК) – зразки № 3. Друга технологія близька до ЕШН рідкої присадки тим, що в обох процесах наплавлення не було обертання шлакової ванни, відповідно до методики проведення експериментів.

Основна відмінність структури одержуваної наплавленням рідкою присадкою (зразки № 6), від структури металу зразків №№ 2 і 3 є формування різних матриць: у структурі металу зразків № 6 – це легований аустеніт у кількості 75...79% в зоні «К» і 50...53% у зоні «С», а структурі зразків №№ 2 і 3 – мартенсит. Є відмінності й у кількості евтектики: її вміст у металі № 2 або приблизно однаковий у зоні «К», або зменшено на 85% у зоні «С», у структурі металу № 3, навпаки, підвищено на 74% у зоні «К» і також зменшено приблизно в 1,5 рази в зоні «С».

Матриця металу зразків № 5 (наплавлення дробом) теж складається з легованого аустеніту, але його кількість порівняно із структурою металу зразків № 6 нижча: на 38% у зоні «К» і на 12% у зоні «С».

Ще одна відмінність структури металу зразків № 6 від металу, отриманого за іншими технологіями, є повна відсутність карбідної складової.

Усі спроби підібрати протравлювач для виявлення дендритної структури і виміру дендритного параметра для металу зразків №№ 2 і 3 не увінчалися успіхом. Тому порівняння за розміром дендритного параметра можна провести тільки щодо структури металу, наплавленого дробом (зразки № 5). Виходячи з результатів вимірів дендритного параметра, встановлено, що він значно нижчий (метал дисперсніший) для структури металу зразків № 5: на 81% у зоні «К» і на 109% у зоні «С». Таким чином, підтверджено перевагу використання ЕШН у СПК дисперсної присадки.

Зазначені особливості формування структури металу при ЕШН рідкою присадкою відображено й у вимірах макротвердості. Вона нижча за макротвердість металу, наплавленого дробом, приблизно на 20% у зоні «К» і майже на 90% для металу зони «С».

#### **4.2 Вплив обертання шлакової ванни на формування мікроструктури металу, наплавленого у СПК дискретною присадкою (порошок сталі 10P6M5)**

У якості дискретної присадки було обрано порошок сталі 10P6M5. З одного боку, цей матеріал представляє новий тип наплавного матеріалу (високовуглецева легована сталь), з іншого – швидкорізальні сталі вже показали свої переваги при ЕШН у СПК валків гарячого прокатування [182, 183].

Під час ЕШН у СПК з використанням дискретної присадки (дробу) на процес кристалізації наплавленого металу діють, щонайменше, два чинники. По-перше, це інокулювальний вплив недороспавлених частинок гранул, які можуть стати центрами кристалізації, що перешкоджають односпрямованому зростанню кристалів та відповідно призводять до подрібнення структури металу. По-друге, разом з тим, як показують дослідження, на формування структури впливає обертання шлакової ванни, що забезпечується конструкцією СПК.

Для розуміння можливостей регулювання структури наплавленого металу необхідно було вивчити вплив кожного чинника окремо. Застосування для експериментів у якості наплавочного матеріалу стандартного порошку Р6М5, що має певний фракційний склад з вузькими межами відхилення розмірів та практично кульову поверхню, на відміну від наплавочного дробу, давало змогу виключити вплив на кристалізацію геометричних розмірів присадки.

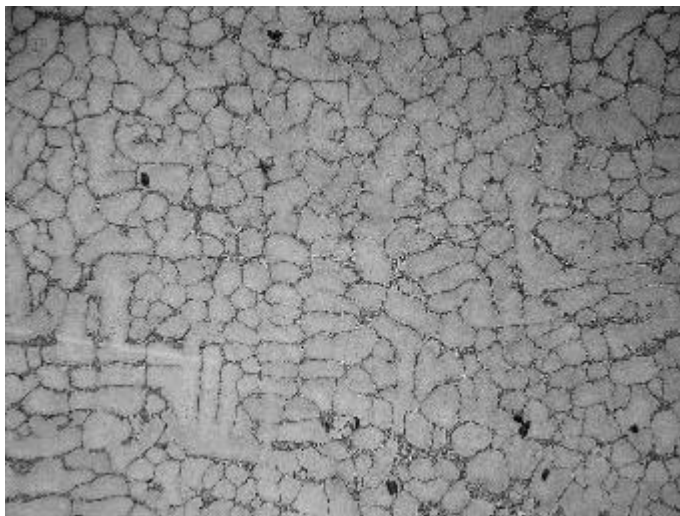
Завданням дослідження було при наплавленні такою присадкою оцінити вплив обертання шлакової ванни формування структури наплавленого металу у СПК при кутовій швидкості обертання шлаку 40...60 об/хв, що зазвичай використовується.

Відсутність обертання забезпечувалося завдяки електричному замиканню вертикального прорізу на бічній поверхні струмопідвідної секції СПК.

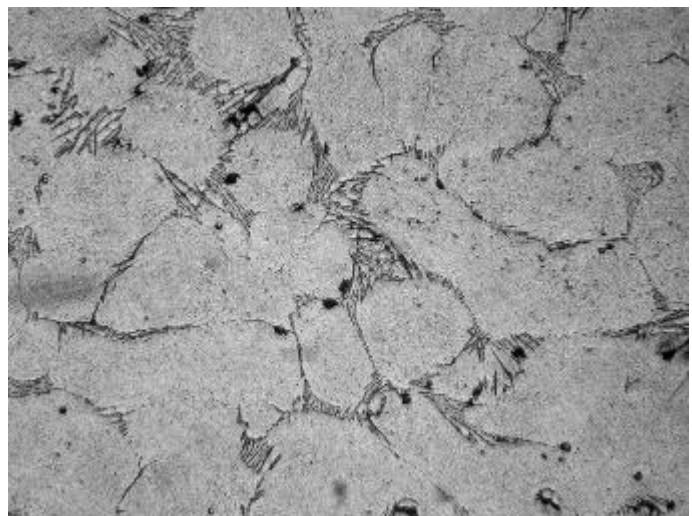
#### 4.2.1 Вплив відсутності обертання шлакової ванни на формування структури металу, наплавленого порошком сталі 10P6M5 у СПК

Мікроструктура металу зразків №7 (табл. 3.2) представлена на рис. 4.13 і 4.14. Кристалізація наплавленого металу комірчаста і складається з матричної мартенситної основи, в якій рівномірно розподілені дисперсні карбіди та виділення евтектики по межах комірок. Біля стінки кристалізатора – зразок № 7 «К» у структурі металу кількість евтектичної складової більша, ніж у центрі – зразок № 7 «С».

Комірки добре сформовані, межі замкнуті (рис. 4.13). Середній розмір комірок зразка № 7 «К» становить 80...90 мкм. Твердість металу HV 2 – 6420...7240 МПа. Комірки зразка № 7 «С» мають середній діаметр близько 75...80 мкм, і твердість HV 1 – 6420...6810 МПа. Твердість за Роквеллом 59, 60 одиниць HRC.



а



б

Рис. 4.13 Мікроструктура металу зразка № 7 «К»: а – х100; б – х400

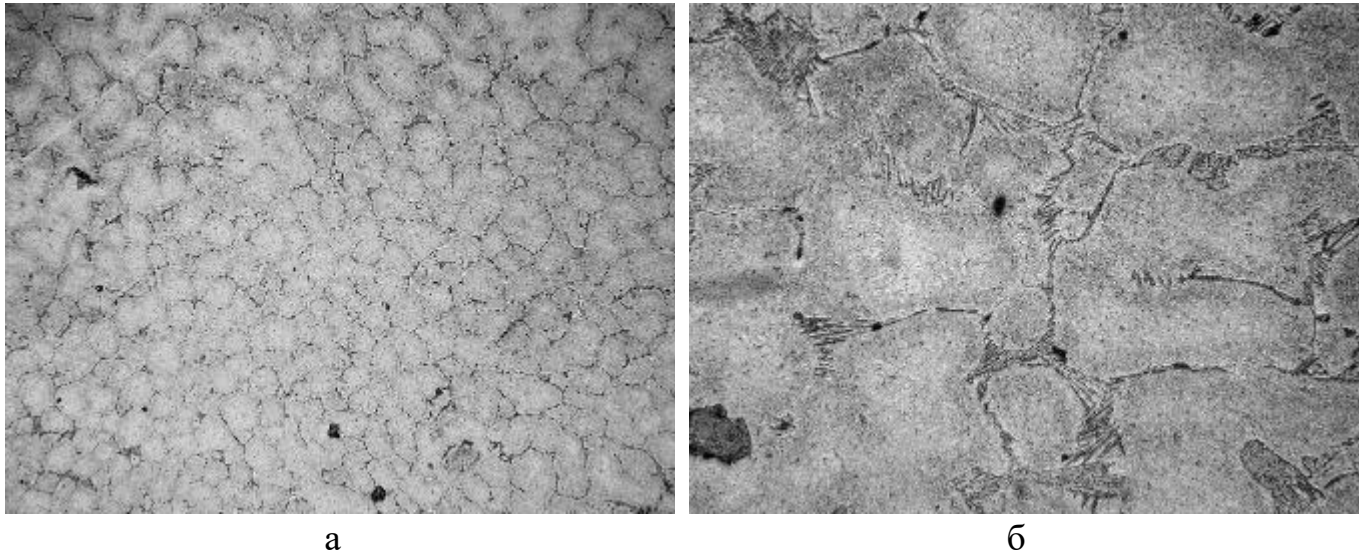


Рис. 4.14 Мікроструктура металу зразка № 7 «С»: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 400$

#### 4.2.2 Вплив обертання шлакової ванни на формування структури металу, наплавленого порошком 10P6M5 у СПК

Рис. 4.15 і 4.16 відображають структуру наплавленого металу зразків № 8 з обертанням ванни. Порівняно зі зразками № 7 у структурі відзначаються деякі відмінності:

- подрібнення структури;
- різнозернистість. Комірки мають розмір від 30 мкм до 120 мкм. Втім, середній діаметр становить приблизно 45...50 мкм;
- утворення тонких меж субзерен, які декоровані дрібними карбідними частинками;
- точкові карбіди в тілі комірок більші. Відбулася незначна коагуляція;
- твердість наплавленого металу становить HV 1 – 5140...5420 МПа. Твердість за Роквеллом для зразків №№ 8 «К» і 8 «С» 56, 58 і 56, 57 одиниць HRC відповідно.

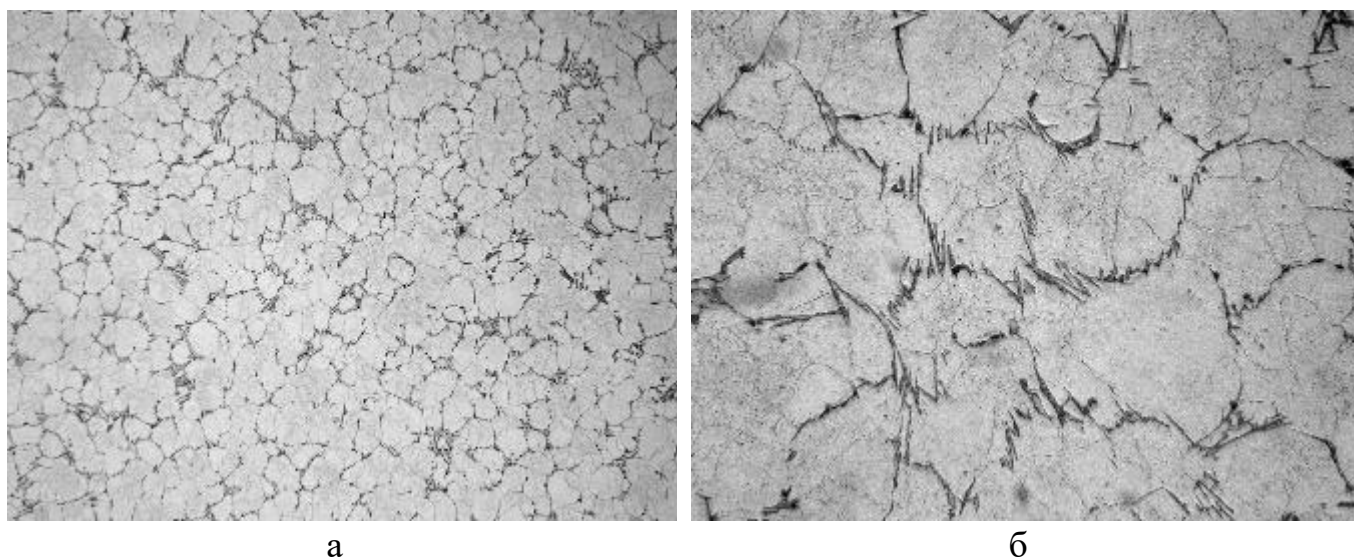


Рис. 4.15 Мікроструктура металу зразка № 8 «К»: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 400$

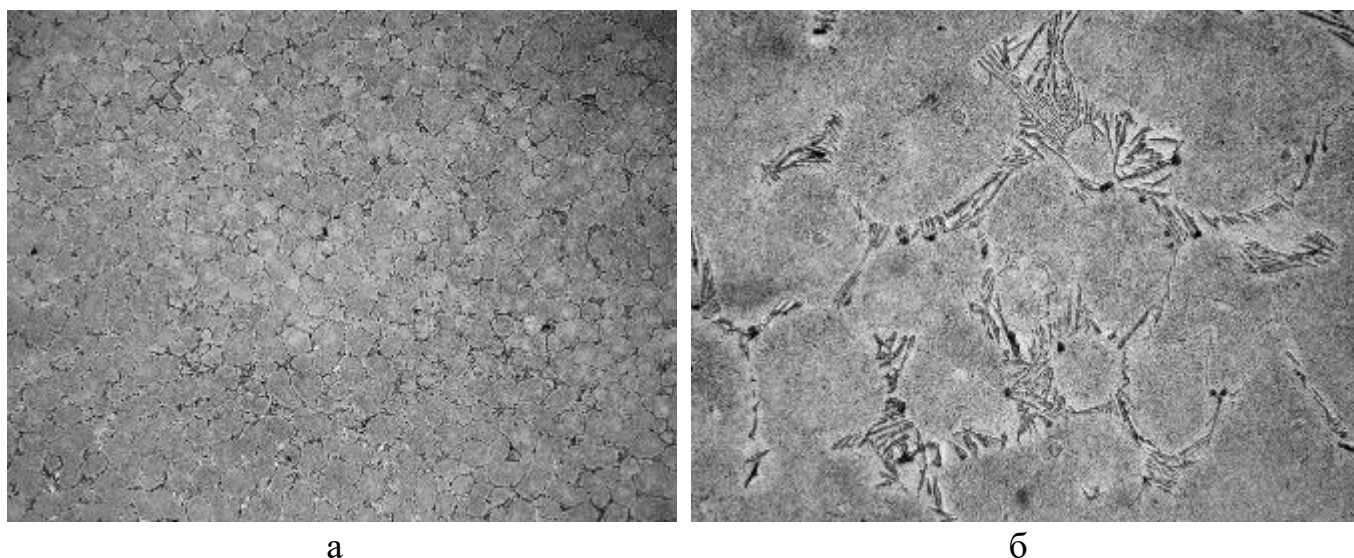
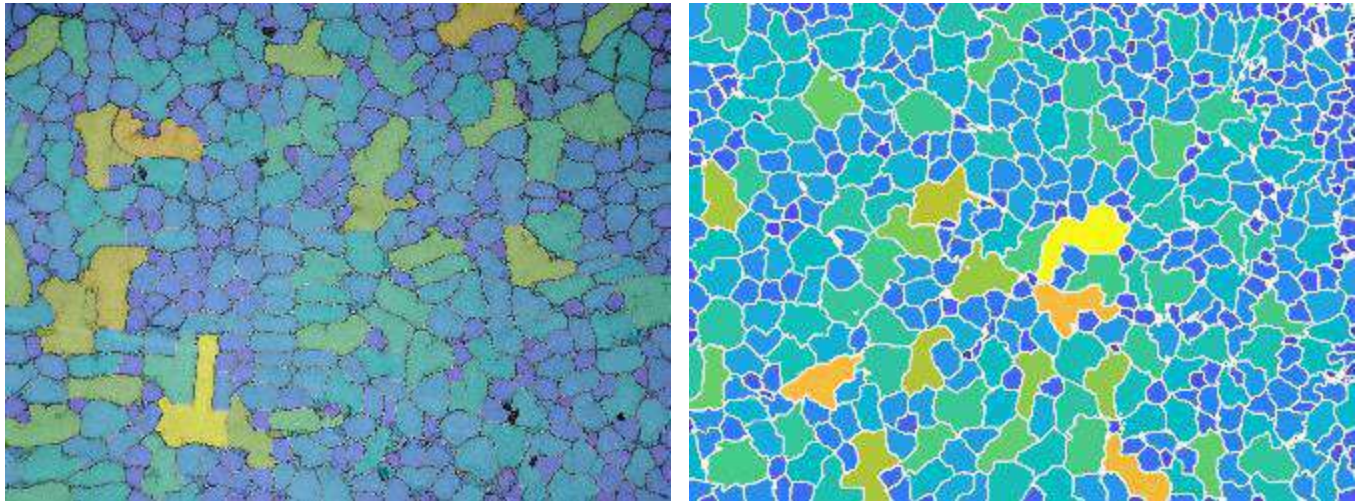


Рис. 4.16 Мікроструктура металу зразка № 8 «С»: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 400$

Необхідно відзначити наявність пор у зразках №№ 7 і 8. Кількість і розмір пор більше у зразках № 7: вони мають розмір порядку 120...350 мкм у зразках № 7, і 60...100 мкм у зразках № 8.

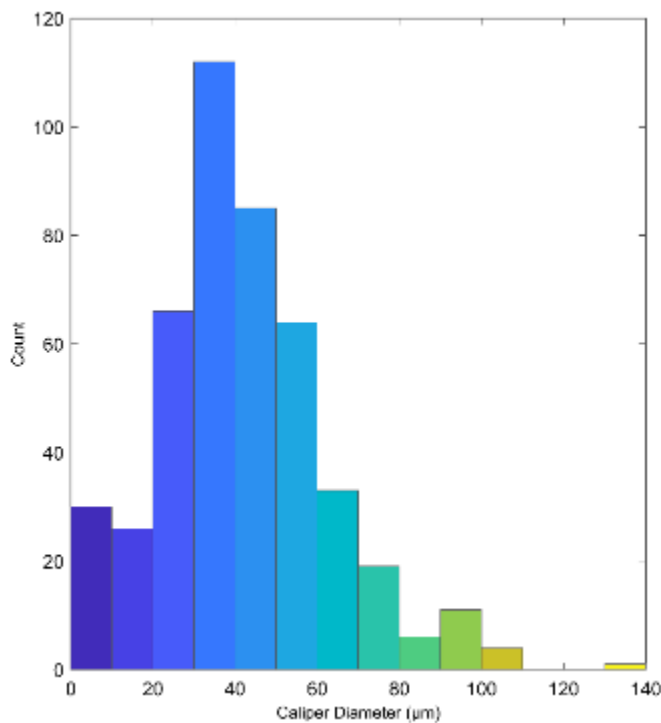
У зв'язку з тим, що зразок №8 порівняно зі зразком №7 візуально не підтверджує подрібнення структури під дією електромагнітного впливу, нами було додатково виконано металографічне дослідження з використанням програмного забезпечення MIPAR, результати якого представлені на рис. 4.17.



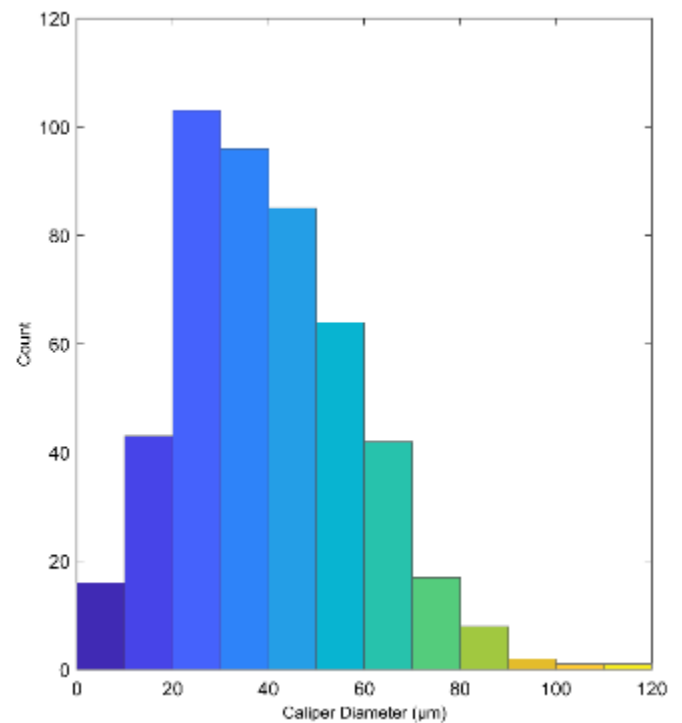


а

б



в



г

Рис. 4.17 Дослідження мікроструктура металу за допомогою програмного забезпечення MIPAR: а – мікроструктура металу зразка № 7 «К» x100; б – Мікроструктура металу зразка № 8 «К» x100; в – гістограма розподілу по розміру зерен зразка № 7 «К»; г – гістограма розподілу по розміру зерен зразка № 8 «К».

Таким чином, як при електрошлаковому наплавленні в СПК електродом великого перерізу, так і дискретною присадкою обертання шлакової ванни відіграє

істотну роль у формуванні структури наплавленого металу. При обертанні шлакової ванни наплавлений метал (зразки № 8) кристалізується з формуванням комірок, менших приблизно 1,3...1,5 рази, ніж у разі наплавлення металу без обертання шлакової ванни (зразки № 7). Відповідно в першому випадку макротвердість наплавленого металу в зонах «К» і «С» практично не має відмінностей і становить приблизно 56...57 одиниць HRC, в той час як при ЕШН без обертання шлакової ванни (зразки № 7) ця відмінність становить приблизно 5 одиниць HRC відповідно 59...60 одиниць HRC у зоні «К» і 54...55 одиниць HRC у зоні «С».

### **4.3 Мікроструктура наплавленого металу при різних технологіях виготовлення зі сталі X12МФ наплавочного електроду великого перерізу у звичайному кристалізаторі**

Ці експерименти засновані на відомих фактах передачі структури і властивостей переплавленого за допомогою різних технологій металу кінцевому продукту – металу, що закристалізувався. Так, у ливарній практиці переплавлення відходів у вигляді металевих пилу і тирси з абразивним пилом, що утворюються при зачищенні виливків, показав, що  $\sigma_B$  виплавленого металу (і сталі, і чавуну) на 10...20% вище, ніж до переплавлення, а пластичність  $\delta$  сталі підвищується на 30...40% [184]. Автори пояснюють появу цього ефекту внаслідок дрібнозернистої первинної кристалічної структури, що виникає в результаті наклепу металевих пилу під час обнавдування відливків.

Про підвищення надійності з'єднань, зварених зварювальним дротом Св-18ХМА вакуумним індукційним наплавленням, свідчить зростання характеристик ударної в'язкості та в'язкості руйнування, що перевищують в 1,5...2,0 рази значення, властиве металу шва, отриманого тим самим дротом відкритого плавлення [185]. Причому це зростання показників досягається завдяки чистоті металу вакуумного індукційного плавлення.

У якості наплавного матеріалу в експериментах використовували електроди з високовуглецевої зносостійкої сталі Х12МФ. Для встановлення конкретних спадкових структурних залежностей у системі метал електрода – метал зливка, було виконано металографічне дослідження металу електродів (зона дослідження – на відстань  $\frac{1}{2}$  радіусу електрода) та злитків, отриманих наплавленням різного виду електродами.

#### 4.3.1 Мікроструктура металу катаного електрода та наплавленого ним шару

Зразок № 9 «К» (край зливка). Кристалізація наплавленого металу дендритно-комірчаста, з переважанням комірчастої. Середній розмір комірок – 50...60 мкм. Мікроструктура є мартенситною матрицею, що має твердість HV 1 – 4290...4640...5140 МПа, в якій знаходиться евтектика з твердістю HV 1 – 5720 МПа (ймовірно аустенітохромистокарбідна)  $A+(Cr,Fe)+C3$ . Евтектичні колонії розташовуються як у межах кристалітів, так і відокремлено у металевій матриці (рис. 4.18 а). Ще однією структурною складовою є троостит із твердістю HV 1 – 4290...5140 МПа. Нерідко троостит, утворення якого почалося на межі комірок і кристалів, росте спрямовано, утворюючи ряд виступів. Іноді троостит розташовується у вигляді окремих розеток у тілі комірок (рис. 4.18 б).

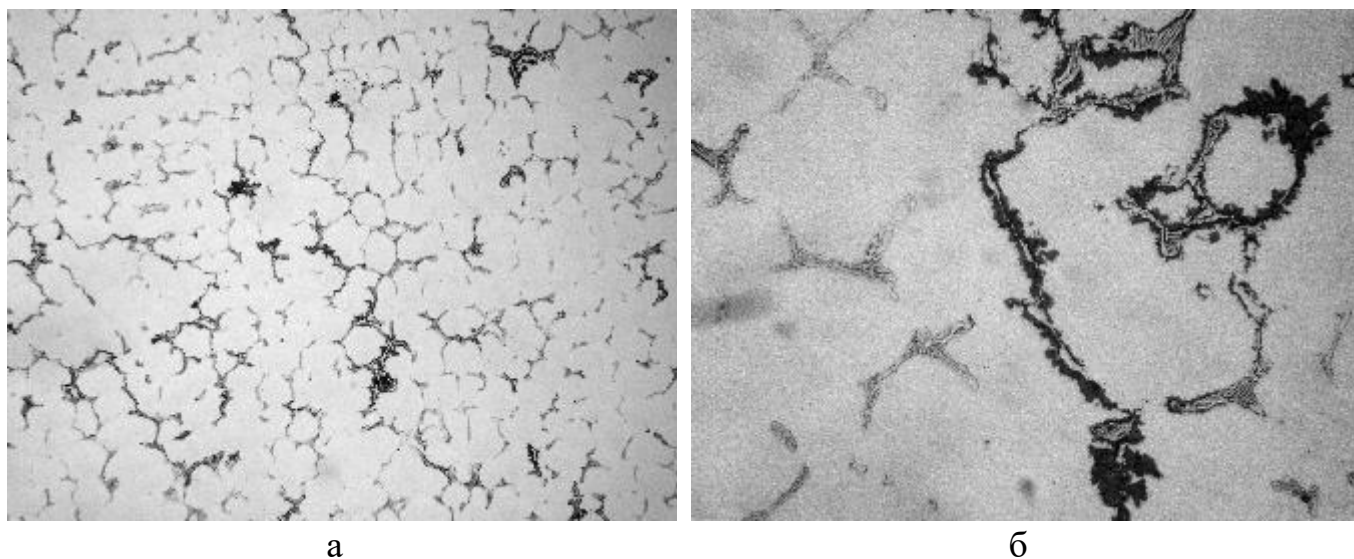


Рис. 4.18 Мікроструктура металу зразка № 9 «К»: а – х100; б – х400

Зразок № 9 «С» (середина зливка). Мікроструктура і дані твердості аналогічні зразку № 9 «К». Морфологія і розташування структурних складових такі самі. Відмінність у тому, що евтектика практично повністю окантовує межі комірок (рис. 4.19). Кристалізація переважно комірчаста. Середній розмір комірок 90...110 мкм.

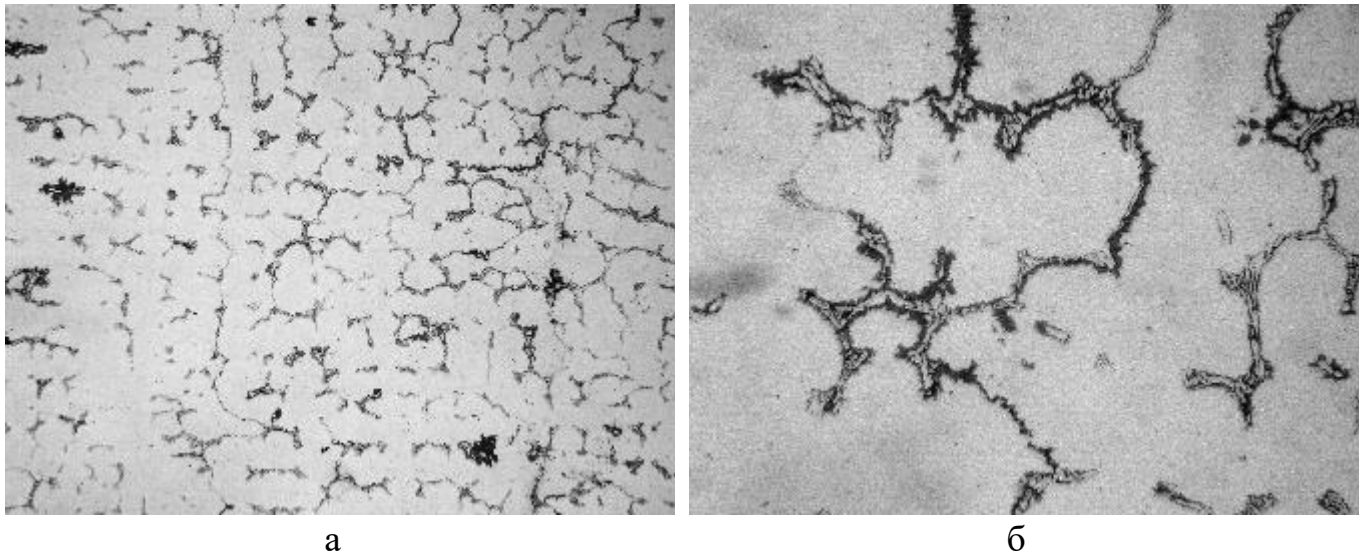


Рис. 4.19 Мікроструктура металу зразка № 9 «С»: а – х100; б – х400

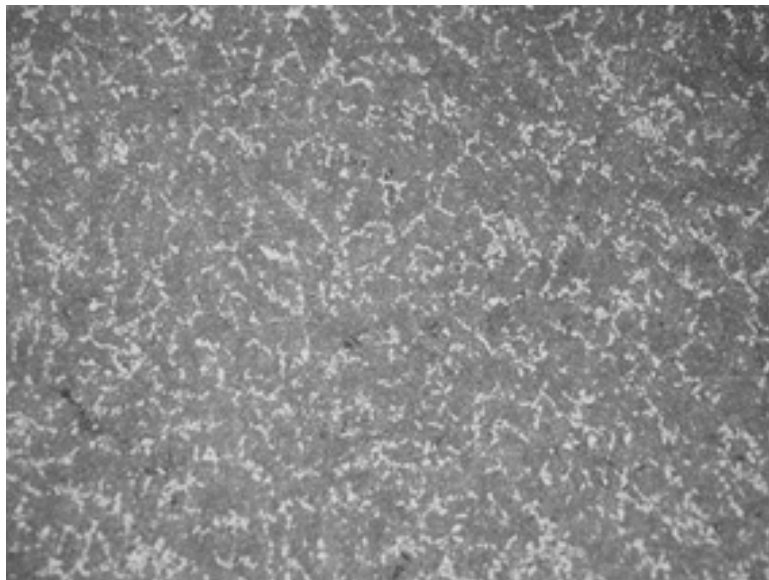


Рис. 4.20 Мікроструктура металу зразка № 11 – х100

Було встановлено наступне. Структура металу зразка № 11 (катаний електрод) комірчаста. Діаметр комірок становить 40...50 мкм. Мікроструктура є перлітною

матрицею, в якій розташовані дисперсні карбідні виділення. Твердість матричної основи HV 1 – 2060...2210 МПа. По межах комірок фрагментарно розташовані карбіди (рис. 4.20), що мають твердість HV 1 – 7420 МПа. Визначена феритометром кількість  $\alpha$ -фази становить більше 50%. У цілому така структура відповідає стандарту металу прокату цієї сталі у стані постачання.

#### 4.3.2 Мікроструктура металу ливарного електрода та наплавленого ним шару

На рис. 4.21а відображена мікроструктура зразка № 10 «К» (край зливка). Кристалізація наплавлення дендритно-комірчаста. Середній діаметр комірок – 80...100 мкм. Мікроструктура є аустенітною матрицею, в якій розташовані евтектичні колонії (як по межі кристалів і комірок, так і в металевій матриці) і великі трооститні розетки. Ступінь потемніння трооститних ділянок залежить від їхньої орієнтації щодо поверхні шліфу (рис. 4.21 б). Твердість структурних складових HV 1: аустеніту – 4640 МПа; евтектики – 5420 МПа; трооститу – 4880...5140 МПа.

Мікроструктура центральної частини зливка, зразок № 10 «С», відрізняється від крайової дещо більшим середнім діаметром комірок – 120...150 мкм, і меншою кількістю трооститної складової (рис. 4.22).

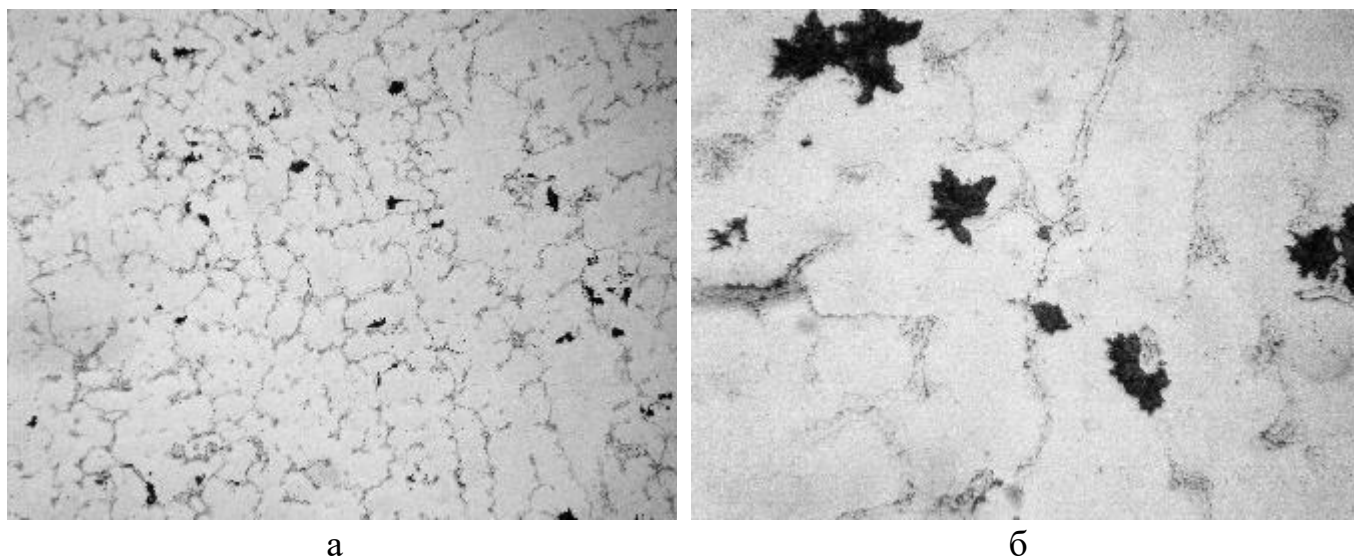


Рис. 4.21 Мікроструктура металу зразка № 10 «К»: а – х100; б – х400

Таким чином, мікроструктура досліджених зразків є аустенитною матрицею, в якій розташовуються колонії хромистокарбідної евтектики і скупчення трооститних розеток. Відмінність полягає лише у локалізації структурних складових: у зразках № 9 – троостит утворюється переважно за межами кристалітів, повторюючи конфігурацію ливарної структури; у зразках № 10 в основному, особливо, у металевій матриці. Структура зразків № 9 дискретніша, ніж зразків № 10, що підтверджується розміром комірок: зразок № 9 «К» – 50...60 мкм; зразок № 9 "С" – 90...110 мкм; зразок № 10 «К» – 80...100 мкм; зразок № 10 «С» – 120...150 мкм.

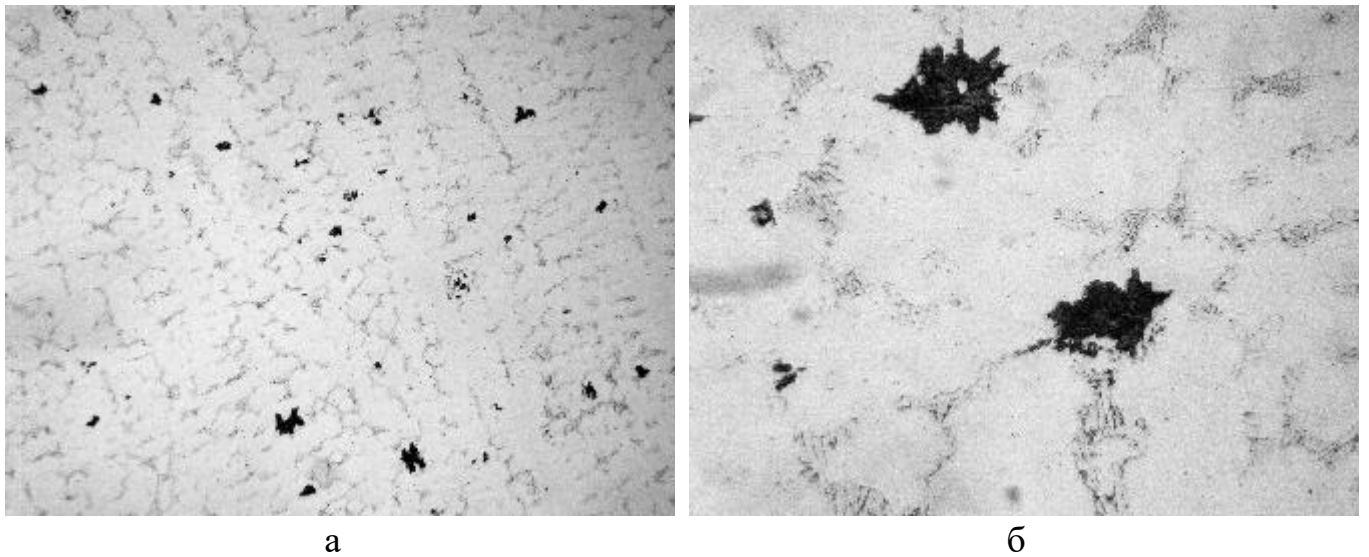


Рис. 4.22 Мікроструктура металу зразка № 10 «С»: а – х100; б – х400

На феритометрі FERRITGEHALTMESSER 1.53 було виміряно кількість  $\alpha$ -фази. У зразках № 9 воно становить 10...11...17 %, у зразках № 10 – 2,8...3...3,2 %.

Зі структурних складових металу наплавлення магнітною фазою є тільки троостит. Звідси випливає, що у зразках № 9 трооститу більше, ніж у зразках № 10.

Отже, загалом мікроструктури металу зразків №№ 9 і 10 ідентичні за винятком характеру розподілу трооститу і його вмісту – у металі зразків № 10 трооститної фази приблизно в 4,5 рази нижчі, ніж у зразках № 9. Найзначніше мікроструктури металу зразків №№ 9 і 10 відрізняються за дисперсністю комірок: у зразках типу «К»

структура металу № 9 дисперсніша, приблизно на 64 %, а у зразках типу «С» – приблизно на 35 %.

Мікроструктура металу ливарного електрода, зразок № 12, є аустенітною матрицею, що має твердість HV1 – 5720...6810 МПа. Евтектичні колонії розташовуються за межами комірок. Спостерігається невелика кількість трооститної структурної складової як у межах, і у тілі комірок (рис. 4.23), кількість  $\alpha$ -фази приблизно 6 %. Діаметр комірок у дослідженій ділянці – 90...100 мкм.

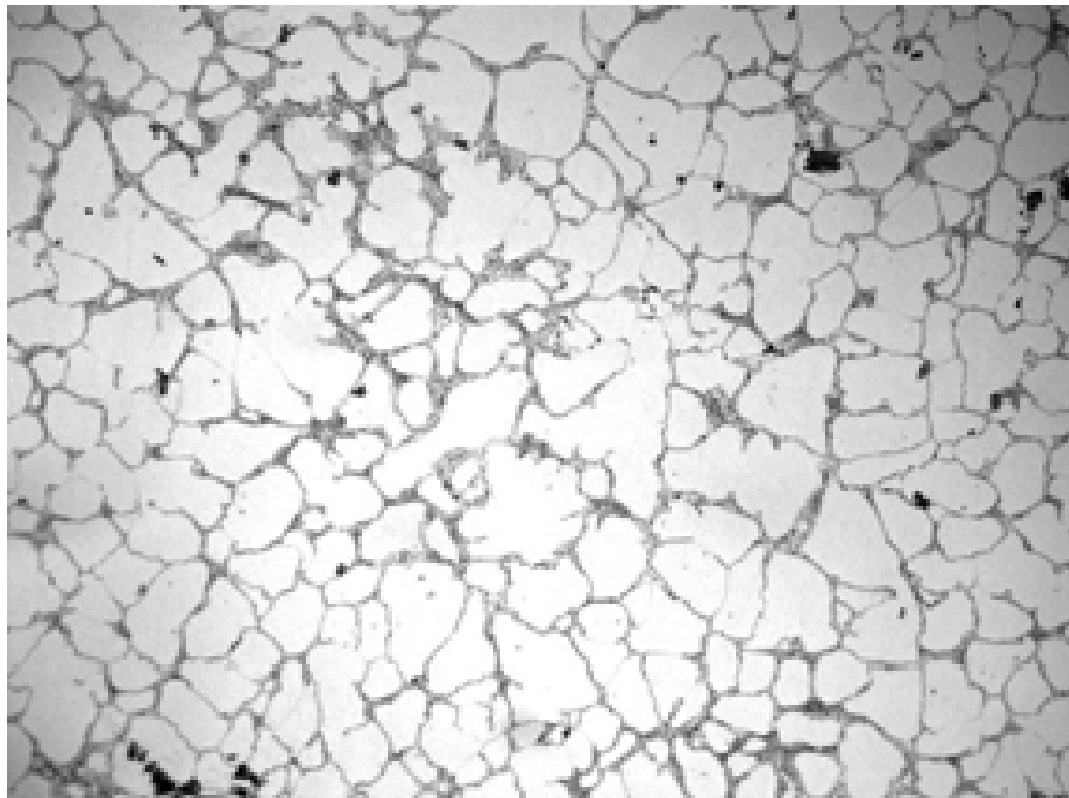


Рис. 4.23 Мікроструктура металу зразка № 12 – x100

Таким чином, комплексне дослідження як металу злитків, так і металу переплавлених електродів дозволяє стверджувати про існування структурної спадковості з точки зору впливу дисперсності структури металу електродів на дисперсність структури наплавленого металу.



#### 4.4 Ефективність способів покращення якості наплавленого зносостійкого металу

Підвищення зносостійкості наплавленого металу і покращення його експлуатаційних властивостей завдяки варіюванню кількості та виду легуючих елементів практично вичерпало свої можливості. Тому необхідно шукати нові рішення для отримання додаткових переваг у властивостях наплавлених металів.

Одними з таких нових шляхів є введення в практику електрошлакового наплавлення поняття спадковості і необхідності більшою мірою враховувати вплив на метал, що кристалізується, фізичних методів впливу зокрема електромагнітного.

Вище були представлені результати досліджень, проведених відповідно до таких прийнятих нами технічних рішень покращення властивостей наплавленого металу. Не всі ці рішення мають однаковий вплив на процеси кристалізації, проте облік будь-якого з них при виконанні наплавних робіт дозволить розширити експлуатаційні можливості зміцнених виробів.

У цьому підрозділі пропонується ранжування розглянутих методів шляхом порівняльної оцінки ефективності кожного з них. При цьому до оцінки прийняті ті методи, які завдяки простоті виконання і можливостей практичного використання можуть однозначно знайти застосування при виконанні наплавних робіт.

Розгляду підлягають способи наплавлення з використанням електродів великого перерізу і дискретної присадки (дроби), а також виконувані з електромагнітним обертанням шлакової і металеві ванн за рахунок можливостей самого СПК.

За порівняльні характеристики обрано показники прийнятих металографічних методик металографічного дослідження структури наплавленого металу у вигляді дендритного параметра при дендритній кристалізації або середній розмір комірок (діаметр) при комірчастому характері кристалізації. Крім того, враховувалися наявність, розміри і співвідношення структурних складових у наплавленому металі,



отриманому за різними технологіями. У таблицях 4.1 – 4.4 представлені результати аналізу структур металу, наплавленого трьома наплавковими матеріалами – високохромистим чавуном, швидкорізальною сталлю і зносостійкою високовуглецевою сталлю при виконанні наплавлень за різними технологіями.

Таблиця 4.1

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

№ зразка	Технологія ЕШН	Вміст структурних складових, %					Розмір евтектики (□ або Ø), мкм	HRC
		М	Е	КВ	КГ	КЛ		
1	в звичайному кристалізаторі; електрод	28...30 (з КД)	40...42	28...30	–	–	200x400 150x240	46...49
2	в СПК	28...47	25...36	28...36	–	–	50x100 70x120	52
3	в СПК (без обертання)	30...42	38...45	12...21	6...8	–	150x300	46...49
4	в СПК; заготовка	22	12	39	–	21...33	100x120	50...51

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

При порівнянні мікроструктур чавуну, отриманого при ЕШН за двома стандартними технологіями (у звичайному кристалізаторі і СПК), можна відзначити таке: основна відмінність наплавленого у СПК металу – це отримання структур із 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%.

Дослідження інших технологій ЕШН не дає змоги отримати якісь додаткові переваги. Виключення обертання шлакової ванни при ЕШН у СПК призводить до появи у структурі нових типів карбідів і огрублення всіх структурних складових. Формування у структурі великих карбідів ланцетоподібної форми при ЕШН чавунної заготовки може погіршувати пластичні властивості наплавленого металу і відповідно

знижувати опір чавуну ударним навантаженням. Характер формування структури при ЕШН в СПК дробом з високохромистого чавуну представлено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

**Результати металографічного дослідження металу, наплавленого у СПК дробом (Ø 0,8...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	–	

Аналіз представлених у табл. 4.2 результатів металографічного дослідження показує насамперед, що при цьому способі наплавлення у структурі чавуну відбувається дискретна кристалізація з формуванням аустенітної матриці. Це пропонує отримання більш пластичного металу, у порівнянні з металом, наплавленим електродом великого перерізу. Можна відзначити рівномірний розподіл структурних складових перерізу наплавленого шару. І хоча дендритний параметр кристалізації все ж змінюється від краю зразка до його середини, проте структура зберігає дисперсний характер з відносно високою і рівномірною макротвердістю за його перерізом.

Порівнюючи дані табл. 4.1 і 4.2, 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.

У випадку ЕШН дискретною присадкою (дробом, порошком, гранулами тощо) метал, що формується у СПК, кристалізується в умовах інокулюючого впливу плавкої дискретної присадки і електромагнітного впливу, завдяки якому відбувається обертання шлакової і металеві ванн.

У таблиці 4.1 було показано, що обертання шлакової ванни при ЕШН електродом великого перерізу є істотним параметром кристалізації наплавленого металу у СПК. Уточнення важливості цього параметра при ЕШН дискретною

присадкою дозволяє більш реально оцінювати можливості цього наплавлення. Результати такої оцінки представлені у табл. 4.3.

Таблиця 4.3

**Результати металографічного дослідження металу, наплавленого у СПК  
порошком ( $\varnothing$  0,3...0,6 мм) сталі Р6М5 (край наплавленого шару)**

Спосіб наплавлення	Матриця	Розмір комірок, мкм	HRC
З обертанням шлакової ванни	Мартенситна	20...40	56...58
Без обертання шлакової ванни	Мартенситна	30...60	59...60

Як видно з табл. 4.3, при ЕШН у СПК обертання шлакової ванни є важливим технологічним параметром для різного виду переплавлених матеріалів. Залежно від хімічного складу наплавних матеріалів структура наплавленого металу може бути як дендритною, так і комірчастою (див. табл. 4.2 і 4.3).

Незважаючи на те, що, як показують результати металографічних досліджень, при ЕШН у СПК краще застосовувати дискретні присадки, все ж таки іноді виникають труднощі в їхньому виготовленні і доставці споживачеві. У таких випадках єдиним шляхом виконання ЕШН є використання при наплавленні електродів великого перерізу. З практики електрошлакового переплавлення (ЕШП) відомо, що вартість виготовлення електродів становить до 50 % вартості переплавлення. Тому, наприклад, намагаються замінити ковані електроди на литі, зокрема отримані на установках безперервного лиття. З погляду спрощення і здешевлення отримання електродів таке рішення зрозуміле. Однак досліджень щодо того як така заміна вплине на структуру наплавленого металу, зокрема зносостійкого високовуглецевого, не проводилося.

У табл. 4.4 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.

Відповідно до результатів наведених в табл. 4.4 з точки зору оптимізації структури наплавленого металу при виборі типу електрода великого перерізу слід

віддавати перевагу електродам, отриманим із застосуванням деформаційних технологій (кування, вальцювання). Це пов'язано зі спадковою передачею структури металу електрода, зокрема її дисперсності, структурі наплавленого металу.

Таблиця 4.4

**Результати металографічного дослідження металу ливарних і катаних електродів та наплавленої ними сталі X12МФ**

Об'єкт дослідження	Вид електроду 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 електроду; К і С - край і середина наплавленого шару відповідно; А – аустеніт; Е – евтектика П – перліт; КД – дисперсні карбіді; Тр - троостит;  $\alpha$  фаза - перліт + троостит.

Таким чином, при ЕШН у СПК високовуглецевих зносостійких матеріалів, особливо високохромистих чавунів, при виборі будь-якої технології наплавлення можна наплавити якісний метал необхідної товщини і практично будь-якого хімічного складу. Проте кожен із цих способів має не тільки технічні особливості, що відрізняються, а й по-різному впливає на структуру наплавленого металу.

Враховуючи те, що номенклатура деталей зношуваних машин і механізмів обладнання гірничо-металургійного комплексу велика, в практичних цілях можна використовувати будь-яку з розглянутих вище технологій. Однак, знаючи переваги кожної з них, слід використовувати саме ту, яка доступніша і простіша для виготовлення та найкраще відповідає умовам експлуатації деталей, що зміцнюються.

У цьому відношенні технології ЕШН у СПК можна ранжувати в порядку їхніх ширших можливостей у такій послідовності: наплавлення рідким металом, наплавлення ливарним електродом, наплавлення електродом, отриманим за допомогою деформації, наплавлення дробом.

#### **Висновки за розділом 4**

1. За допомогою металографічного аналізу виконано комплексну непряму оцінку механічних і експлуатаційних властивостей металу, наплавленого за різними технологічними схемами наплавлення.

2. Показано перспективність використання наплавлення у СПК в 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 одиниці HRC.

3. Виключення обертального ефекту при ЕШН у СПК призводить до огрублення структури наплавленого чавуну. Розмір евтектичних колоній стає приблизно в 3 рази більшим, ніж при звичайному варіанті використання СПК. Макротвердість металу відповідно знижується приблизно на 3 одиниці HRC.

4. Використання при ЕШН у СПК безструмової заготовки з високохромистого чавуну в порівнянні з наплавленням електродами призводить до зменшення кількості евтектики в 2,5...3,0 рази. Спостерігається різка відмінність розподілу карбідів віялоподібної форми: від менш ніж 10% біля краю шару до 39% у його середині. У структурі додатково формуються карбіди ланцетоподібної форми: від 15% у центрі

шару до 30% біля його краю. При цьому макротвердість наплавленого чавуну значно не знижується (приблизно на 1 одиницю HRC).

5. Застосування при ЕШН у СПК у якості наплавкового матеріалу дробу з високохромистого чавуну дозволяє отримувати дрібнозернисту структуру з відносно рівномірним розподілом структурних складових. При цьому такий метал має підвищену макротвердість – 52...54 одиниць HRC.

6. Одержуваний при ЕШН рідким металом наплавлений високохромистий чавун має дендритний параметр структури більшої величини, ніж одержуваний при ЕШН дробом: на 81% біля краю шару металу і на 109% у його центрі. Відповідно знижується макротвердість чавуну: на 20% біля краю шару металу і майже на 90% у його середині.

7. При застосуванні при ЕШН у СПК дискретної присадки (порошок сталі 10P6M5) формування структури залежить від наявності або відсутності при наплавленні обертального ефекту. При обертанні шлакової ванни середній розмір комірок приблизно в 2 рази дрібніше, ніж у разі наплавлення без обертання ванни. Відповідно обертання ванни сприяє отриманню рівномірної макротвердості шару за його перерізом (56...57 одиниць HRC). Відсутність обертання шлакової ванни призводить до зміни величини макротвердості від 56...59 одиниць HRC біля краю шару до 54...55 одиниць HRC біля його середини, тобто приблизно на 5 одиниць HRC.

8. На прикладі ЕШН електродами зі сталі X12МФ показано, що на формування структури наплавленого металу впливає спосіб виготовлення наплавкових матеріалів. Структури, одержувані при ЕШН катаном і ливарним електродами, практично ідентичні, за винятком характеру розподілу трооститу і його вмісту, при ЕШН ливарним електродом його вміст підвищується в 4,5 рази. Спосіб виготовлення електродів найбільше впливає на дискретність структури металу, при наплавленні катаном електродом вдається отримати в ньому більш дисперсну структуру – приблизно на 64% біля краю шару і на 35% у його середині.

## **РОЗДІЛ 5. ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СТРУМОПІДВІДНОГО КРИСТАЛІЗАТОРА ЗНОШУВАНИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЇХНІХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИПРОБУВАНЬ**

У електротехнічному відношенні секційний СПК є пристроєм, через який, на відміну від звичайних кристалізаторів, проходить весь струм наплавлення. Однак сама конструкція СПК може змінюватись за рахунок застосування різних матеріалів, з яких виготовляються його секції (мідь, сталь, неметали), і використання різної кількості секцій. Ці зміни обумовлені прагненням до спрощення і здешевлення пристрою, а також вирішенням різних технологічних завдань. Додатково слід зазначити, що у порівнянні зі звичайними кристалізаторами, робочі стінки СПК більшою мірою схильні до електроерозійних явищ, а це треба враховувати при розробці оптимального технологічного процесу наплавлення.

Струмopідвідний кристалізатор можна застосовувати і в дуплекс-процесі ЕШН. Це означає, що струмопідвідним кристалізатором забезпечується підтримка електрошлакового процесу, вирівнювання температур в обсязі шлакової ванни і створення оптимальних температурних умов на межі розділу основний метал – шлакова ванна. Після виконання цих функцій струмопідвідна секція СПК може відключатися від джерела живлення, а його формуюча секція перетворюватися на звичайний кристалізатор, в якому можна переплавляти витрачені наплавні електроди. У цьому випадку виключається можливість використання при наплавленні дискретних присадок і втрачаються переваги обертального ефекту шлакової ванни, зазначені в розділі 4. Для компенсації цих технологічних втрат при ЕШН можна використовувати наплавні матеріали, що забезпечують отримання наплавленого металу з більш високими параметрами кристалізації і показниками механічних властивостей, зокрема високохромисті чавуни з підвищеним вмістом хрому (25...30%

Cr). Такі наплавні матеріали показали хороші результати при наплавленні валків різних клітей і прокатних станів [180, 186].

Враховуючи особливо складні умови експлуатації деталей машин і механізмів гірничо-металургійного комплексу, для виконання наплавних робіт за будь-якою технологією наплавлення у якості наплавкових матеріалів обрані високохромисті чавуни з вмістом хрому 25...30 %.

### **5.1. Дослідження технологічних схем і особливостей ЕШН у СПК різного виконання**

На першому етапі виконувались наплавлення у СПК різного виконання і уточнювалася працездатність кожного з використаних приладів. Для дослідження були прийняті двосекційні 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 слугували заготовки з листової сталі Ст3 товщиною 16...20 мм (у більшості наплавлень) і 8 мм.



Рис. 5.1 Етап початку роботи СПК при витягнутому зі шлакової ванни водоохолоджувальному електроді з графітовим наконечником.



Усі наплавлення виконувалися з твердим стартом. На рис. 5.1 показано етап початку роботи СПК Ø 180 мм після вилучення з шлакової ванни водоохолодного електрода з графітовим наконечником, а на рис. 5.2 показано оплавлений торець чавунного електрода Ø 90 мм після завершення процесу наплавлення.



Рис. 5.2 Завершальний етап електрошлакового наплавлення із вилученням зі шлакової ванни електрода діаметром 90 мм.

Наплавлення у двосекційних мідних СПК Ø 85 і 180 мм дозволяють отримувати наплавлені шари необхідної товщини з необхідним формуванням наплавленого шару і оптимальним проплавленням основного металу (рис. 5.3) [187].

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



Рис. 5.3 Зовнішній вигляд напавленої заготовки  $\varnothing$  180 мм (а) і проплавлення основного металу (б).

Були випробувані при напавленні в СПК  $\varnothing$  152 мм зі сталеву струмопровідною секцією і різного виготовлення формуючих секцій. Як показали дослідні напавлення, обидві секції, виготовлені зі сталі, не забезпечують тривалу роботу СПК, відбувається поступове підпалвлення торцевих поверхонь секцій з подальшим (через 3 – 4 напавлення) 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 напавленого шару.

Сталеву струмопідвідну секцію Ø 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 по 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.

Загалом, працездатність цих приладів залежить від системи їхнього охолодження (тиск у мережі має бути не менше 4...5 атм., витрата води – не менше 7...10 м<sup>3</sup>/год) і якості зварних з'єднань металу робочих мідних втулок з металом сталевих кожухів.

Другий етап дослідження полягав у тому, щоб оцінити технологічну доцільність та 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 та 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.

Недоліком цієї технології є великі витрати часу і особливо флюсу. Якщо прийняти вартість 1 кг флюсу приблизно 1,5...2,0 долара США і його витрату на одне

наплавлення у кількості 5...6 кг (для діаметра заготовки приблизно 200 мм), то вартість наплавлення лише за витратою робочого флюсу складатиме приблизно 300 грн. З іншого боку, відомо, що при виконанні різних електрошлакових технологій витрати часу на підготовчо-заклучні роботи можуть становити 70...80% повного часу наплавлення. Тому отримання електрошлаковим наплавленням разових біметалевих заготовок у промисловому масштабі раціонально лише при значному досягненні (не менше ніж у два рази) збільшення зносостійкості наплавлюваних виробів. Звичайно, у цих розрахунках слід враховувати і деякі особливості більшості деталей обладнання гірничо-металургійного комплексу – їхню велику масу і вартість, а також можливі великі витрати часу та фінансів у разі закупівлі закордоном окремих деталей замість тих, що вийшли з ладу під час експлуатації.

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). Оцінено також перспективність виконання такого наплавлення на сталевих заготовках невеликої товщини.

Виконані наплавлення у СПК Ø 72 мм (сталева струмопідвідна секція і мідна формуюча секція) на сталеві заготовки товщиною 8 мм. Для уникнення проплавлення основного листового металу, особливо при виконанні твердого старту, була використана така схема розташування заготовки: на мідному водоохолодному піддоні наплавної установки закріплювали сталевий лист товщиною 12 мм, а на нього укладали наплавлювану заготовку. Твердий старт здійснювали при мінімальному електричному режимі (І ступінь джерела живлення ТШП-10).

Було встановлено, що при застосуванні такої техніки наплавлення можна одержувати добре сформовані шари чавуну завтовшки 15...20 мм при проплавленні основного металу приблизно на 3 мм.

Ефективність і можливість застосування електрошлакового наплавлення безпосередньо на зношені поверхні деталей залежить від кількох чинників. По-перше,

наскільки основний метал (метал зношеної деталі) може добре зварюватися з наплавленим. Враховуючи те, що більшість деталей такого типу виготовляються зі сталі 110Г13Л, що відноситься до погано зварюваних матеріалів, забезпечення якісного з'єднання двох погано зварюваних матеріалів може викликати певні технологічні труднощі. По-друге, для установки СПК в робоче положення і виконання стабільного електрошлакового процесу необхідно, щоб зношена наплавлена поверхня мала відповідну площину, або таку площину слід створити, використовуючи механічні способи обробки деталей. При цьому зазначені раніше зауваження щодо виконання разових наплавлень справедливі і для цієї технології зміцнення.

Труднощі, пов'язані з поганою зварюваністю металів, що з'єднуються, виключаються при виконанні виготовлювального наплавлення, що дозволяє підібрати замість раніше використовуваної сталі сталь з хорошими зварювальними властивостями. Але при цьому слід враховувати технологічні особливості роботи всього механізму, коли існує необхідність збереження в зоні зношування характеристик міцності основного металу, а іноді й певних показників опірності металу зношування (у не наплавлених зонах).

Отримання багат шарових наплавлених злитків передбачає використання при наплавленні двох наплавних матеріалів, один з яких формує метал сталевій основи, а другий – метал зносостійкого шару. Найпростіше ця технологія наплавлення виконується з використанням дискретних наплавних матеріалів. Докладніше її буде розглянуто у підрозділі 5.2.

## **5.2. Отримання багат шарових біметалевих армуючих елементів при ЕШН у СПК**

Як зазначалося вище, при виконанні робіт з ЕШН найбільша кількість часу витрачається на підготовку обладнання до наплавлення і заключну стадію: остигання шлаку в кристалізаторі протягом не менше 0,5 години, його видалення з СПК,

підготовка нового робочого місця і встановлення (кріплення) на ньому кристалізатора з повторним наведенням у ньому шлакової ванни при твердому старті, або розплавлення шлаку в окремій ємності – рідкий старт та заливання його в робочу порожнину СПК.

Найбільша кількість досліджень з розробки технологічних прийомів, що дозволяють виключити або значно зменшити непродуктивні витрати часу при ЕШН, було виконано у Донецькому політехнічному інституті [67]. Але, судячи з подальших публікацій цих авторів, промислового застосування запропоновані прийоми не знайшли.

Однією з особливостей СПК є самостійна підтримка електрошлакового процесу. Це дозволяє виключити з процесу наплавлення використання електродних матеріалів, найчастіше у вигляді електродів великого перерізу певної довжини, замінивши їх дискретними матеріалами. У цьому випадку, застосовуючи схему наплавлення з відносним переміщенням СПК і наплавленого металу й вводячи в шлакову ванну за допомогою одного або декількох дозаторів присадки різного хімічного складу, можна отримувати багатошаровий злиток теоретично нескінченної довжини (включивши в технологічний процес отримання зливка операцію, не припиняючи наплавлення і витягування зливка з формуючої секції СПК).

Ця ідея вимагає перевірки, головним чином, з точки зору можливості з'єднання з мінімальним перемішуванням двох металів з сильно різними температурами кристалізації (температура солідуса): для сталі Ст3  $t_c \approx 1465^\circ \text{C}$ , а для високохромистого чавуну  $t_c \approx 1250^\circ \text{C}$ .

Крім того, наплавлення необхідно виконувати так, щоб на наплавленій поверхні формувалися гофри, що дозволяють ідентифікувати положення шарів. Така ідентифікація дозволить надалі забезпечити різання біметалу по м'якому сталевому шару.

Виконували дослідні наплавлення у СПК  $\varnothing 180$  і  $85$  мм дробом з високохромистого чавуну з вмістом хрому  $28\%$ , і сталевим дробом зі сталі Ст3 (рис.

5.4) [188, 189] при стаціонарному положенні кристалізатора і витягуванні з наплавлюваної заготовки.

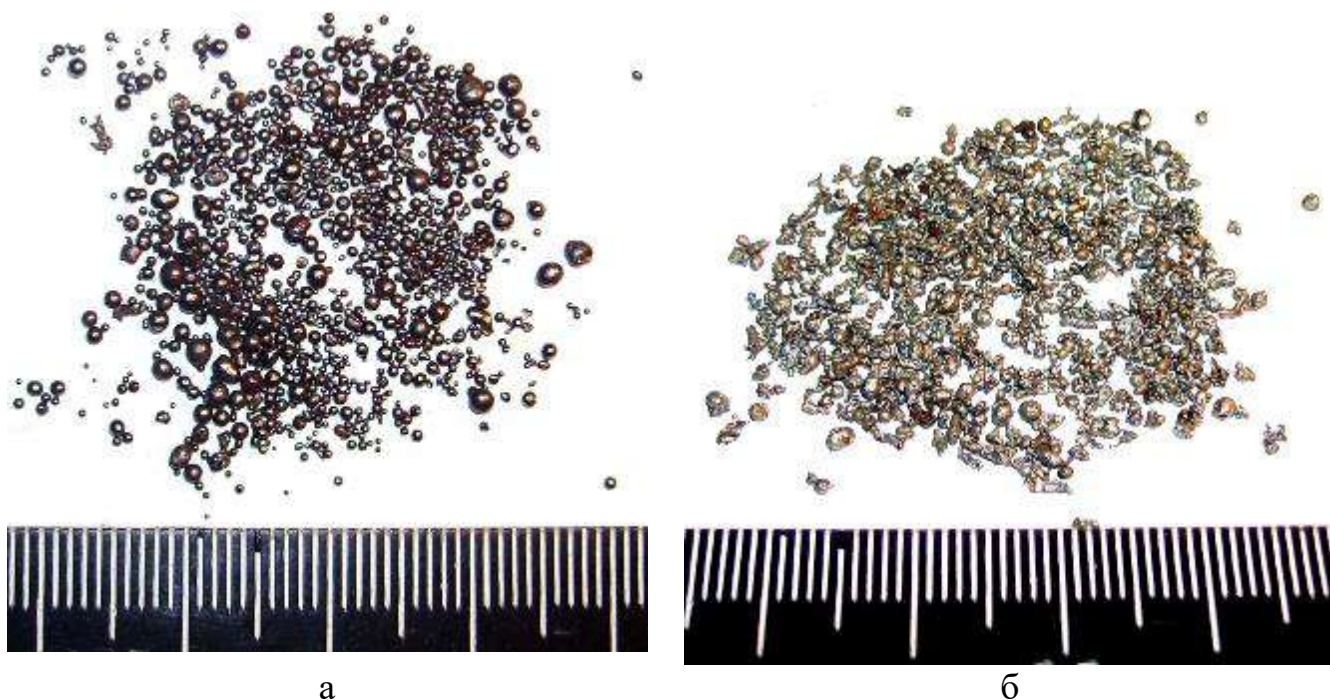


Рис. 5.4 Сталевий (а) і чавунний (б) дріб, які застосовуються для наплавлення

Було встановлено, що при напавленні без регулювання електричного режиму відбувається перемішування сталі і чавуну, особливо в період нанесення сталевого шару на чавунний (рис. 5.5). Для уникнення перемішування металів випробували два варіанти регулювання потужності, що вводиться в шлакову ванну.

Для СПК Ø 85 мм у момент подачі наступної партії дробу потужність знижували з 50...60 до 25...30 кВт з відключенням електричного живлення на 1...1,5 хвилини.

Для СПК Ø 180 мм зменшення потужності з 70...80 кВт до 45...50 кВт здійснювали з 6-хвилинною витримкою при мінімальній потужності.

На рис. 5.6 показано зовнішній вигляд багатошарового зливка Ø 180 мм з поділом на його поверхні шарів сталі та чавуну. На рис. 5.7 представлено макрошліф поперечного перерізу чотиришарового зливка Ø 85 мм.



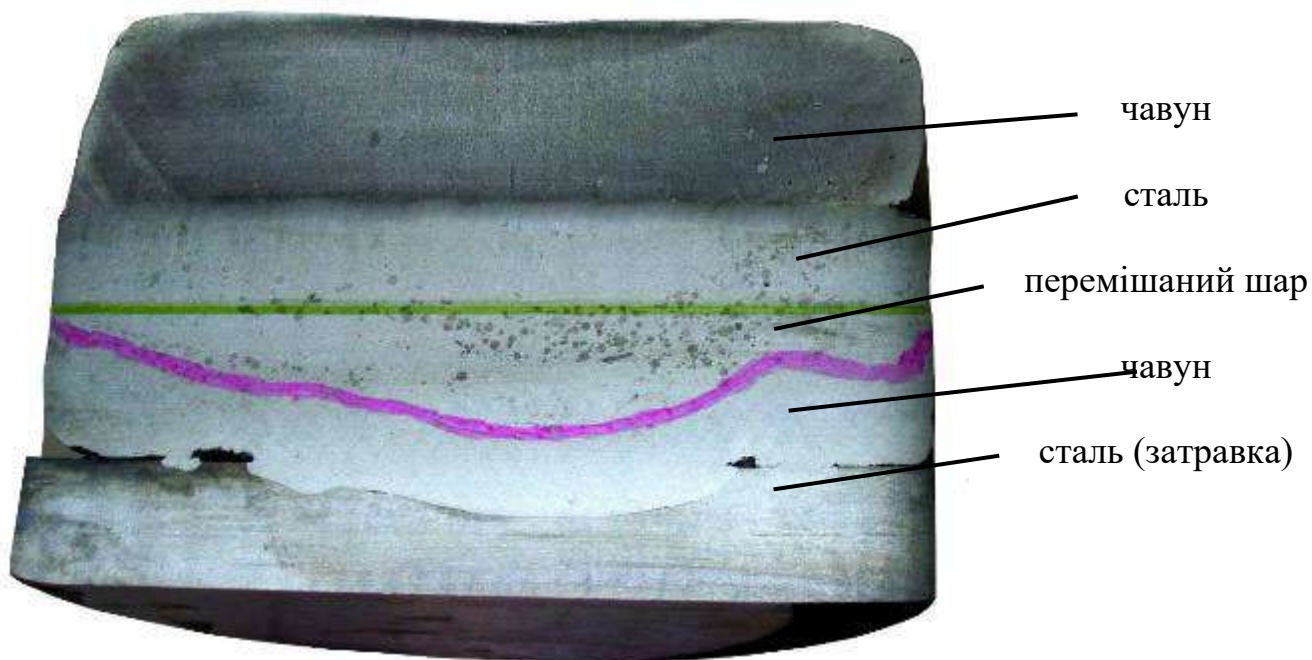


Рис. 5.5 Макрошліф поперечного перерізу багат шарового зливка  $\varnothing$  180 мм, отриманого без регулювання електричного режиму наплавлення (фіолетовою лінією позначено форму металевої ванни)



а



б

Рис. 5.6 Зовнішній вигляд бічної (а) і верхньої (б) поверхні багат шарового зливка  $\varnothing$  180 мм



Як бачимо, при застосуванні обох технічних прийомів процес наплавлення носить не безперервний характер, а переривистий характер. Для отримання безперервного процесу необхідно розробити алгоритм ведення наплавлення з урахуванням регулювання ще одного показника масової швидкості подачі дискретної присадки.

Таким чином, для зміцнення деталей машин і механізмів гірничо-металургійного комплексу з погляду простоти здійснення наплавлення найбільше підходять технології ЕШН на сталеві заготовки того чи іншого розміру та виготовлюване наплавлення. За певних умов виконання наплавних робіт можна рекомендувати ЕШН з використанням СПК у якості пристрою, що забезпечує дуплекс-процес.

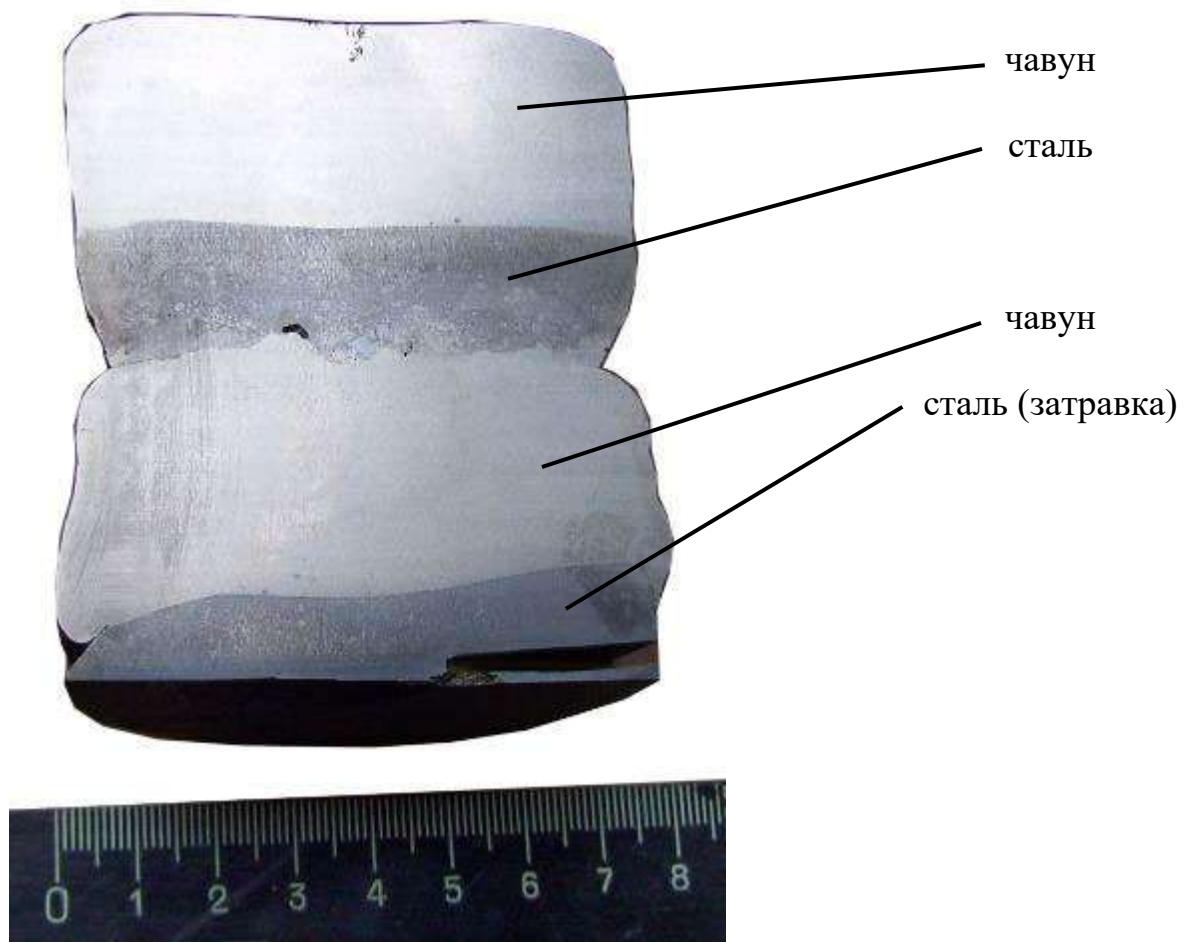


Рис. 5.7 Макрошліф поперечного перерізу чотиришарового зливка  $\varnothing$  85 мм

### 5.3. Наплавлення і результати експлуатаційних випробувань наплавлених бічних футеровок шоквої дробарки СМД-111

Бічні футеровки шоквої дробарки слугують для захисту її поверхонь від зношування на останньому етапі виходу дробленої маси з робочого простору. На гірничорудних підприємствах виготовлення елементів футеровки дробильного обладнання зазвичай застосовують марганцевисту сталь 110Г13Л. Але при переробці сировини, особливо з підвищеною міцністю (16...20 одиниць за шкалою М.М. Протодяконова) і абразивністю, термін їхньої служби не перевищує 3...5 місяців.

В якості способу зміцнення футеровок було прийняте виготовлювальне наплавлення через її відносно просту форму. Для чого зі сталевго листа марки Ст3 товщиною 30 мм були вирізані 2 заготовки футеровки масою приблизно 140 кг кожна (рис. 5.8).

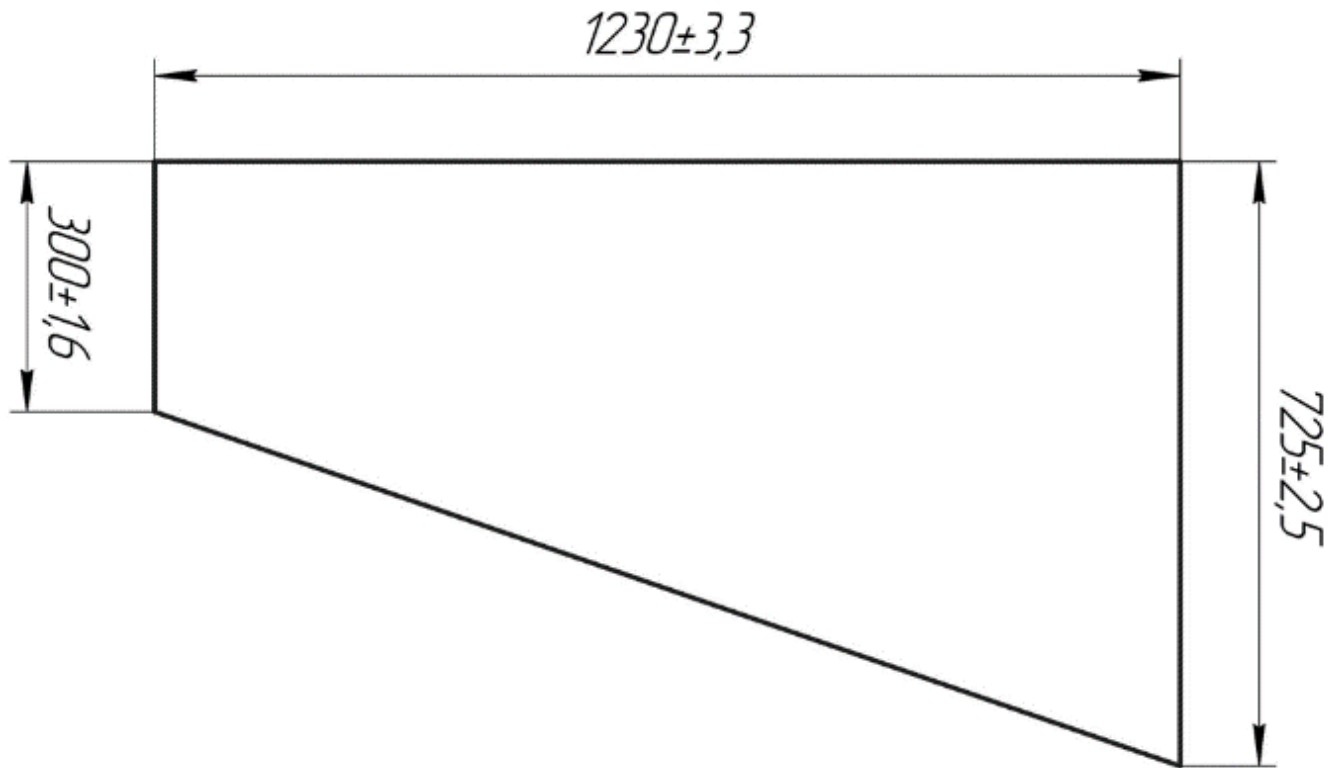


Рис. 5.8 Сталева заготовка бічної футеровки

Для зменшення зварювальних деформацій під час наплавлення обидві заготовки були з'єднані одна з одною по їхнім торцевим поверхням за допомогою зварювальних прихваток за схемою: 40 мм – довжина шва, 80 мм – пропуск між прихватками тощо. Така схема кріплення листів між собою дозволяла не допускати після наплавлення великого прогину листів.

Передбачалося не заповнювати всю поверхню листа наплавленим металом, а наносити на неї локальні шари («шайби») завтовшки ~ 15 мм з площею покриття листа ~ 35...40 %, які слугували б опорними зонами захисту робочої поверхні від зношування. Таке технічне рішення також дозволяло знизити вплив зварювальних деформацій на розміри і форму листів, що було підтверджено по завершенню наплавних робіт – максимальна деформація прогину не перевищувала 2 мм. Схема розташування «шайб» і порядок їхнього нанесення представлені на рис. 5.9.

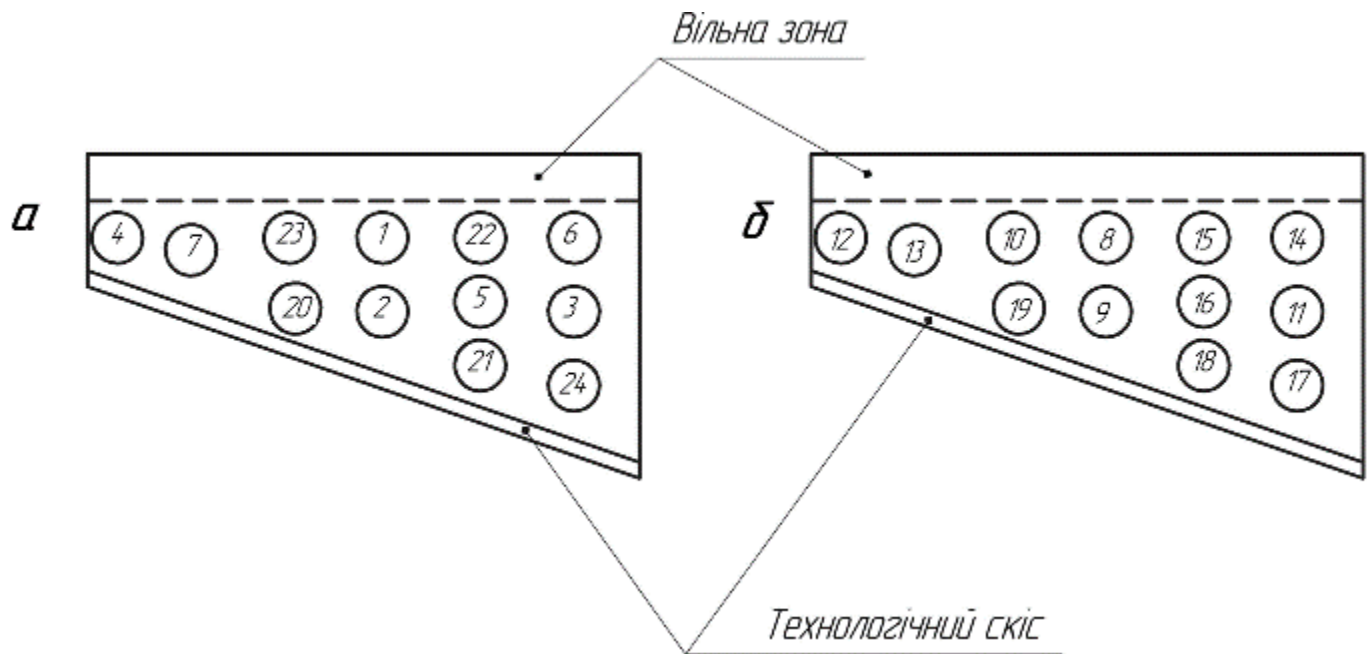


Рис. 5.9 Схема розташування «шайб» на першій (а) і другій (б) поверхнях й порядок їхнього нанесення

Забезпечення показаного на рис. 5.9 порядку нанесення «шайб» на наплавлені поверхні листів досягалося за рахунок перевертання зібраних у пакет листів, з одного боку, на інший.

Наплавлення «шайб» виконували у СПК Ø 152 мм зі сталевією струмопідвідною і мідною формуючою секціями. У якості наплавного матеріалу використовували електроди та дріб оптимального фракційного складу з високохромистого чавуну (2,8% С, 28% Cr), відлитих за технологією моделей, що виплавляються. Під час наплавлення випробували технологію звичайного (разового) наплавлення у СПК. Деякі параметри процесу наплавлення представлені нижче.

Наведення шлакової ванни глибиною 50 мм здійснювалося за допомогою водоохолоджувального електрода з графітовим наконечником (твердий старт). Час наведення ванни становить приблизно 4...5 хвилин. Плавлення електрода відбувається протягом 1,5 хвилини. Знімання кристалізатора з наплавного шару виконували приблизно через 7...10 хвилин. Час підготовки нового місця наплавлення (зачищення поверхні шліфувальною машинкою, приварювання до поверхні листа шпильок кріплення СПК, встановлення електроізоляційних прокладок і саме кріплення СПК) складало приблизно 15 хвилин.

Режим наплавлення: наведення шлакової ванни на I ступені трансформатора ТШП-10 при напрузі 34 В і струмі 1,2...1,4 кА; робота СПК на II ступені джерела живлення при напрузі 42 В і струмі 1,2...1,7 кА і на III ступені – при напрузі 52 В і струмі 2,4 кА.

На рис. 5.10 показана одна (друга) з наплавлених «шайб» футеровок після роз'єднання двошарового пакета.



Рис. 5.10 Одна з наплавлених «шайбами» футеровок

У низці наплавлень після їхнього завершення за допомогою пірометра були виконані виміри температур як на «шайбах», так і на певній відстані від бічної поверхні СПК (до його зняття з «шайб» рис. 5.11). Такі виміри, як нам здається, можуть стати вихідними даними для створення математичної моделі розподілу температур у листі та їхній облік для оцінки й регулювання деформаційних процесів, що виникають внаслідок дії тепла шлакової ванни.

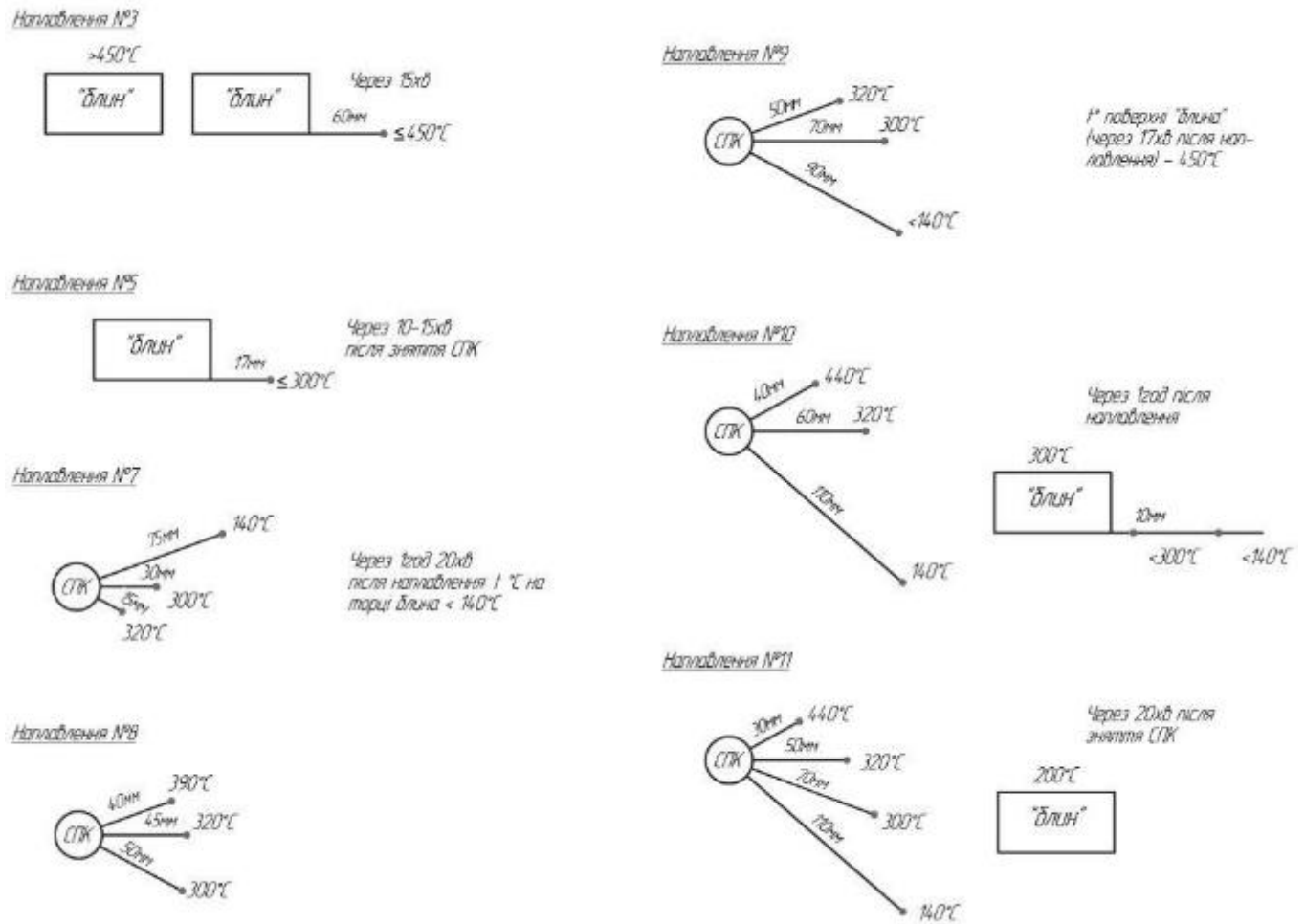


Рис. 5.11 Схеми вимірювання температур у наплавлених «шайб» і в зонах теплового впливу шлакової ванни на температуру поверхні листа

На рис. 5.12 показано наплавлену футеровку після 4-х і 9-и місяців роботи при дробленні базальту (категорії міцності 20). Як видно з рис. 5.12, наплавлені «шайби» зберегли свою форму і мають відносно невелике зношування робочих поверхонь.

Таким чином, підтверджено правильність запропонованого технологічного рішення наплавлення локальних шарів, що приймають на себе під час експлуатації основну дію абразивної породи (Додаток А).





а

б

Рис. 5.12 Зовнішній вигляд наплавленої поверхні футеровки через: а – 4 місяці;  
б – 9 місяців

Незважаючи на те, що наплавлення виконувались з використанням двох технологічних схем (дробом і електродом у СПК), помітної різниці між величиною зношування «шайб», наплавлених за цими схемами не виявлено. Це підтверджує правильність вибору для ЕШН у СПК цього виробу з високохромистого чавуну, що має підвищену зносостійкість в існуючих умовах експлуатації. Для дробарок іншого типу або при дробленні породи з більш високою абразивністю й опірністю до руйнування різниця у структурі наплавленого металу може суттєво вплинути на результати експлуатаційних випробувань.

#### **5.4. Наплавлення і результати експлуатаційних випробувань ковша навантажувача «Caterpillar» ємністю 15 м<sup>3</sup>, зміцненого наплавленими біметалевими елементами**

Якщо оцінювати наявні публікації, присвячені підвищенню стійкості ковшів кар'єрних екскаваторів й аналогічних виробів, наприклад, навантажувачів, то більшість з них стосується одної з частин ковшів – їхніх зубів, що працюють у дуже складних умовах абразивного й ударно-абразивного зношування. Справді, під час роботи з твердими породами довговічність зубів може не перевищувати двох діб (за даними Інгулецького ГЗК). Хоча нині цю проблему вирішують установкою на зуби змінних коронок. Але активному зношуванню піддаються й інші частини ковшів, зокрема передня стінка, що також виготовляється зі сталі 110Г13Л.

Для підвищення абразивостійкості внутрішньої поверхні стінки і бічних поверхонь ковша застосовують різні технології зміцнення шляхом встановлення на них захисних елементів. До такого типу захисту відносять приварювання біметалевих «кнопок» Ø 50...150 мм і товщиною зносостійкого шару 25...35 мм, плиток або брусків розміром 115...250x25...250 мм і товщиною шару 15...40 мм, що застосовуються зарубіжними фірмами.

Зокрема, однією з таких фірм, що займають одне з провідних місць створення армуючих біметалевих елементів для виробів різного призначення гірничо-металургійного обладнання, є американська фірма «ESCO».

Методом рентгеноспектрального аналізу за допомогою електронної приставки до оптичного мікроскопа був виконаний аналіз перехідної зони (l ≈ 1,52 мм) з включенням в неї стороннього шару товщиною приблизно 163 мкм. Результати дослідження розподілу елементів у мас. % від початку основного металу (Spectrum 1) до напавленого шару (Spectrum 20) представлені в табл. 5.1.



Таблиця 5.1

## Розподіл хімічних елементів у перехідній зоні

Spectrum	Si	Cr	Mn	Fe	Cu	W	Total
Spectrum 1	0,32	0,44	0,71	98,53	–	–	100
Spectrum 2	0,37	0,34	1,11	98,71	–	–	100
Spectrum 3	–	0,33	0,96	98,71	–	–	100
Spectrum 4	–	0,17	1,02	98,8	–	–	100
Spectrum 5	0,44	1,22	0,9	97,43	–	–	100
Spectrum 6	–	0,32	0,94	98,75	–	–	100
Spectrum 7	–	0,97	0,7	97,95	0,38	–	100
Spectrum 8	–	0,37	0,85	97,58	1,2	–	100
<b>Spectrum 9</b>	–	<b>0,14</b>	<b>0,29</b>	<b>55,32</b>	<b>44,26</b>	–	<b>100</b>
<b>Spectrum 10</b>	–	<b>0,28</b>	<b>0,69</b>	<b>26,44</b>	<b>72,58</b>	–	<b>100</b>
<b>Spectrum 11</b>	–	<b>3,16</b>	<b>0,02</b>	<b>90,25</b>	<b>6,57</b>	–	<b>100</b>
Spectrum 12	–	10,4	0,69	85,7	0,29	2,92	100
Spectrum 13	–	36,77	1,27	56,22	–	5,74	100
Spectrum 14	–	45,3	1,01	51,8	–	1,88	100
Spectrum 15	–	29,29	0,279	67,56	–	2,36	100
Spectrum 16	–	27,13	0,96	69,46	–	2,45	100
Spectrum 17	–	27,53	0,91	68,72	–	2,85	100
Spectrum 18	–	29,86	0,74	66,9	–	2,51	100
Spectrum 19	–	19,82	0,66	77,28	–	2,24	100
Spectrum 20	0,57	24,98	0,76	72,44	–	1,25	100

Як видно з табл. 5.1, за товщиною основного металу і наплавленого шару, спостерігається зменшення вмісту хрому, основного легуючого елемента, від проміжної (сторонньої) зони як у бік основного металу (Spectrum Niz), так і наплавленого (Spectrum Verh) – табл. 5.2.

Таблиця 5.2

## Розподіл хімічних елементів у металах верхнього шару наплавлення і основи

Spectrum	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Ni	W	Total
Spectrum Verh	0,36	0,03	0,17	17,33	0,77	76,86	0,25	4,24	100
Spectrum Niz	0,31	0,04	0,06	0,13	0,94	98,39	0,03	0,09	100

Проміжний (сторонній) шар є мідним сплавом, що містить ділянки сплаву, що утворився в результаті сплавлення з основним металом (рис. 5.13).

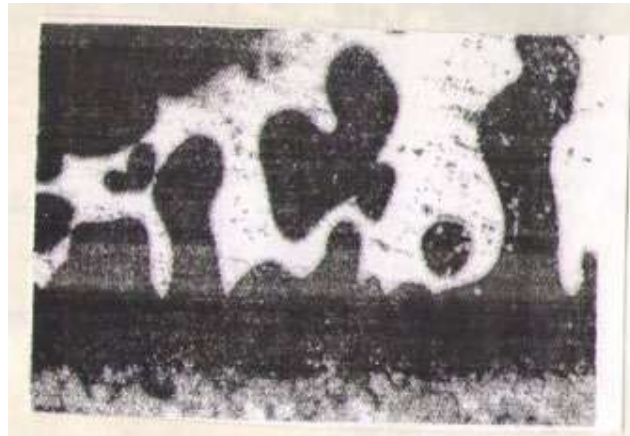


Рис. 5.13 Метал прошарку між основним і наплавленим металами – x1000

Очевидно, зона з'єднання основного і напавленого металів, що формується таким чином, виходить методом паяння.

У промисловості відомі припійні пасти у вигляді порошкових механічних сумішей припою та неорганічних і органічних речовин флюсів. Зокрема, наприклад до таких високотемпературних (нагрівання понад 450 °С) припійних паст відноситься паста марки ПЛВС-3, яка є ідеальною для паяння сталі і чавуну. Вона містить %:  $\text{Cu}_2\text{O}$  – 80...95; активна речовина – 0,1...1,0;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 1...9;  $\text{CH}_4(\text{OH})_2$  – 1...18;  $\text{Li}_2\text{SO}_4$  – 0,01...5; ПАР – 0,01...1;  $\text{H}_2\text{O}$  – 1,4...2,0.

Наявність прошарку дозволяє виключити безпосередню взаємодію сталі і чавуну, але, як показали наші дослідження, забезпечити отримання за допомогою такого прошарку якісного з'єднання металів, мабуть, є складним завданням (рис. 5.14). Межа сплавлення прошарку з основним металом виходить переривчастою з окремими несучільностями, що досягають приблизно 50% зони шліфу.

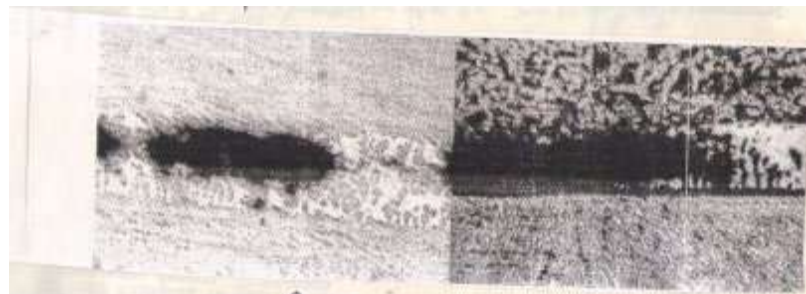


Рис. 5.14 Несучільності у прошарку: а – x150; б - x100

Фірма «Nelson» рекомендує використовувати для захисту від абразивного зношування спеціально виготовлені шпильки, що приварюються до тіла стінки зварювальним пістолетом. Такого типу технології зміцнення розроблено й іншими організаціями, зокрема ДКТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона, ЗАТ «Укрспецтерм». При цьому слід забезпечувати високу щільність розташування шпильок на зношуваній поверхні. Технологія дорога, якщо враховувати, що вартість однієї такої шпильки не менше 3 євро. Аналогічна ситуація складається і при застосуванні технології зміцнення запропонованої «ESCO», зокрема, при приварюванні біметалевих «кнопок», кожна з яких, наприклад, Ø 60 мм коштує не менше 250 грн.

Нижня зовнішня поверхня передньої стінки розглянутими вище методами практично не зміцнюється, саме вона найчастіше визначає довговічність всього ковша. Тому, наприклад, зношуючись зовні, у ній під час експлуатації утворюються глибокі виїмки, розташовані між зубами ковша (рис. 5.15).



Рис. 5.15 Зношування передньої стінки ковша кар'єрного екскаватора ЕКГ-8 у проміжках між його зубами

Наразі і ця швидко зношувана частина передньої стінки стає об'єктом зміцнення. Це досягається приварюванням до робочої поверхні листів зносостійкої сталі типу «Hardox», «Кварц» тощо. Проте ці технічні рішення все ж таки не дозволяють істотно підвищити стійкість стінки проти абразивного зношування.

Оптимальним рішенням зміцнення нижньої зовнішньої поверхні стінки є приварювання на її зношувану частину біметалевих армуючих елементів, одержуваних методом ЕШН у СПК. Така технологія відновлення була застосована для ковша навантажувача «Caterpillar» ємністю 15 м<sup>3</sup>, виготовленого з високоміцної сталі.

Враховуючи форму і розміри виробу, у якості зміцнювачів необхідно було використовувати плоскі біметалеві елементи. Для вирішення цього завдання 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. 5.16).



Рис. 5.16 Струмопідвідний кристалізатор з внутрішнім перерізом 200x200 мм



У зв'язку з тим, що робоча площа СПК квадратного перерізу зросла приблизно в 1.7 рази в порівнянні з площею СПК  $\varnothing$  180 мм, було прийнято рішення використовувати при ЕШН не дріб, а електроди великого перерізу для забезпечення якісного з'єднання центральної частини сталевий заготовки (основного металу) з наплавлюваним шаром високохромистого чавуну.

У якості основного металу була використана пластина зі сталі Ст3 товщиною 12 мм. Наплавним матеріалом слугували електроди квадратного перерізу розміром 120x120 мм, довжиною – 500 мм і з товщиною стінки 15 мм, відлиті за технологією моделей, що виплавляються з високохромистого чавуну (2,8 % С; 28 % Cr) – рис. 5.17. Такої форми і розмірів електрод дозволяє не тільки зміцнити його з'єднання з струмопідводом, але й забезпечити прогрів центральної зони СПК на рівні з його бічними частинами (див. рис. 1.8 підрозділу 1.3). Наплавлювана сталева заготовка (плитка) вводиться всередину формуючої секції СПК, а сам кристалізатор через електроізоляційну прокладку підтискається до технологічного сталевий листа за допомогою шпильок для уникнення протікання шлаку під нижнім торцем формуючої секції.



Рис. 5.17 Наплавні електроди квадратного перерізу 120x120 мм

Початок процесу наплавлення відбувається за технологією твердого старту, тобто наведення шлакової ванни здійснюється за рахунок закорочення графітового наконечника водоохолоджувального електрода наплавної установки з площиною заготівки. У результаті розплавлення флюсу АНФ-29 й підйому шлакової ванни відбувається її електричне замикання з струмопідвідною секцією СПК. Як наслідок – ця секція, будучи кільцевим невитратним електродом, починає підтримувати електрошлаковий процес. Це дозволяє вивести з шлакової ванни водоохолоджувальний електрод із графітовим наконечником. Протягом приблизно 6...7 хвилин відбувається прогрів заготівки теплом шлакової ванни, що обертається. За час прогрівання з різьбового ніпеля водоохолодного електрода скручується наконечник, а на його місце встановлюється спеціальна перехідна сталева втулка з внутрішнім різьбленням, що відповідає різьбленню ніпеля, приварена до торцевої частини переплавленого електрода. Далі витратний електрод вводиться в шлакову ванну, де й відбувається його плавлення (рис. 5.18), з отриманням наплавленого шару товщиною  $20\pm 2$  мм та рівномірним проплавленням основного металу (рис. 5.19).



Рис. 5.18 Процес ЕШН у СПК квадратного перерізу



Рис. 5.19 Наплавлена заготівка (армуючий елемент) та її поперечний переріз

У зв'язку з тим, що до зношеної поверхні необхідно приварювати більш вузькі плитки, наплавлені біметалеві заготівки були порізані навпіл за допомогою технології водяного різання. Таким чином було отримано 30 біметалевих плиток. Їхнє розташування після приварювання електродами показано на рис. 5.20. Техніка приварювання плиток повинна відповідати представлений на рис. 5.21.



біметалева армуюча плитка  
виготовлена в СПК квадратного  
перетину



Рис. 5.20 Ківш навантажувача «Caterpillar» ємністю 15 м<sup>3</sup>, зміцнений зносостійкими листами і біметалевими армуючими елементами (світлого кольору)

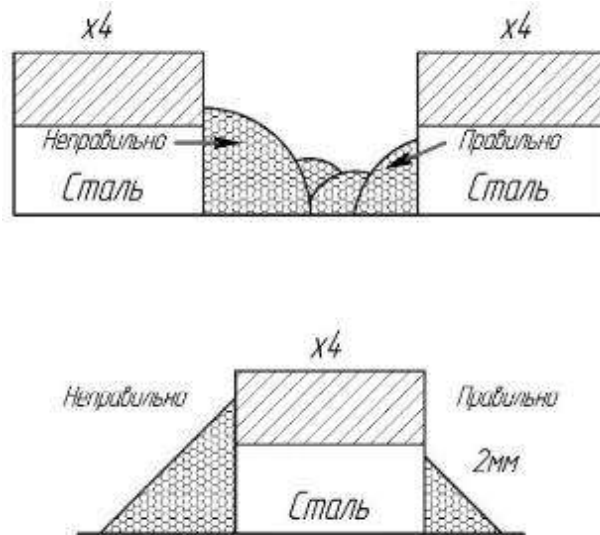


Рис. 5.21 Техніка приварювання біметалевих плиток до поверхні ковша

Незважаючи на те, що наплавлений високохромистий чавун у литому стані показав хорошу стійкість в умовах експлуатації футеровок щоклової дробарки СМД-111, було вирішено частину наплавлених плиток термічно обробити для зняття зварювальних напруг за режимом: закладка в електричну піч при температурі 600...650 °С у печі 1 год, охолодження з піччю до 400 °С з подальшим охолодженням на повітрі.

Як показали результати експлуатації навантажувача протягом 3-х місяців (Додаток Б), довговічність наплавленого чавуну як у ливарному стані, так і в термообробленому не відрізняється. На рис. 5.22 показано ліву сторону зношеної поверхні ковша. Вертикально розташовані біметалеві плитки мають незначне зношування. Плитки, які були розташовані горизонтально в найбільш зношуваній зоні, були повністю зношені. При цьому вони виявилися хорошим бар'єром подальшого зношування плитки зі зносостійкої сталі, також приварених для захисту всієї поверхні стінки ковша, які після віддалення від зони максимального зношування мало змінили розміри.





Рис. 5.22 Ліва сторона зношеної поверхні ковша

Таким чином, встановлена можливість зміцнення ковшів 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. Технологічні параметри наплавлення деталей обох виробів представлені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

## Технологічні параметри ЕШН у СПК

Параметри	Виготовлювальне ЕШН (СМД-111)	Відновлювальне ЕШН (ківш кар'єрного навантажувача)
Наплавочні матеріали	Чавун 2.8% С та 28 % Cr	Чавун 2.8% С та 28 % Cr
Вид наплавочного матеріалу, мм	Дріб Ø 0,8...1,6; електрод Ø 90	Полий електрод □ 120x120x15
Основний метал, мм	Деталь зі сталі Ст3, δ=30	Основа зі сталі Ст3, δ=12
Поперечний розмір СПК, мм	Ø 152	□ 200x200
Робочий флюс	АНФ-29	АНФ-29
Початок наплавлення	Твердий старт	Твердий старт
Глибина шлакової ванни, мм	50...60	50...60
Товщина наплавленого шару, мм	10...15	15...20
Розташування чавуну на зміцнюваній поверхні	Локальне	Локальне
Час наведення шлакової ванни, хв.	4,0...5,0	8,0...9,0
Час наплавлення матеріалу, хв	1,5...2,0	4,0..5,0
Режим наплавлення	II ст.; I=1,2...1,7 кА; U=40...42 В	III ст.; I=2,5...2,9 кА; U=30...32 В
Кутова швидкість обертання шлакової ванни, об/хв.	40...45	30...42
Проплавлення основного металу, мм	1,0...3,0	2,0...3,0

## Висновки за розділом 5

1. Показано, що ефективним способом електрошлакового наплавлення дрібнозернистого високохромистого чавуну з підвищеною опірністю ударним навантаженням є наплавлення електродом великого перерізу та дробом у струмопідвідному кристалізаторі.

2. Встановлено можливість здійснення електрошлакового наплавлення при двосекційному виконанні конструкції струмопідвідного кристалізатора з використанням його мідних секцій. Працездатність сталевий струмопідвідної секції

залежить від марки застосовуваної для його виготовлення сталі та технологічних параметрів системи охолодження секції.

3. Показано перспективність застосування технології отримання багатошарових біметалевих армуючих елементів електрошлаковим наплавленням дробом за розроблення оптимального алгоритму взаємодії під час наплавлення електричних режимів і масової швидкості подачі дробу.

4. Визначено оптимальну схему виконання виготовлювального наплавлення бічних футеровок щокової дробарки СМД-111 з нанесенням на сталеву основу локальних армуючих чавунних елементів завтовшки 15 мм, що займають 35...40% робочої поверхні виробу та дають змогу підвищити стійкість футерування щонайменше удвічі, порівняно зі стійкістю звичайних футеровок, виготовлених зі сталі 110Г13Л.

5. Запропоновано технологію отримання електрошлаковим наплавленням біметалевих армуючих елементів квадратного перерізу (200x200 мм), площі яких більш ніж удвічі перевищують наплавлені площі в струмопідвідному кристалізаторі круглого перерізу ( $\varnothing$  152 мм). Відновлювальне наплавлення з використанням плиток, виготовлених з армуючих елементів з розмірами, що відповідають розмірам поверхонь ковша навантажувача «Caterpillar» ємністю 15м<sup>3</sup>, що найбільше зношуються, дало змогу в міжремонтні строки його експлуатації зберегти працездатність зносостійких листів, що застосовуються для захисту всієї поверхні ковша від абразивного зношування.

## ЗАГАЛЬНІ 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 тривимірною математичною моделлю 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 1,3...1,5 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 катаним електродом зі сталі Х12МФ дисперсність структури підвищується приблизно на 50% в порівнянні з ЕШН ливарним електродом того ж хімічного складу і діаметру.

6. На характеристики структури наплавленого металу великий вплив має вигляд 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%. Для менш складних умов експлуатації слід застосовувати в якості наплавочних матеріалів електроди 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...3,0 рази кількості евтектики, змінюються тип і кількість карбідної фази, та її розподіл у наплавленому металі.

8. Отримані результати промислових випробувань наплавлених електродом та дробом бокових футерувань щоклової 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.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пути повышения износостойкости дробильного оборудования / Г.Д. Каюн, Ю.И. Заславский, Н.П. Куливец, Е.И. Слободниченко // Бюл. «Черная металлургия». 1982. № 4. С. 3-7.
2. Условия формирования структуры экономно легированных сталей, предназначенных для работы при повышенном износе / С.Е. Крылова, В.И. Грызунов, Н.В. Фирсова, С.О. Соколов // МиТОМ. 2011. № 5. С. 38-46.
3. Оптимизация режима работы конусных дробилок мелкого дробления / Е.Г. Баранов, Я.П. Корниенко, Ю.В. Беляев, Н.М. Шолудько // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1981. № 1. С. 45-46.
4. Реновационные наплавочные технологии в металлургии и машиностроении / И.А. Рябцев, Ю.М. Кусков, И.А. Кондратьев, О.Г. Кузьменко // Металлургия машиностроения. 2003. № 1. С. 11-14.
5. Карпенко В.М., Невидомский А.В. Повышение работоспособности роликов МНЛЗ наплавкой порошковой проволокой. – Тезисы докладов научного семинара «Современные достижения в области сварки, наплавки и родственных технологий». Ноябрь, 2000 г., Мариуполь. Мариуполь: ПГТУ. 2000. С. 122-125.
6. Рябцев И.А., Кусков Ю.М. Восстановление крупногабаритных деталей оборудования горно-обогатительных комбинатов методами дуговой наплавки // Сварщик. 2002. № 1. С. 6-8, 11.
7. Коротков В.А., Чубелов В.А. О наплавке конусов доменных печей. – Сварка Урала – 2001: Юбилейная 20-я научно-техническая конференция сварщиков Урала, Нижний Тагил, 27.02-02.03.2001 г. Тезисы докладов. Нижний Тагил: Изд. Нижнетагильского технол. ин-та. 2001. С. 163-166.
8. Разработка и внедрение новых технологий восстановления и изготовления ответственных деталей и технологического инструмента для металлургических предприятий / И.П. Бородин, Ю.С. Шатов, А.И. Болотов и др. – Сварка и родственные

- процессы в промышленности. Доклады 2-го научно-технического семинара. 17.04.2007 г., г. Киев. Киев: Экотехнология. 2007. С. 66-69.
9. Кузнецов Л.Д., Карнеев А.Ф., Николаенко М.Р. Механизированная электродуговая наплавка зубьев ковшей экскаваторов. – Оборудование и материалы для наплавки. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. 1990. С. 20-22
10. Гук В.А. Материалы и технологии наплавки деталей машин, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания // Автоматическая сварка. 200. № 8. С. 13-14, 27.
11. Жудра А.П., Ворончук А.П., Великий С.И. Оборудование и материалы для износостойкой наплавки листовых футеровочных элементов // Автоматическая сварка. 2009. № 6. С. 53-55.
12. Рябцев И.А., Демченко Ю.В. Панфилов А.И. Износостойкий и коррозионностойкий биметалл. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. 2020. 224 с.
13. Коротуов В.А. Восстановление торцовых стенок мельниц наплавкой // Сварочное производство. 2014. № 4. С. 37-40.
14. Рябцев И.А., Кусков Ю.М. Наплавочные материалы для механизированных способов наплавки // Сварщик. 2007. № 5. С. 6-10.
15. Арманский М.И., Беличенко Г.Я., Толстов И.А. Восстановление и упрочнение деталей металлургического оборудования наплавкой // Сварочное производство. 1984. № 7. С. 7-8.
16. Опыт применения электродуговой наплавки порошковой проволокой на предприятиях Украины / А.А. Голякевич, Л.Н. Орлов, Л.С. Малинов, В.И. Титаренко // Автоматическая сварка. 2016. № 9. С. 37-41.
17. Орлов Л.Н., Голякевич А.А. Восстановительная наплавка деталей металлургического оборудования порошковыми проволоками в ООО «ТМ «Велтек». – Тезисы докладов международной конференции «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее» 25-26 ноября 2013 г. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. 2013. С. 177-179.

18. Веселов А.С., Толстобров А.К. Опыт изготовления, реставрации и эксплуатации засыпных аппаратов доменных печей. – Сварка Урала – 2001: Юбилейная 20-я научно-техническая конференция сварщиков Урала, Нижний Тагил, 27.02-02.03.2021 г. Тезисы докладов. Нижний Тагил: Изд. Нижнетагильского технол. ин-та. 2001. С. 154-155.
19. Софрошенков А.Ф., Слободинский И.Н., Семенов С.Л. Порошковая лента для наплавки поверхностей конусов доменных печей // Известия вузов. Черная металлургия. 1999. № 12. С. 42-43.
20. Дуговая наплавка деталей засыпного устройства доменной печи (обзор выполненных работ) / Ю.А. Юзвенко, В.П. Шимановский, В.А. Гавриш, М.А. Пащенко // Автоматическая сварка. 1972. № 2. С. 59-63.
21. Шварцер А.Я., Валиц К.А., Стойко В.П. Техничко-экономическая эффективность электрошлаковой технологии восстановления зубьев ковшей экскаваторов. – Наплавка. Опыт и эффективность применения. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. 1985. С. 62-64.
22. Опыт объемного упрочнения зубьев ковшей экскаваторов / А.Я. Шварцер, В.П. Стойко, К.А. Валиц и др. // Горный журнал. 1973. № 8. С. 50-51.
23. Использование электрошлакового обогрева при упрочнительно-восстановительной наплавке зубьев ковшей экскаваторов / И.В. Киселева, В.В. Дорохов, А.Я. Шварцер, Е.А. Герасимов // Проблемы специальной электрометаллургии. 1989. № 3. С. 28-30.
24. Автоматическая износостойкая наплавка порошковой лентой ПЛ-У30Х30ГЗТЮ зубьев ковша экскаватора Э-652 / Г.А. Кортелев, В.И. Жеравков, А.В. Черепахин и др. // Сварочное производство. 1972. № 6. С. 36-38.
25. Износостойкость высокохромистых чугунов, предназначенных для объемной электрошлаковой наплавки зубьев ковшей роторных экскаваторов / Л.В. Самойленко, А.Я. Шварцер, В.П. Стойко, Ю.А. Сапронов // Сварочное производство. 1972. № 6. С. 36-38.



26. Восстановление черпаков драг электрошлаковой наплавкой / А.Я. Шварцер, В.П. Пономаренко, В.П. Стойко и др. – Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка в машиностроение и ремонте. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. 1981. С. 115-118.
27. Повышение износостойкости дражных черпаков / Ю.В. Хохлов, В.М. Мозок, Ю.А. Юзвенко, В.Г. Лешков. – Научно-технический бюллетень «Цветная металлургия». 1972. № 19. С. 36-38.
28. Ковалев А.Л., Шеенко И.Н., Гапонов О.П. Износостойкая наплавка молотков дробилок электродами карбидного типа // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1970. № 5. С. 69-70.
29. Ефименко Е.Г., Скляр С.И., Балан Л.Н. Порошковая проволока для наплавки деталей горного оборудования. – Тезисы докладов Всесоюзного семинара «Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка в металлургической и горнорудной промышленности». Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. 1988. С. 33-34.
30. Автоматическая наплавка бил молотковых мельниц / В.В. Шимановский, Ю.А. Юзвенко, И.П. Копылец и др. – Информ. письмо ИЭС им. Е.О. Патона. 1980. № 30 (1221).
31. Оптимальная степень измельчения угольной шихты / В.П. Лялюк, В.С. Листопадов, А.В. Кекух и др. // Бюл. «Черная металлургия». 2011. № 3. С. 32-41.
32. Шимановский В.П., Данильченко Б.В., Копылец И.П. Технология и оборудование для износостойкой наплавки деталей системы углеприготовления тепловых электростанций. – Современные способы наплавки и их применение. Киев. ИЭС им. Е.О. Патона. 1982. С. 7-12.
33. Фатеев Л.М. Износостойкая наплавка бил из высокомарганцевой стали Г13ТЛ ленточным порошковым электродом // сварочное производство. 1973. № 3. С. 45.
34. Установка У877М для наплавки бил // Сварщик. 2002. № 2. С. 4.
35. Коротков В.А. Восстановление торцовых стенок мельниц наплавкой // Сварочное производство. 2014. № 4. С. 37-40.

36. Износостойкая наплавка бронифутеровочных плит шаровых барабанных мельниц / В.С. Попов, В.Н. Гордиенко, А.А. Шумилов, О.Ф. Гайдар // Сварочное производство. 1986. № 6. С. 10-11.
37. Гельфер В.А., Либерман В.И. Износостойкая наплавка футеровочных бронеплит шаровых мельниц / Сварочное производство. 1970. № 5. С. 44-45.
38. Кашенко Ф.Д., Фетняев Л.А., Набатчиков С.М. Применение плазменной наплавки для восстановления чугуновых прокатных валков. – Тезисы докладов Всесоюзного семинара «Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка в металлургической и горнорудной промышленности». Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. 1988. С. 11-12.
39. Масык В.П., Маслов А.А. Плазменная наплавка прокатных валков // Тезисы докладов Всесоюзного семинара «Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка в металлургической и горнорудной промышленности». Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. 1988. С. 12-13.
40. Наплавка порошкового материала Пр-10Р6М5 для упрочнения рабочей поверхности металлургического оборудования / Чурсин М.А., Лебедев С.В., Неверов В.В., Клевцов П.Н. // Сварочное производство. 2018. № 2. С. 37-40.
41. Дудко Д.А., Ченгураев Л.И., Эсибян Э.М. Использование воздушной плазмы для износостойкой наплавки бил угледробильных мельниц // Автоматическая сварка. 1977. № 9. С. 65.
42. Чех Ю., Чвурнуг Б. Плазменная наплавка при изготовлении и восстановлении деталей горнодобывающих машин. – Информационные материалы СЭВ. Киев: Наукова думка. 1982. Вып. 1. С. 20-22.
43. Гнюсов С.Ф., Маков Д.А. Структурно-фазовый состав и абразивная износостойкость аустенитных композиционных покрытий. Часть 4 // Технология машиностроения. 2014. № 9. С. 5-10.
44. Сварочные материалы для дуговой сварки. Справочное пособие. Т. 2. М.: Машиностроение. 1993. 768 с.

45. Кулишенко Б.А., Балин А.Н., Филиппов М.А. Электроды для износостойкой наплавки деталей, подвергаемых абразивному и ударно-абразивному воздействию // Сварочное производство. 2004. № 11. С.28-32.
46. Петров И.В., Каковкин О.С., Никаоров М.М. Выбор наплавочного материала, износостойкого при высоком коэффициенте динамичности нагрузок // Сварочное производство. 1973. № 3. С. 29-30.
47. Лившиц Л.С., Гринберг Н.А., Куркумелли Э.Г. Основы легирования наплавленного металла. М.: Машиностроение. 1969. 188 с.
48. Гринберг Н.А., Мамаев П.Н. Наплавочные сплавы для повышения срока службы деталей машин, работающих при низких температурах // Автоматическая сварка. 1980. № 7. С. 52-54.
49. Индукционная наплавка зубьев ковша композиционным шихтовым материалом / А.А. Панюта, В.Т. Зыкин, С.Б. Рожкова, Д.Д. Остров // Сварочное производство. 1987. № 2. С. 7.
50. Механизированная наплавка порошковой лентой открытой дугой зубьев ковшей экскаваторов / А.Г. Леонов, В.Н. Харитонов, Г.И. Ковалеров и др. // Сварочное производство. 1976. № 9. С. 41.
51. Износостойкость и структурно-фазовые состояния поверхности наплавки, сформированной на стали сварочным методом / С.В. Райков, К.В. Соенин, Е.В. Капралов и др. // Технология металлов. 2014. № 10. С. 35-40.
52. Бондарчук Н.А. Опыт наплавки прокатного инструмента и деталей оборудования на трубопрокатном заводе. – Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка деталей и оборудования в металлургии и энергетики. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. 1980. С. 62-67.
53. Широкойнослойная износостойкая наплавка зубьев ковшей экскаваторов ЭКГ-4,6 / В.В. Меликов, М.О. Бродянский, Л.Е. Шейнман и др. // Сварочное производство. 1977. № 8. С. 45-46.

54. Оптимизация технологии упрочняющей наплавки / В.И. Титаренко, Л.Н. Орлов, А.А. Голякевич, С.П. Гиук // Сварщик. 2003. № 1. С. 12-13.
55. Лукинский Б.А. Восстановление наплавкой деталей дробильно-размольного оборудования // Автоматическая сварка. 1979. № 3. С. 42-43.
56. Белов В.С. Полуавтоматическая наплавка легированной порошковой проволокой изношенных бил роторных дробилок // Сварочное производство. 1972. № 5. С. 42-43.
57. Руководство по электрошлаковой сварке / Под ред. Б.Е. Патона. – Киев-М.: Машгиз. 1956. 168 с.
58. Электрошлаковая сварка и наплавка / Под ред. Б.Е. Патона. М.: Машиностроение. 1980. 511 с.
59. Электрошлаковая наплавка бил молотковых дробилок / М.П. Иванан, А.И. Мельников, М.И. Эрмантраут и др. // Сварочное производство. 1974. № 7. С. 48.
60. Электрошлаковая наплавка бил углеразмольных мельниц / В.П. Стойко, Д.Б. Золотаревский, В.И. Грохольский и др. // Автоматическая сварка. 1968. № 7. С. 62-63.
61. Пономаренко В.П., Киселева И.В., Строганова Г.В. Электрошлаковая наплавка изношенных молотков дробилок // Автоматическая сварка. 1987. № 3. С. 59-60.
62. Blaskovic P., Smitmajer Z. ES-Aultragsschweissen von walzen für Hüttenbetriebe und Hammerbrachter // Schweisstechnik. 1975. № 9. S. 395-396.
63. Электрошлаковая наплавка бил дробилок ударного действия / А.Я. Шварцер, С.И. Шаповал, Г.В. Луговая и др. // Сварочное производство. 1978. № 7. С. 15-16.
64. Изготовление молотков дробилок с помощью электрошлаковой наплавки / С.Я. Шехтер, В.В. Пьянков, Н.С. Веселый, Т.Л. Дритова. – Теоретические и технологические основы наплавки. Повышение работоспособности наплавленных деталей. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. 1989. С. 25-26.
65. Эрмантраут М.М., Малимонов В.И. Применение неплавящегося электрода при электрошлаковой наплавке // Сварочное производство. 1978. № 7. С. 16-18.

66. Восстановление зубьев ковшей экскаваторов электрошлаковой наплавкой / К.А. Валиц, В.П. Стойко, А.Я. Шварцер и др. // Горный журнал. 1981. № 1. С. 16-17.
67. Шварцер А.Я., Стойко В.П., Самойленко Л.В. Электрошлаковая наплавка и отливка с постоянной шлаковой ванной // Автоматическая сварка. 1970. № 6. С. 60-63.
68. Валиц К.А., Шварцер А.Я. Электрошлаковая наплавка зубьев ковшей экскаваторов сталью 110Г13Л // Автоматическая сварка. 1987. № 3. С. 58.
69. Электрошлаковая сварка и наплавка в ремонтных работах / И.И. Сущук-Слюсаренко, И.И. Лычко, М.Г. Козулин, В.М. Семенов. Киев: Наукова думка. 1989. 192 с.
70. Валиц К.А., Шварцер А.Я., Корицкий Г.Г. Восстановление деталей из высокомарганцевой стали 110Г13Л электрошлаковой наплавкой // Автоматическая сварка. 1989. № 5. С. 64-65.
71. Lakatoš L. Probleme beim Elektroschlacke – Auftrag – Schweißen von Gusseisen // Schweisstechnik. 1967. № 8. S. 89-92.
72. Zeke I., Zelko I. Employment of Electroslag Process of Melting for Welding of Very Heavy Sections and for Surfacing // Second International Symposium on Electroslag Remelting Technology Proceeding. 1969. Part II. P. 46-52.
73. Блашкович П., Пекница П. Стойкость наплавленных электрошлаковым способом валков для горячей прокатки листа. – Информационные материалы стран-членов СЭВ. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. 1979. № 1. С. 49-51.
74. Blaškovič P. Production of grooved and pilger rolls using the method of electroslag welding // Zvaranie. 1970. № 9-10. S
75. Hano O. Erfahrungen mit dem Auftragschweißen von Walzwerks walzen in der CSSR // Schweißen und Scheiden. 1971. H. 4. S. 142-145.
76. Ridal K.A., Bagshow T. 7 – Welding steelworks rools // Weld Surfacing and Hardfacing. The Welding Institute. Abington. Cambridge. 1980. P. 40-46.
77. Folly W.R., Pres V., Huber W.R. Reclaiming rolling mill rolls by welding // Iron and Steel Eng. 1974. S 1. № 4. P. 72-74.

78. Ries G.D., Haser I.M., Dobina D.V. A solution to problems in mill roll salvage by welding // Iron and Steel Eng. 1980. № 8. P. 44-48.
79. Sorby M.I. Developments in the weld surfacing of steel mill rolls // Svetsaren (a welding review). 1983. № 1. P. 1-6.
80. Hano O. Electroslag surfacing of plain rolls // Zvaranie. 1970. № 9-10. P. 318-324.
81. Кусков Ю.М., Фрумин И.И., Кседзык Г.В. Электрошлаковая наплавка хромистого чугуна применительно к валкам горячей прокатки // Технология и организация производства. 1976. № 9. С. 46-48.
82. Олейниченко В.И., Вишнеvский А.В., Молодан Г.А. Электрошлаковая наплавка «трубчатым» электродом заготовок прокатных валков // Сварочное производство. 1976. № 9. С. 40-41.
83. Опыт изготовления двухслойных валков электрошлаковой наплавкой / В.И. Рыбалка, А.А. Маслов, И.С. Сотник и др. // Сварочное производство. 1977. № 1. С. 41-42.
84. Кусков Ю.М., Фрумин И.И., Кседзык Г.В. Износостойкость и термическая выносливость наплавленного хромистого чугуна // Автоматическая сварка. 1978. № 6. С. 64-67.
85. Применение технологии электрошлаковой наплавки расходуемым электродом при производстве композитных сортопрокатных валков / С.Г. Красильников, В.П. Гулида, И.С. Савченко, С.Н. Литвиненко // Сварщик. 2007. № 2. С. 6-7.
86. Iwadoh Shuidhi, Mori Toshikazu. Effect of Work Roll Materials and Progress of Manufacturing Technology on Cold Rolling and Future Developments in Japan // ISIJ International. 1992. 32. № 11. P. 1131-1140.
87. Development of High Performance New Composite Roll / Shimizu Masaki, Shitamura Osamu, Matsuo Shusuke et al // ISIJ International. 1992. 32. № 11. P. 1244-1249.
88. Бегшоу Т., Летчер П., Крофтс Р. Применений ЭШП для улучшения качества валков // Электрошлаковый переплав. – материалы м/н конф. По технологии

электрошлакового переплава, г. Шеффилд, Англия, 10-11 января 1973 г. Вып. 2. Киев: Наукова думка. 1974. С. 131-148.

89. Electroslag Relamination on Mill Rolls / Squires I., Crammond D.R., Chipperfiels C.G., Bramblett J.D. // Oral Presentation for the ATS Steelmaking Conference. Paris. 30 November – 1 December 1988.

90. Применение электрошлакового переплава для производства плакированных валков / С. Кубиш, П. Преслер, П. Махнер, О. Кляйнхагауэр. – Электрошлаковый переплав. Материал V м/н симпозиума. Питсбург, США. 1974. 16-18 сентября. Вып. 4. Киев: Наукова думка. 1977. С. 176-183.

91. Bimetallic Rolling Mill Cylinders Obtained by Electroslag Remelting of Tubular Metal Powder Electrodes / Ramacciotti A., Repetto E., Sommovigo P., Songini G. // Proceeding of the seven international conference on vacuum metallurgy, special melting's and metallurgical coatings. November 26-30. 1982. Tokyo. Japan. P. 1478-1485.

92. Электрошлаковая наплавка пресс-матриц / А.Н. Падун, А.Н. Уршанский, А.Д. Киселев, А.Ю. Иконников // Сварочное производство. 1987. № 9. С. 14.

93. Соколов Г.Н., Филюшин А.А. Электрошлаковая наплавка торцовых объемов деталей штампов. – Современные способы наплавки и их применение. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. 1982. С. 84-89.

94. Шварцер А.Я. Восстановление буровых шарошек методом наплавки // Автоматическая сварка. 1960. № 5. С. 50-55.

95. Шварцер А.Я., Сапронов Ю.А., Бравинский Г.А. Восстановление шарошечных долот электрошлаковой наплавкой // Сварочное производство. 1968. № 3. С. 41-42.

96. Электрошлаковая наплавка деталей группой пластинчатых электродов / А.Я. Шварцер, В.П. Пономаренко, В.П. Стойко, В.М. Бандалин // Сварочное производство. 1981. № 1. С. 23-25.

97. Пономаренко В.П. Разработка и исследование сплавов для электрошлаковой наплавки деталей из высокохромистых сталей / Автореферат на соискание уч. степени канд. техн. наук. Донецк, Донецкий политехнический институт. 1983.

98. Данильченко Б.В., Субботовский В.П. Электрошлаковая наплавка некоторых видов ковочных штампов // Автоматическая сварка. 1964. № 1. С. 71-74.
99. Аржакин А.Н., Столяров И.И. Электрошлаковая наплавка штампов напряженной конструкции // Автоматическая сварка. 1973. № 7. С. 71-72.
100. Лихошерстов Д.М., Арсенкин В.Т., Шаханов Д.Д. Восстановление штампового инструмента горячего деформирования электрошлаковыми методами // Литейное производство. 1982. № 5. С. 17.
101. Рыков А.И., Бураковская Л.В. Ремонт ковочных штампов электрошлаковой наплавкой пластинчатым электродом // Сварочное производство. 1970. № 6. С. 37-38.
102. Исследование возможности получения различных форм гравюр при электрошлаковой наплавке штампов / Д.М. Лихошерстов, В.Г. Радченко, В.Т. Арсенкин, В.Н. Шабалин – Труды Алтайского политехнического института им. И.И. Ползунова. Вопросы технологии производства деталей машин. Алтайское книжное издательство. 1968. Вып. 1. С. 223-231.
103. Электрошлаковая наплавка штампов / Д.М. Лихошерстов, В.Д. Радченко, В.Т. Расенкин, В.Н. Шабалин – Труды Алтайского политехнического института им. И.И. Ползунова. Вопросы технологии производства деталей машин. Алтайское книжное издательство. 1968. Вып. 1. С. 233-237.
104. Сущук-Слюсаренко ИИ., Шевченко Н.Т., Вергела А.Г. Электрошлаковая наплавка деталей кузнечнопрессового и прокатного оборудования // Автоматическая сварка. 1968. № 8. С. 75-76.
105. Розенберг О.О., Музыченко К.К., Малкин Л.С. Восстановление шевронных зубьев уникальных шестерен кривошипно-трубных прессов электрошлаковой наплавкой // Автоматическая сварка. 1966. № 11. С. 53.
106. Козулин С.М., Лычко И.И. Электрошлаковая наплавка зубьев крупномодульных шестерен // Автоматическая сварка. 1987. № 3. С. 62-64.



107. Устройство для электрошлаковой наплавки зубьев крупномодульных шестерен / С.М. Козулин, И.И. Лычко, В.М. Козулин, А.П. Бордовский // Автоматическая сварка. 1987. № 11. С. 74-75.
108. Відновлення зношених косозубих великомодульних шестерень електрошлаковим наплавленням / С.М. Козулін, И.И. Лычко, Г.С. Ковальчук та інші // Автоматичне зварювання. 2021. № 6. С. 44-50.
109. Опыт электрошлаковой наплавки звездочек дробилок агломерата // А.А. Закитин, В.Г. Шефер, Г.А. Никулинский и др. // Сварочное производство. 1978. № 7. С. 15-16.
110. Исследование структуры композиционного сплава в зависимости от режима электрошлаковой наплавки / В.В. Разинский, С.Я. Шехтер, А.М. Резницкий и др. – Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. 1979. С. 48-50.
111. Разинский В.В., Лазаренко Ю.Н. Питатель для подачи порошкообразных материалов при электрошлаковой наплавке композиционным материалом // Автоматическая сварка. 1979. № 12. С. 63-64.
112. Меликов В.В. Многоэлектродная наплавка. М.: Машиностроение. 1988. 140с.
113. Многоэлектродная горизонтальная электрошлаковая наплавка износостойких сплавов и ее особенности / В.В. Меликов, Л.Н. Демченко, Л.И. Цветкова, В.И. Зубарева. – Современные методы наплавки и износостойкие наплавочные материалы. Харьков. 1970. С. 152-153.
114. Степень однородности легирования при электрошлаковой наплавке горизонтальной поверхности // В.В. Мельник, Е.Л. Шейнман, М.О. Бродянский, Л.Н. Цветкова // Сварочное производство. 1972. № 8. С. 37-38.
115. Многоэлектродная наплавка деталей из высокомарганцовистой стали / В.В. Мельник, Е.Л. Шейнман, М.О. Бродянский, В.Н. Лю. – Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка в металлургической и горнорудной промышленности. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. 1988. С. 32-33.

116. Восстановление изношенных штампов с использованием электрошлакового обогрева переплавок стружки / В.А. Носов, Ю.А. Стеренбоген, О.Г. Кузьменко и др. – Информписьмо: ИЭС им. Е.О. Патона. 1986. № 24. Серия «Наплавка и напыление».
117. Носов В.А., Стеренбоген Ю.А., Кузьменко О.Г. Восстановление штампов с применением электрошлакового обогрева // Кузнечно-штамповочное производство. 1987. № 3. С. 11-12.
118. Кузьменко О.Г. Восстановление инструмента для горячей объемной штамповки электрошлаковой наплавкой некомпактными материалами. – Диссертация на соискание уч. степени канд. техн. наук. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. 2002. 157 с.
119. Кузьменко О.Г., Носов В.А. Получение инструмента и технологической оснастки повышенной работоспособности электрошлаковой наплавкой с использованием отходов инструментального производства. – Современные инструменты и инструментальные материалы. Материалы конференции. Ялта. 2-4 октября 1996 г. Киев: Знание. 1996. С. 29-30.
120. Комплекс оборудования для электрошлаковой наплавки жидким металлом / В.А. Носов, О.Г. Кузьменко, Овчинникова Т.Х. и др. – оборудование и материалы для наплавки. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. 1990. С. 22-25.
121. Шкода В.А., Берман К.А. Участок для получения двухслойных заготовок штампов под слоем шлака // Литейное производство. 1986. № 1. С. 27-28.
122. Новый способ получения литых двухслойных заготовок штампов / Н.А. Мосендз, А.В. Зачеренский, Г.А. Кладити, В.М. Ивчик // Кузнечно-штамповое производство. 1981. № 3. С. 6-7.
123. Новый процесс получения биметалла с коррозионностойким планирующим слоем / Б.Е. Патон, Ю.А. Стеренбоген, Н.А. Мосендз и др. // Сталь. 1983. № 7. С. 16-17.
124. Кузьменко О.Г. Применение ЭШН жидким металлом для получения многослойного металла. – Современные проблемы металлургии, технологии сварки и

наплавки стали и цветных металлов. Тезисы докладов м/н конф. Киев. 25-26 октября 2012 г. Киев: ИЭС им. Е.О.Патона. 2012. С. 19.

125. Method of electroslag surfacing of components having a cylindrical surface. Asai Voshihiko, Hori Masao, Tokimitsu Naoki. Pat. 4373128. USA. B23K 9/04. B23K 25/00. Оpubл. 08.02.83.

126. Филиппов И.А., Луговых В.Е., Адриановская Н.Б. Износостойкость углеродистых метастабильных аустенитных сталей при абразивном изнашивании // МиТОМ. 1989. № 5. С. 55-58.

127. Николенко А.С., Кривоспицкий В.М., Харитонов В.Ф. О кинетике упрочнения высокомарганцевых сталей // Известия вузов. Черная металлургия. 1968. № 5. С. 99-102.

128. Григоркин В.И. К вопросу о природе упрочнения аустенитных сталей // Известия вузов. Черная металлургия. 1963. № 2. С. 95-103.

129. Даляева Л.И. Теоретические основы упрочнения стали Г13 при наклепе. – Труды ЦНИИТМАША. КН.106. М.: Машгиз. 1963. С. 182-192.

130. Филиппов М.А., Плотников Г.Н. Разработка новых сталей для износостойких отливок на основе метастабильного марганцевого аустенита // Сталь. 1996. № 6. С. 62-64.

131. Каранула М.В., Парфенов Л.И. Лабораторный контроль стали Г13Л на износостойкость // Литейное производство. 1968. № 7. С. 37-38.

132. Блюхер В.В., Парфенов Л.И. Волчок И.П. Свойства пластически деформированной высокомарганцевой стали // МиТОМ. 1970. № 12. С. 32-33.

133. Воронова Н.А., Теслюк А.К. Зубья ковшей экскаваторов ЭКГ-4 их хромомолибденовой стали // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1965. № 1-2. С. 72-74.

134. Мадэй К. Исследование и разработка технологии наплавки высокомарганцевой стали и упрочнения наплавочного слоя при восстановлении крестовин. – Диссертация на соискание уч. степени канд. техн. наук. Киев. 1977.

135. Повышение износостойкости горно-обогатительного оборудования / А.М. Шестаков, В.А. Джур, Г.Н. Зимокос, В.М. Тимофеев – Бюл. НТИ «Черная металлургия». 1979. № 1. С. 32.
136. Гарбер М.Е. Отливки из белых износостойких чугунов. – М.: Машиностроение. 1972. 112 с.
137. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. – М.: Металлургия. 1983. 176 с.
138. Абразивостойкие высокохромистые чугуны / В.П. Гаврилюк, В.И. Тихонович, И.А. Шалевская, Ю.И. Гутько. – Луганск: Ноулидж. 2010. 141 с.
139. Износостойкие хромистые сплавы / Е.В. Рожкова, В.В. Румянцев, О.М. Романов, А.В. Трещалин // Металлургия машиностроения. 2002. № 1. С. 19-21.
140. Марукови Е.И., Карпенко М.И. Износостойкие сплавы. – М.: Машиностроение. 2005. 428 с.
141. Липницкий А.М. Плавка чугуна и сплавов цветных металлов. – М.: Машиностроение. 1973. 192 с.
142. Rohrig K. Gefüge und Beständigkeit gegen Mineralverschleisse von carbidischen Gusseisen // Giesserei. 1971. № 23. S. 697-706.
143. Золочевский Г.Л. Анализ теоретических предпосылок и технологических методов улучшения свойств износостойких белых чугунов. – Новое в металловедении и металлургической технологии материалов для машиностроения. М.: 1972. № 102. С. 13-28.
144. Присевок А.Ф., Яковлев Г.М. Даукнис В.И, Исследование механизма разрушения сплавов при трении их о закрепленные абразивные зерна. – Прогрессивная технология машиностроения. Минск: Вышэйшая школа. 1971. С. 120-126.
145. Попов В.С., Нагорный П.Л. Влияние карбидов на абразивную износостойкость сплавов // Литейное производство. 1969. № 8. С. 27-29.
146. Fremunt P., Pacal B., Rusnak Z. Vysokolegovana vanadova litina // Slevarenstvi. 1971. Bd.19. № 9. S. 384-387.

147. Бунин К.П., Таран Ю.Н. Строение чугуна. – М.: Metallurgiya. 1972. 160 с.
148. Таран Ю.Н., Мазур В.И. Структура эвтектических сплавов. – М.: Metallurgiya. 1978. 312 с.
149. Patentschrift DE 27 46 256 C3 BR, C21c 5/52 Ringförmige Kokille für Anlagen zum Electroschlacke – Umschmelzen bzw. Auftragschweissen von metallen / G.V. Ksendzyk, I.I. Frumin, V.S. Shirin. – Anmeldetag 14.10.77. Offenlegungstag. 19.04.79.
150. Patent 4.305.451 US, B22D 27/02 Electroslag Remelting and Surfacing Apparatus / G.V. Ksendzyk, I.I. Frumin, V.S. Shirin. – Fil. 23.06.77. Publ. 15.12.81.
151. Metallurgiya elektroshlakovogo protsessa / Под ред. Б.Е. Патона и Б.И. Медовара. – Киев: Наукова думка. 1986. 248 с.
152. Миронов Ю.М. Установки электрошлаковой металлургической технологии. М.: Инфра-М. 2013. 404 с.
153. Анодное разрушение кристаллизаторов при ЭШП / Б.И. Медовар, В.Л. Артамонов, В.М. Баглай, В.П. Сокол. – Рафинирующие переплавы. Киев: Наукова думка. 1974. С. 35-40.
154. Величко Т.Л., Никулин А.А. Явление на границе ванна-гильза кристаллизатора при электрошлаковом переплаве // Электротермия. 1977. № 5. С. 15-17.
155. К вопросу об анодном разрушении в шлаке при ЭШП токоведущих металлических элементов / Б.Л. Артамонов, Б.И. Медовар, В.М. Мартин, Е.М. Гисер // Спец. электрометаллургия. 1972. Вып. 17. С. 3-10.
156. Электрошлаковая наплавка электродом большого сечения на постоянном токе в токоподводящем кристаллизаторе / Ю.М. Кусков, В.Г. Соловьев, П.П. Осечков, В.В. Осин // Автоматическая сварка. 2018. № 3. С. 38-42.
157. Кусков Ю.М. Влияние состава флюса на процесс торцевой электрошлаковой наплавки с отдельной подачей присадочного материала // Автоматическая сварка. 2017. № 12. С. 44-49.

158. Наплавка. Управление проплавлением основного металла и формированием наплавленных слоев / И.А. Рябцев, Ю.М. Кусков, Е.Ф. Переpletчиков, А.А. Бабинец. – Киев: Интерсервис. 2021. 392 с.
159. Наплавка. Управление проплавлением основного металла и формированием наплавленных слоев / И.А. Рябцев, Ю.М. Кусков, Е.Ф. Переpletчиков, А.А. Бабинец. К.: Интерсервис. 2021. 392 с.
160. Б. Кусков Ю.М., Богайчук И.Л., Фесенко М.А. О возможности передачи при электрошлаковой наплавке параметров структуры в системе дискретный наплавочный материал – наплавленный металл // Электromеталлургия. 2021. № 4. С. 30-37.
161. Кусков Ю.М., Богайчук И.Л., Фесенко М.А. Влияние размера наплавочной дроби и технологических параметров электрошлаковой наплавки на структурообразование наплавленного высокохромистого чугуна // Электromеталлургия. 2021. № 7. С. 12-18.
162. Кусков Ю.М., Соловьев В.Г. Экспериментальное изучение вращения шлаковой и металлических ванн при электрошлаковом процессе в токоподводящем кристаллизаторе // Автоматическая сварка. 2018. № 7. С. 41-44.
163. Ксендзык Г.В. Токоподводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны // Спец. электromеталлургия. 1975. Вып. 27. С. 32-40.
164. Электрошлаковая сварка (руководство по электрошлаковой сварке) / Под ред. Б.Е. Патона. – Киев-М.: Машгиз. 1956. 168 с.
165. Измельчение макроструктуры слитков при электрошлаковом переплаве сплавов / В.В. Топилин, М.М. Ключев, Н.П. Фомичева, Ю.Г. Гребцов // Спец. электromеталлургия. 1968. № 1. С. 23-28.
166. Мургаш М., Чаус А.С. Использование магнитного поля при электрошлаковом переплаве стали // Физика и химия обработки материалов. 1998. № 2. С. 99-107.
167. Тир Л.Л. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией металла в электропечах / Тир Л.Л., Столов М.Я. Москва: Металлургия, 1991. 280 с.

168. Соколов Г.Н. Электрошлаковая наплавка в секционном кристаллизаторе оправок трубопрошивного стана / Г.Н. Соколов, А.Н. Михеев, А.А. Павлов. Сварочное производство. 2002. № 6. С. 31-34.
169. Пальти А.М. Компьютерное моделирование электрошлаковой наплавки в водоохлаждаемом кристаллизаторе / Пальти А.М., Юрченко Д.Д. Сварочное производство. 2006. № 9. С. 12-15.
170. Карвацкий А.Я. Исследование электрического контактного сопротивления графита с медью и терморасширенным графитом / А.Я. Карвацкий, С.В. Лелека, И.В. Пулинец, Т.В. Лазарев, А.Ю. Педченко. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 5(5). С. 45-49. Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte\\_2014\\_5%285%29\\_\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2014_5%285%29__10)
171. Kharicha A. Review on Modeling and Simulation of Electroslag Remelting / Abdellag Kharicha, Ebrahim Karimi-Sibaki, Menghuai Wu, Andreas Ludwig, Jan Bohacek. Steel Research International. 2018. Vol. 89. No. 1. 1700100. 20 p. Режим доступа: <https://doi.org/10.1002/srin.201700100>
172. Бондар О.І. Системи електромагнітного перемішування рідкого металу з почерговою дією пульсуючого і біжучого магнітних полів : автореф. дис.... канд. техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / Бондар Олексій Ігорович; НАН України, Ін-т електродинаміки. Київ, 2019. 20 с.
173. Кусков Ю.М. Дискретные присадочные материалы для наплавки в токоподводящем кристаллизаторе // Автоматическая сварка. 2014. № 6, 7. С. 101-106.
174. Кусков Ю.М., Богайчук И.Л., Фесенко М.А. Влияние размера наплавочной дроби и технологических параметров электрошлаковой наплавки на структурообразование наплавленного высокохромистого чугуна // Электromеталлургия. 2021. № 7. С. 12-18.
175. Никитин В.И. Наследственность в литых сплавах. – Самара: СамГТУ. 1995. 248 с.

176. Никитин В.И. Перспективы технологий генной инженерии в сплавах // Литейное производство. 1999. № 1. С. 5-9.
177. Гаврилин И.В., Костин А.В. Переплавление отходов от обнажачивания чугуновых и стальных отливок // Литейное производство. 1998. № 8. С. 14.
178. Новые флюсы АНФ-28, АНФ-29 и АНФ-32 для ЭШП в подвижных кристаллизаторах / В.Л. Артамонов, Б.И. Медовар, Т.Н. Лихачева, А.А. Ждановский // Спец. электрометаллургия. 1976. Вып. 30. С. 30-38.
179. Использование нетоковедущих расходуемых заготовок при электрошлаковой наплавке в токоподводящем кристаллизаторе / Ю.М. Кусков, В.Г. Соловьев, П.П. Осечков, В.А. Жданов // Автоматическая сварка. 2018. № 4. С. 49-52.
180. Электрошлаковые технологии наплавки и рециклинга металлических и металлосодержащих отходов / Ю.М. Кусков, И.А. Рябцев, О.Г. Кузьменко, И.П. Лентюгов. Киев: Интерсервис. 2020. 288 с.
181. Электрошлаковая наплавка / Ю.М. Кусков, В.Н. Скороходов, И.А. Рябцев, И.С. Сарычев. М.: ООО «Наука технологии». 2001. 180 с.
182. ЭШН ЖМ – как способ получения тонкой структуры наплавленного слоя из быстрорежущей стали / Б.И. Медовар, А.В. Чернец, Л.Б. Медовар и др. // Проблемы спец. электрометаллургии. 1997. № 1. С. 3-4.
183. Создание комплекса ЭШН жидким присадочным металлом рабочих валков горячей прокатки для непрерывных широкополосных станов / В.Б. Шабанов, О.В. Свиридов, Ю.Н. Белобров и др. // Автоматическая сварка. 1999. № 9. С. 51-54.
184. Гаврилин И.В., Костин А.В. Переплавление отходов от обнажачивания чугуновых и стальных отливок // Литейное производство. 1998. № 8. С. 14.
185. Влияние метода выплавки присадочного материала на свойства сварных соединений среднелегированных высокопрочных сталей / Р.С. Курочко, В.Е. Лазько, М.В. Поплавко и др. // Сварочное производство. 1976. № 2. С. 9-10.
186. Кусков Ю.М., Сарычев И.С. Восстановительная электрошлаковая наплавка чугуновых валков стана 2000 // Сварочное производство. 2004. № 2. С. 39-43.



187. Получение электрошлаковой наплавкой биметаллических армирующих элементов для упрочнения деталей машин и механизмов / Ю.М. Кусков, В.А. Жданов, В.Н. Проскудин, А.В. Нетяга. // Сварщик. 2020. № 6. С. 6-7.
188. 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. volume 51, issue 4, 2021, pages 267-26915:47
189. Нетяга А.В., Кусков Ю.М., Биктагирова Ф.К. Получение многослойного биметаллического слитка с использованием электрошлаковых технологий. – Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві». 21-24.09.2021 р. Краматорськ ДДМА: 2021, с. 90-91.

### ДОДАТОК А

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник директора  
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України  
член-кор. НАН України

Заступник директора  
з науково-технічної діяльності  
НТК «ІЕЗ ім. Є.О. Патона»  
НАН України

*[Handwritten signature]*



ІГОР КУСІМОВ



Валерій ПРОСКУДІН

ТОВ НВП «ПРОМКОМПЛЕКТ»

ВІКТОР БОВСУНОВСЬКИЙ

### ТЕХНІЧНИЙ АКТ

Даний акт складений про те, що відділом №2 ІЕЗ ім. Є.О. Патона в рамках виконання відомчого замовлення 2/6 та теми 2/21 програми «Ресурс», а також госпдоговору №561 між відділом №2 ІЕЗ ім. Є.О. Патона та НТК «ІЕЗ ім. Є.О. Патона» НАН України (Субпідрядник – ТОВ НВП «Промкомплект», м. Коростень) були проведені дослідження по вибору технології зміцнення нижнього футерування шокової дробарки СМД-111, що експлуатується в умовах переробки базальту, який має підвищену абразивність, за допомогою електро-шлакового наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі Ø 152 мм.

В результаті експлуатації дослідного футерування протягом семи місяців, встановлено, що зношування армуючих чавунних елементів складо не більше ніж 30%.

Для порівняння: стійкість футерування, що використовується для цієї дробарки, виготовленого із сталі 110Г13Л, складає близько 5 місяців.

<p>Від ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України</p> <p>Зав. відділу №2</p> <p><i>[Signature]</i> Ігор РЯБЦЕВ</p>	<p>Від НТК «ІЕЗ ім. Є.О. Патона» НАН України</p> <p>Провідний інженер</p> <p><i>[Signature]</i> Антон НЕТЯГА</p>
<p>Пров. наук. співр., д.т.н.</p> <p><i>[Signature]</i> Юрій КУСКОВ</p>	<p>Від ТОВ НВП «Промкомплект»</p> 

## ДОДАТОК Б

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник директора  
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України  
член-кор. НАН України



Сергій МАКСИМОВ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Директор  
ТОВ «Екотехнологія-Сервіс»

Анатолій КУДЕЛІН

ТОВ "ВКФ КРИВБАСТЕХМАШ"

Ігор ЧІРКОВ

## ТЕХНІЧНИЙ АКТ

Даний акт складений про те, що відділом №2 ІЕЗ ім. Є.О. Патона в рамках виконання відомчого замовлення 2/6 та теми 2/21 програми «Ресурс», а також госпдоговору №656 між відділом №2 ІЕЗ ім. Є.О. Патона та ТОВ «Екотехнологія-Сервіс» (Субпідрядник – ТОВ "ВКФ КРИВБАСТЕХМАШ") були проведені дослідження по вибору технології зміцнення найбільш схильної до зносу нижньої зовнішньої поверхні ковша навантажувача «Caterpillar» ємністю 15 м.куб., що експлуатується в кар'єрі Криворізького ГЗК, за допомогою електро-шлакового наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі.

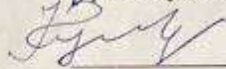
Тримісячний досвід експлуатації ковша, відновленого з використанням нової технології зміцнення, показав гарний опір біметалу до абразивного зносу без будь-яких дефектів в наплавленому шарі. Для отримання більш високих результатів експлуатації, рекомендовано у майбутньому збільшити шар високохромистого чавуну до 30 мм.

Від  
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

Зав. відділу №2


 Ігор РЯБЦЕВ

Пров. наук. співр., д.т.н.


 Юрій КУСКОВ

Інженер


 Антон НЕТЯГА

Від  
ТОВ "ВКФ КРИВБАСТЕХМАШ"

Головний механік



Андрій Панін