

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О. ПАТОНА

**ПРОТОВОКІЛОВ  
ІГОР ВІКТОРОВИЧ**

УДК 669.187.56

**ЕЛЕКТРОШЛАКОВИЙ ПЕРЕПЛАВ ВИСОКОРЕАКЦІЙНИХ І  
ПРЕЦИЗІЙНИХ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ З НЕСТАЦІОНАРНИМИ  
РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЖИВЛЕННЯ І  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ**

Спеціальність 05.16.02

"Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів"

**РЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук



Київ – 2023

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор

**Компан Ярослав Юрійович**

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН  
України

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор

**Пройдак Юрій Сергійович**

Український державний університет науки і технологій  
МОН України, проректор з наукової роботи

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Гречанюк Микола Іванович**

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича  
НАН України, провідний науковий співробітник відділу  
зносостійких та корозійностійких порошкових  
конструкційних матеріалів

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Нурадинов Абди Сайдахматович**

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН  
України, провідний науковий співробітник відділу  
безперервного лиття та деформаційних процесів

Захист відбудеться « 10 » жовтня 2023 р. о 10<sup>00</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.182.01 Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України (зала засідань вченої ради, кім. 1005, вул. Казимира Малевича, 11, м. Київ, 03150)

З дисертацією можна ознайомитись на офіційному сайті <https://paton.org.ua> та в науково-технічній бібліотеці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України за адресою: 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

Реферат розісланий « 6 » вересня 2023 р.

Вчений секретар спеціалізованої

вченої ради Д 26.182.01

доктор технічних наук



О. В. Махненко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Проблема створення ефективних методів керування структуроутворенням металу залишається пріоритетною в сучасній електрометалургії. Вона в повній мірі стосується електрошлакових технологій і загострюється з підвищенням ступеня легування сплавів та маси зливок.

Сьогодні електрошлаковий переплав (ЕШП) широко застосовують для виробництва високолегованих сталей і сплавів: інструментальних, високоміцних, теплостійких, жароміцних та ін. Окрім цих, традиційних галузей застосування ЕШП, перспективним напрямком розвитку даного процесу є виробництво прецизійних сплавів, складнолегованих сплавів на основі титану, функціональних матеріалів типу нікеліду титану та ін. Ці сплави вимагають точного дотримання заданого хімічного складу. Вони дуже чутливі до хімічної та структурної неоднорідності, наявності домішок і дефектів, вимагають певної форми, дисперсності та розподілу структурних фаз. До складу таких сплавів входять високореакційні метали, що потребує застосування спеціальних заходів для запобігання їх взаємодії з атмосферними газами в процесі виплавки.

При виробництві згаданих сплавів, на перший план виходять проблеми, пов'язані з керуванням показниками якості металу, включаючи забезпечення високого ступеня фізичної і хімічної однорідності, дисперсності первинної литої структури, відсутності дефектів ліквідаційного характеру. Разом з тим, застосування традиційних схем ЕШП не завжди забезпечує необхідну металургійну якість зливок складнолегованих сплавів. Умови кристалізації металевої ванни, великий її об'єм, малоінтенсивна некерована конвекція рідкого металу сприяють формуванню грубої крупнозернистої структури литого металу та утворенню дефектів ліквідаційного характеру.

У зв'язку з цим, актуальним напрямком подальшого розвитку електрошлакових технологій є розробка нових технологічних схем перепау і методів керування теплофізичними, гідродинамічними і металургійними процесами, які визначають формування структури зливка в процесі ЕШП і забезпечують необхідні показники якості складнолегованих сплавів.

Слід зауважити, що зараз в Україні відсутнє власне промислове виробництво цілого ряду затребуваних прецизійних сплавів, деяких титанових сплавів (наприклад, легованих марганцем), функціональних сплавів на основі нікеліду титану та ін. З огляду на це, розроблення нової перспективної електрошлакової технології має стати підґрунтям для створення в Україні конкурентоспроможного виробництва цих сплавів, що дозволить відмовитись від імпорту вартісних іноземних напівфабрикатів та забезпечить розширення їх застосування вітчизняними підприємствами.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота була виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, відповідно до планів науково-дослідних робіт, у яких автор приймав участь як відповідальний виконавець та керівник: № 1.6.1.1.38.84.28 (4.3) “Дослідження фізико-хімічних засад структуроутворення гетерогенних високоміцних сплавів титану з інтерметалідним зміцненням при магнітокерованій електрошлаковій плавці” (2007-

2011 рр., № д/р 0107U002788); № 1.6.1.1.38.3 (38/3) «Дослідити методи керування кристалізацією металів і сплавів із застосуванням енергії електромагнітних розрядів і розробити електрошлакові технології і устаткування для одержання зливків з регламентованою структурою» (2013-2015 рр., № д/р 0113U002026); № 1.6.1.1.38.33 (4/7) «Розробити наукові засади технології отримання гомогенних з подрібненою структурою зливків нікелідів титану сплавів з ефектом пам'яті форми, із застосуванням магнітокерованої електрошлакової плавки» (2012-2016 рр., № д/р 0112U000621); № 1.6.3.20.6 (20/6) "Дослідження процесів плавлення і кристалізації прецизійних сплавів при електрошлаковому переплаві з імпульсними режимами електричного живлення і магнітного впливу" (2016-2018 рр., № д/р 0115U006704); № 1.6.1.1.20.31 (20/31) "Дослідження процесів плавлення та кристалізації металу при плазово-дуговій та електрошлаковій виплавці зливків із відходів тугоплавких, високореакційних і жароміцних металів та сплавів і плазово-індукційному вирощуванні крупних профільованих монокристалів вольфраму та молібдену" (2018-2020 рр., № д/р 0118U100514); № 1.6.2.1.20.1 (20/1) "Дослідження і розробка методів впливу на структуроутворення металевих зливків при їх отриманні із застосуванням електрошлакових і плазових технологій" (2022 р. - до тепер, № д/р 0118U100514).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є визначення закономірностей структуроутворення металу при ЕШП в умовах нестационарних режимів електричного живлення і зовнішнього електромагнітного впливу та розроблення на цій основі технологічних процесів і обладнання для виплавки зливків високореакційних і прецизійних металів та сплавів.

Відповідно до зазначеної мети були поставлені наступні основні завдання:

- розробити фізичну модель і дослідити вплив зовнішніх магнітних полів на особливості плавлення витратного електроду і крапельне перенесення металу;
- дослідити режими нестационарного електричного живлення електрошлакового процесу і їх вплив на формування структури зливків;
- визначити основні параметри процесу ЕШП з пошаровим формуванням зливка і їх вплив на структуроутворення металу;
- розробити джерело живлення і магнітний контур для імпульсного електромагнітного впливу на електрошлаковий процес із застосуванням розрядів конденсаторів;
- дослідити вплив імпульсних магнітних і електричних полів, створених розрядами конденсаторів, на режими ЕШП і структуроутворення металу зливків;
- визначити технологічні особливості і припустимі тиски процесу ЕШП у вакуумі при використанні фторидно-оксидних та сольових флюсів;
- визначити вплив пониженого тиску на газовий склад металу зливків титанових сплавів;
- розробити технологічні процеси і обладнання для виплавки зливків високореакційних і прецизійних металів та сплавів, з забезпеченням більш високої якості металу та техніко-економічних показників технології.

**Об'єкт дослідження.** Процес ЕШП високореакційних і прецизійних металів та сплавів з нестационарними режимами електричного живлення і електромагнітного впливу.

**Предмет дослідження.** Закономірності плавлення, перенесення та структуроутворення металу при ЕШП в умовах нестационарних режимів електричного живлення і зовнішніх електромагнітних впливів; хімічна і структурна однорідність металу; газовий склад металу при ЕШП у вакуумі.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених завдань використовували аналітичні та експериментальні методи досліджень. Дослідження процесів плавлення електроду і крапельного перенесення металу здійснювали шляхом фізичного моделювання за авторською методикою, верифікацію результатів моделювання проводили шляхом натурних експериментів. Експериментальні дослідження здійснювали в лабораторних умовах на модернізованій електрошлаковій установці камерного типу. Дослідження властивостей металу здійснювали із застосуванням стандартних методик металографічних досліджень макро- і мікроструктури металу, методів газового, спектрального і хімічного аналізів та механічних випробувань. Отримані експериментальні дані обробляли з використанням статистичних методів.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Уперше теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено можливість керування структурою металу зливків при ЕШП шляхом застосування нестационарних режимів електричного живлення, які призводять до періодичної зміни теплового і гідродинамічного стану металеві ванни, збільшуючи, при щільності струму у ванні  $\geq 0,4 \text{ А/мм}^2$ , в 1,5...2 рази дисперсність структури литого металу, при зменшенні на 7...10% питомих витрат електроенергії.

2. Уперше встановлено, що для ефективного керування структуроутворенням металу при ЕШП і забезпечення періодичності процесів плавлення і кристалізації металу та пошарового формування зливка з дрібнозернистою структурою і відсутністю дефектів по границях сплавлення окремих шарів періоди подачі і плавлення витратного електроду повинні чергуватись з паузами, коли електрод не плавиться, але в шлаковій ванні підтримується електричний струм і тепловий режим, що забезпечує твердіння під час пауз 75...95 % об'єму рідкої металеві ванни при висоті шарів наплавленого металу в межах  $(0,1...0,5) \times d_{\text{зл}}$ , де  $d_{\text{зл}}$  – діаметр зливка.

3. Запропоновано новий спосіб управління структуроутворенням зливків ЕШП за допомогою сумісних розрядів ємнісних накопичувачів електричної енергії на соленоїд кристалізатора і на шлакову та металеву ванни, з питомою енергією розрядів  $0,3...0,4 \text{ Дж/мм}^2$  і частотою 0,6...3 Гц. Встановлено, що в цьому випадку періодично збільшуються електричний струм процесу та електромагнітна сила, яка діє на розплав, що, в свою чергу, збільшує гідродинамічний вплив на фронт кристалізації зливка забезпечуючи подрібнення і гомогенізацію його литої структури, наближаючи до структури деформованого металу.

4. Уперше встановлено, що імпульсне поздовжнє магнітне поле, створене розрядами конденсаторів на соленоїд кристалізатора, призводить до періодичного падіння струму плавки під час дії імпульсів магнітного поля і його відновлення під час пауз. Показано, що механізм зміни струму плавки пов'язаний з магнітогідродинамічними процесами в шлаковій ванні, внаслідок чого періодично зменшується площа контакту витратного електроду зі шлаком, збільшується

міжелектродний проміжок і погіршується електричний контакт на поверхні поділу *електрод - шлак*.

5. Отримало подальший розвиток уявлення про вплив поздовжнього магнітного поля на плавлення і перенесення електродного металу. Встановлено, що під дією магнітного поля індукцією 0,35 Тл максимальна швидкість потоків в шлаковій ванні збільшується з 22 до 420 мм/с, що призводить до збільшення на 21...38 % частоти краплеутворення та зменшення на 8...24 % маси крапель. Обертання розплаву шлаку збільшує довжину траєкторій руху крапель і час їх перебування у шлаковій ванні, зменшуючи кількість крапель, які потрапляють на дзеркало металеві ванни по її осі з 78 до 40 %.

6. Встановлено, що критичний рівень вакууму, при якому відбувається закипання шлакової ванни, залежить від складу флюсу і електричних режимів, які визначають теплову потужність процесу. Чим вище потужність, тим при більш високому тиску відбувається закипання флюсу. Уперше визначено, що критичний тиск для сольових флюсів типу АН-Т2, АН-Т4 становить 12...26 кПа, а для фторидно-оксидних флюсів АНФ-1, АНФ-6, АНФ-28 – 3...15 кПа.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблено технологічні процеси, захищені патентами України:

- ЕШП титанових сплавів в камерній печі з нестационарними режимами електричного живлення і електромагнітного впливу. Технологія була випробувана при виплавці широкої номенклатури титанових сплавів і типорозмірів зливків, в тому числі циліндричних, прямокутних і порожнистих;

- ЕШП відходів прецизійних сплавів 29НК, 50Н, 46Н, 49КФ із застосуванням імпульсного електромагнітного впливу на кристалізацію металу. Отримані дослідні та промислові партії зливків і деформованих напівфабрикатів згаданих сплавів;

- ЕШП сплавів з ефектом пам'яті форми системи Ti-Ni, під впливом зовнішнього поздовжнього магнітного поля. Запропоновані режими деформації зливків, отримані напівфабрикати у вигляді пластин і дроту;

- ЕШП відпрацьованих катодів з хрому у камерній печі. Отримано дослідні зразки зливків хрому, які за хімічним складом відповідають вимогам стандарту до хрому марки Х99Н1.

2. Комплекс запропонованих в роботі технологічних рішень підвищення ефективності електрошлакового процесу реалізовано в створеній дослідно-промисловій установці потужністю 724 кВт для камерного ЕШП зливків високореакційних і прецизійних металів та сплавів діаметром до 260 мм і довжиною до 900 мм. Розроблені технологічні процеси і обладнання використовуються в ІЕЗ ім. Є.О. Патона при виготовленні промислових партій зливків для вітчизняних підприємств.

3. Основні положення дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі під час підготовки аспірантів в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (курс "Методи підвищення ефективності металургійного виробництва").

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота є самостійною роботою автора. При підготовці публікацій вклад автора був визначальним. У роботах, які було опубліковано у співавторстві, здобувачем виконано наступне: у [1, 6, 11, 14, 20, 30, 32-34, 44-46, 50, 58] - ідея та обґрунтування концепції експериментів, аналіз експериментальних даних, підготовка рукописів публікацій; у [2, 22, 28, 52, 54, 59] - ідея і розробка концепції фізичного моделювання, аналіз критеріїв подібності, перевірка адекватності моделювання, формулювання висновків, підготовка рукописів статей; у [3, 7, 25-27, 31, 40, 49, 53] - розробка режимів експериментальних плавок (зварювання), узагальнення експериментальних даних, підготовка рукописів публікацій; у [19, 21, 29] - аналіз і узагальнення літературних даних; підготовка рукописів статей; у [13, 15, 17-18, 24, 35, 37-39, 42, 47-48, 57, 60-61] - аналіз і узагальнення експериментальних даних; підготовка рукописів публікацій; у [4-5, 8, 41, 43] - підготовка та проведення експериментальних плавок, аналіз одержаних результатів; у [16, 23, 36, 51] - аналіз результатів експериментів, формулювання висновків; у [62-65] - ідея, обґрунтування та підготовка рукописів патентів.

**Апробація результатів роботи.** Основні результати дисертаційної роботи були представлені на всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях, зокрема: Всеукраїнській науково-технічній конференції "Наука і металургія" (Дніпро, листопад, 2022); 75<sup>th</sup> IW Annual Assembly and International Conference (Токуо, Японія 17-22 July 2022); International Conference "In-service damage of materials, its diagnostics and prediction" (Тернопіль, Україна, 11-13 October 2021); Міжнародній конференції "Титан-2018. Виробництво і застосування в Україні" (Київ, червень, 2018); Міжнародній конференції "Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні і споріднених технологіях" (Одеса, вересень, 2018); Міжнародній конференції "Титан 2016: виробництво та використання в авіабудуванні" (Запоріжжя, листопад, 2016); Medovar memorial symposium (Київ, Україна, 7-10 June 2016); 34<sup>th</sup> ISTC-Korea workshop on titanium materials and their manufacturing technology (Пусан, Корея, 26-27 November 2015); 9<sup>th</sup> International RAMIR Conference on Fundamental and Applied MHD, Thermo Acoustic and Space Technologies (Рига, Латвія, 16-20 June 2014); Міжнародній конференції "Сучасні проблеми металургії, технології зварювання та наплавлення сталей та кольорових металів" (Київ, жовтень, 2012); XI міжнародній конференції "Ефективність реалізації наукового ресурсного та промислового потенціалу в сучасних умовах" (Плав'я, 10-14 лютого 2011); 6<sup>th</sup> Int. Scientific Colloquium Modelling for Material Processing (Рига, Латвія, 16-17 Sep. 2010); 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Electro-magnetic processing of materials EMP 2009 (Дрезден, Німеччина, 19-23 Oct. 2009); Міжнародній конференції HighMatTech "Матеріали та покриття в екстремальних умовах" (Київ, жовтень, 2007); П'ятій всеукр. міжгалуз. науч. техн. конф. "Зварювання та споріднені технології" (Київ, 18-20 квітня 2012); міжнародних конференціях "Ti-2011" (Львів, 25-28 квітня 2011), "Ti-2010" (16-19 травня 2010), "Ti-2008" (18-21 травня 2008); всеукраїнських наук.-техн. конференціях "Зварювання та споріднені процеси і технології"- (2012, 2014 рр., Миколаїв, Україна); міжнародних конференціях "Зварювання та споріднені технології – сучасне і майбутнє" (2008, 2013, 2018 рр., Київ, Україна); міжнародних конференціях молодих учених та

спеціалістів "Зварювання та споріднені технології" (2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017, 2021 рр., Київ, Україна).

**Публікації.** Матеріали дисертації опубліковано в 65 друкованих роботах, в тому числі: 35 статей які задовольняють вимоги МОН України щодо публікації результатів дисертаційних робіт (з яких 4 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science); 3 патенти України на винахід і 1 патент України на корисну модель; 26 – матеріали наукових конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Робота складається з анотації українською та англійською мовами, вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 279 найменувань на 29 сторінках та 4 додатків на 12 сторінках. Дисертація має загальний обсяг 338 сторінок, містить 143 рисунки і 32 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено дані про апробацію результатів роботи і публікації із зазначенням особистого внеску автора.

**У першому розділі** розглянуто сучасний стан і тенденції розвитку електрошлакових технологій. Викладено загальні відомості про властивості і області застосування високореакційних і прецизійних металів та сплавів, проаналізовано технологічні особливості і проблеми їх виплавки в печах ЕШП. Показано, що через жорсткі вимоги щодо хімічного складу і однорідності таких сплавів, їх виробництво потребує застосування додаткових заходів, спрямованих на гарантоване відтворення заданих характеристик металу. Невирішеною проблемою при цьому залишається керування структуроутворенням зливок ЕШП з метою отримання литого металу з дрібнозернистою, гомогенною структурою. Показано, що перспективною областю досліджень у цьому напрямку є застосування нестационарних режимів електричного живлення і зовнішнього електромагнітного впливу.

**У другому розділі** розглянуті процеси плавлення витратного електроду і формування кристалічної будови зливок ЕШП.

Досліджено вплив технологічних параметрів ЕШП на характер плавлення витратних електродів з прецензійного сплаву 29НК (Fe–29Ni–18Co), встановлено залежності струму плавки від швидкості подачі електроду, визначено вплив напруги і швидкості подачі на форму торця електроду і глибину його занурення у шлак (рис.1, 2).

Встановлено, що при збільшенні швидкості подачі електроду глибина його занурення у шлак збільшується, а торець набуває конічної форми з формуванням і відривом крапель на вершині конусу оплавлення. Збільшення напруги плавки, при постійній швидкості подачі електроду, навпаки призведе до зменшення конусної частини електроду. При цьому, в усіх випадках, навіть при невеликій швидкості подачі, електрод, крім конусної частини, занурюється у ванну ще й циліндричною частиною.



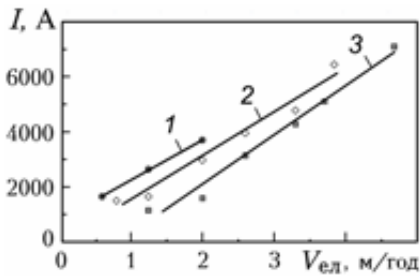


Рисунок 1 – Залежність струму плавки  $I$  від швидкості подачі електроду  $V_{\text{ел}}$ : 1 –  $U=20$  В; 2 –  $U=30$  В; 3 –  $U=38$  В

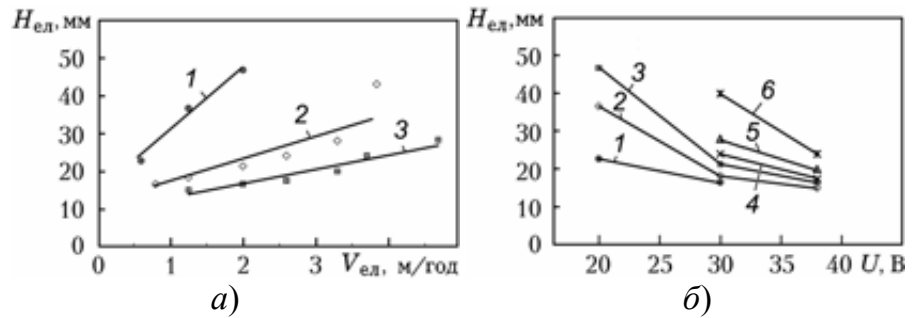


Рисунок 2 – Залежність глибини занурення електроду  $H_{\text{ел}}$ : а – від швидкості його подачі для різних значень  $U$ : 1 –  $U=20$  В; 2 –  $U=30$  В; 3 –  $U=38$  В; б – від напруги плавки для різних значень  $V_{\text{ел}}$ : 1 – 0,6 м/год; 2 – 1,25 м/год; 3 – 2,0 м/год; 4 – 2,6 м/год; 5 – 3,3 м/год; 6 – 3,8 м/год

Дослідження процесів крапельного перенесення металу при ЕШП в умовах дії зовнішнього подовжнього магнітного поля проводили шляхом фізичного моделювання. Модель заснована на плавленні витратного електроду зі сплаву Вуда в оптично прозорому розчині хлористого цинку за рахунок Джоулева тепла, що виділяється в ньому при проходженні електричного струму.

Було встановлено, що під дією подовжнього магнітного поля суттєво змінюється структура і інтенсивність течій модельного розплаву, що у свою чергу, впливає на особливості формування електродних крапель та траєкторії їх руху у ванні.

Показано, що за відсутності магнітного поля максимальна швидкість потоків становила 22 мм/с, в той час як під впливом магнітного поля індукцією 0,35 Тл вона сягала до 420 мм/с (рис.3 а). Такі інтенсивні течії розплаву біля торця витратного електроду призводили до збільшення на 21...38% частоти відриву крапель електродного металу при зменшенні на 8...24% їх середньої маси. При цьому траєкторії руху крапель в ванні набували спіралеподібної форми, довжина траєкторій руху і час перебування крапель в ванні збільшувались в 1,3...2,5 рази, а місця їх попадання на дзеркало рідкого металу ставали більш розосередженими (кількість крапель, які потрапляли на дзеркало металеві ванни по її осі зменшилась з 78 до 40 %) (рис.3 б, в).

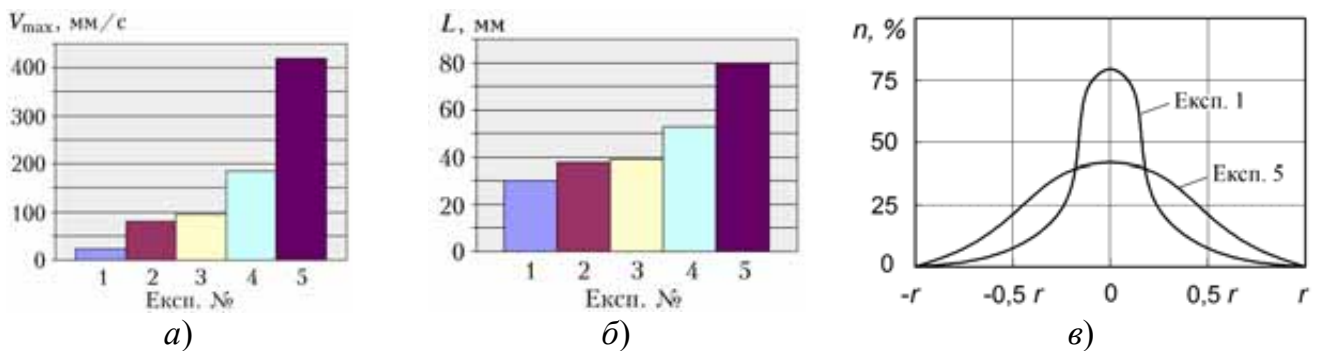


Рисунок 3 – Максимальна швидкість потоків (а), довжина траєкторії руху крапель в ванні (б) і розподіл місць їх падіння на поверхню металеві ванни (в) при різних схемах проведення експериментів: Експ. №1 – без МП,  $I = 12$  А; №2 –  $B=0,2$  Тл,  $I = 12$  А; №3 –  $B=0,32$  Тл,  $I = 12$  А; №4 –  $B=0,35$  Тл,  $I = 12$  А; №5 –  $B=0,35$  Тл,  $I = 24$  А

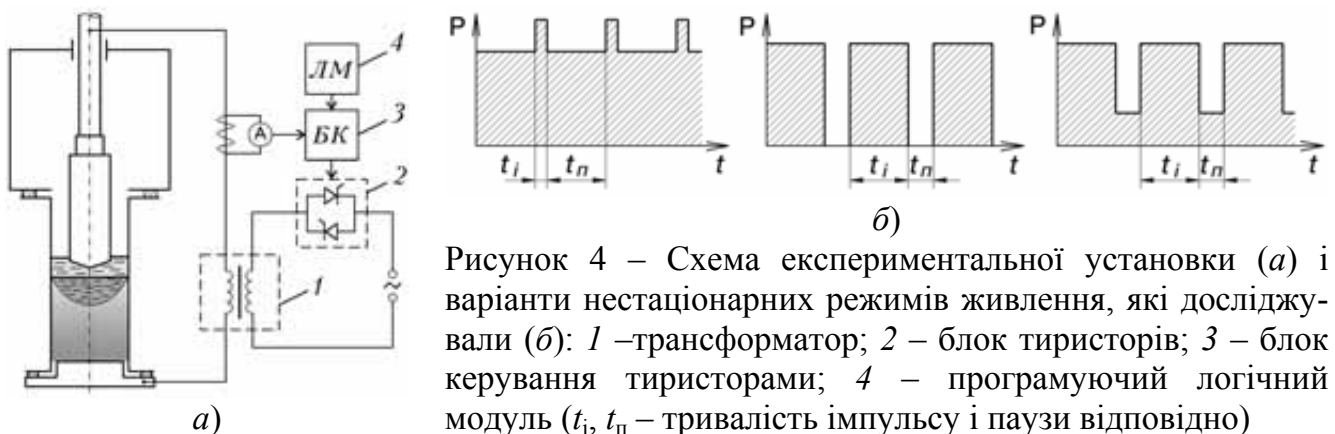
Аналогічні результати збільшення частоти відриву крапель електродного металу та зменшення їх середньої маси були отримані при натурних експериментах, що свідчить про адекватність розробленої фізичної моделі.

Окрім плавлення витратного електроду, були проаналізовані основні чинники, які зумовлюють формування кристалічної будови зливків ЕШП. Показано, що вирішальний вплив на кристалізацію зливків ЕШП і утворення різного роду ліквіційних дефектів чинять об'єм рідкої металеві ванни і гідродинамічні процеси в ній. На основі цього було запропоновано два підходи щодо керування структуроутворенням металу при ЕШП. Перший, оснований на зменшенні об'єму металеві ванни шляхом ведення електрошлакового процесу в імпульсному режимі із забезпеченням пошарового формування зливка. Другий – на впливі на гідродинамічний стан рідкої металеві ванни, з використанням електричних і магнітних полів.

**Третій розділ** присвячений дослідженню процесу ЕШП з нестационарними режимами електричного живлення. Було встановлено, що використання нестационарних режимів живлення при ЕШП визначається динамічними характеристиками теплових режимів основних складових робочої зони печі ЕШП, а саме: шлакової і металеві ванн, витратного електроду і гарнісажної кірки. При цьому, обмежуючим чинником є процес утворення гарнісажної кірки, який є більш чутливим до зміни режимів живлення електрошлакового процесу.

Експериментально встановлено, що через інерційність процесу плавлення витратного електроду оперативне керування потужністю переплаву шляхом імпульсної подачі електроду в шлакову ванну є малоефективним і може бути реалізоване лише при переплаві електродів малого діаметру (наприклад дроту). Більш ефективним є керування нестационарними режимами живлення за рахунок періодичної зміни електричної напруги на витратному електроді. В цьому випадку, нестационарні режими живлення призводять до примусової періодичної зміни теплового і гідродинамічного стану металеві ванни впливаючи, тим самим, на характер структуроутворення зливків ЕШП.

Схема експериментальної установки і варіанти нестационарних режимів живлення, які були досліджені, наведені на рис. 4. Експериментальні дослідження проводили при переплаві витратних електродів діаметром 45...75 мм з титану марки Grade 4 у кристалізаторах діаметром 84, 110 мм і  $\square 80 \times 80$  мм.



Експерименти з короткотривалим (2...4 с) циклічним підвищенням напруги на електродах з 36 до 52 В, хоча і показали можливість реалізації такого процесу, проте виявили його малу ефективність для впливу на структуроутворення металу. Макроструктура виплавлених зливок була типовою для ЕШП, з довгими, витягнутими в напрямку тепловідведення кристалами середнім розміром  $4,5 \times 19$  мм.

Експерименти з періодичним зменшенням напруги від робочих значень до 0...4 В, тривалістю  $t_{\text{п}} = 0,5 \dots 1,4$  с, показали можливість впливу нестационарних режимів живлення на характер структуроутворення металу зливок, при збереженні стабільності електрошлакового процесу і бездефектного формування їх бічної поверхні. Виплавлені титанові зливки діаметром 84 мм мали щільну однорідну структуру, без металургійних дефектів. Середній розмір кристалів становив  $1,87 \times 8,5$  мм, в той час як для аналогічного зливка отриманого традиційним способом він був значно вищим –  $5,2 \times 26$  мм. При цьому, було зафіксовано зменшення в середньому на 7...10 % витрати електроенергії.



Рисунок 5 – Зовнішній вигляд і макроструктура титанового зливка виплавленого з періодичним зменшенням потужності:  $t_1 = 7$  с,  $t_{\text{п}} = 1,4$  с

Подрібнення структури металу пояснюється гідродинамічними процесами в шлаковій і металевій ваннах. Так, при включенні і виключенні електричної напруги різко змінюється електромагнітна сила, що діє на розплави шлаку і металу, внаслідок чого створюються "удари" і вібрації в металевій ванні, які діють на фронт кристалізації і кристали, що ростуть. Зменшення витрати електроенергії пов'язано з інтенсифікацією гідродинамічних і тепломасообмінних процесів на поверхні поділу *витратний електрод – шлакова ванна* внаслідок чого підвищується тепловий коефіцієнт корисної дії процесу.

Подальші експерименти при виплавці зливок різних діаметрів показали, що при збільшенні перерізу зливка ефективність керування структуроутворенням металу шляхом нестационарних режимів живлення зменшується. Якщо для зливок діаметром до 100 мм нестационарне живлення призводило до помітного (в 1,5...2 рази) зменшення довжини кристалів, то для зливок діаметром більше 120 мм, розмір кристалів практично не відрізнявся від розмірів при традиційному ЕШП (рис. 6).

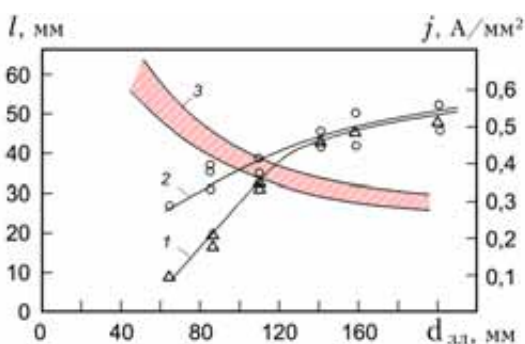


Рисунок 6 – Залежності середньої довжини кристалів  $l$  і щільності струму в ванні  $j$  від діаметра зливка  $d_{\text{зл}}$ : 1 – довжина кристалів при нестационарних режимах живлення; 2 – довжина кристалів при традиційному ЕШП; 3 – щільність струму

Це пов'язане з тим, що зі збільшенням перерізу зливка щільність електричного струму, що проходить в металевій ванні і крізь фронт кристалізації зменшується. Через це зменшуються магнітогідродинамічні (МГД) ефекти від зміни електричних режимів процесу і силова дія потоків і вібрацій рідкого металу на кристали, що ростуть. Відповідно, в проведених експериментах подрібнення структури відбувалось коли щільність струму в розплаві становила 0,4 А/мм<sup>2</sup> і вище. При збільшенні діаметру зливка і зменшенні щільності струму до  $\approx 0,3$  А/мм<sup>2</sup> подрібнення структури не спостерігалось (рис.6).

**У четвертому розділі** представлено результати досліджень процесу ЕШП з пошаровим формуванням зливка. Було встановлено, що застосування нестационарних режимів електричного живлення з паузами, тривалість яких перевищує постійні часу витратного електроду і металеві ванни, призводить до періодичності процесів плавлення витратного електроду і кристалізації окремих об'ємів металеві ванни, зумовлюючи, тим самим, пошарове формування зливка по його висоті. Практично реалізувати процес пошарового формування можна періодично зменшуючи наругу на ванні до значень, при яких буде підтримуватися стабільний електрошлаковий процес, але електрод плавиться не буде. Якщо після цього знову збільшити наругу на ванні до робочих значень, то електрод знову почне плавитися. Отже, періодично змінюючи наругу на ванні і відповідним чином регулюючи швидкість подачі витратного електроду, можна забезпечити періодичність плавлення металу і пошарове формування зливка.

Для визначення параметрів пошарового формування злиwkів експериментальним шляхом були встановлені залежності глибини і температури металеві ванни від часу охолодження для різних діаметрів зливка і різних режимів підігріву шлакової ванни (рис.7, 8). На основі отриманих даних запропоновані розрахункові залежності для визначення характеристик пошарового твердіння злиwkів в водоохолоджуваних кристалізаторах діаметром до 220 мм:

- час повного твердіння металеві ванни в залежності від діаметра зливка, хв

$\tau_{\text{п}} = (0,06 \dots 0,08) \cdot k_{\text{пд}} \cdot k_{\text{тфм}} \cdot d_{\text{зл}}^2$ , де  $d_{\text{зл}}$  – діаметр зливка у см,  $k_{\text{пд}}$  – коефіцієнт, що враховує підігрів металу в разі неповного відключення наруги на ванні (при повному відключенні наруги  $k_{\text{пд}}=1$ ),  $k_{\text{тфм}} = \alpha_{\text{ст}} / \alpha_{\text{м}}$  ( $\alpha_{\text{ст}}$  – коефіцієнт температуропровідності вуглецевої сталі,  $\alpha_{\text{м}}$  – коефіцієнт температуропровідності досліджуваного сплаву);

- товщина шару металу, що закристалізувався, в залежності від часу, см

$$\delta = \frac{(2,5 \dots 4,5) k_{\text{пд}} \sqrt{\tau}}{k_{\text{тфм}}}, \text{ де } \tau \text{ – час твердіння у секундах;}$$

- температура металу зливка (ділянка на відстані  $0,5 \times d_{\text{зл}}$  від верхнього торця зливка і  $0,25 \times d_{\text{зл}}$  від бічної поверхні) після відключення (зменшення) наруги, °С

$$T = T_{\text{в}} + \frac{(T_{\text{мв}} - T_{\text{в}}) k_{\text{пд}} k_{\text{тфм}}}{e^{k_{\text{тп}} \tau}}, \text{ де } T_{\text{мв}} \text{ – температура металеві ванни, } T_{\text{в}} \text{ –}$$

температура охолоджувальної води,  $\tau$  – час охолодження у хвиликах,  $k_{\text{тп}}$  – коефіцієнт теплопередачі, який для злиwkів діаметром 85, 125 і 220 мм дорівнює 0.19, 0.056 і 0.02, відповідно.

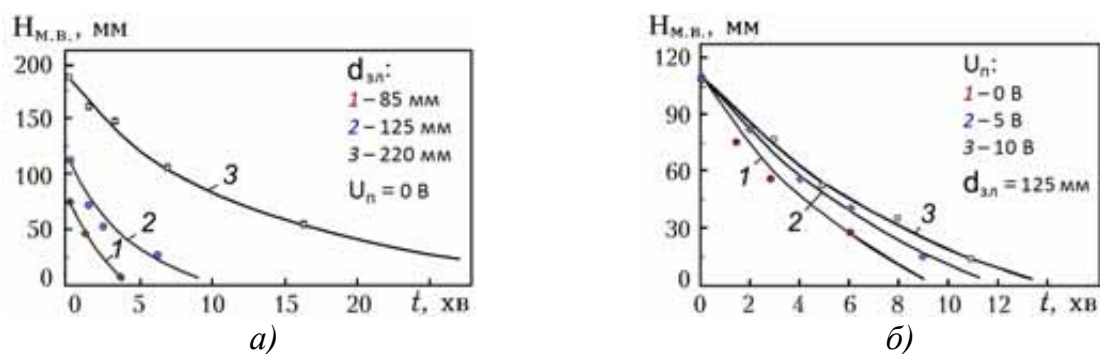


Рисунок 7 – Динаміка зміни глибини металевої ванни після відключення (зменшення) напруги для зливків різних діаметрів (а) і різних режимів підігріву шлакової ванни (б)

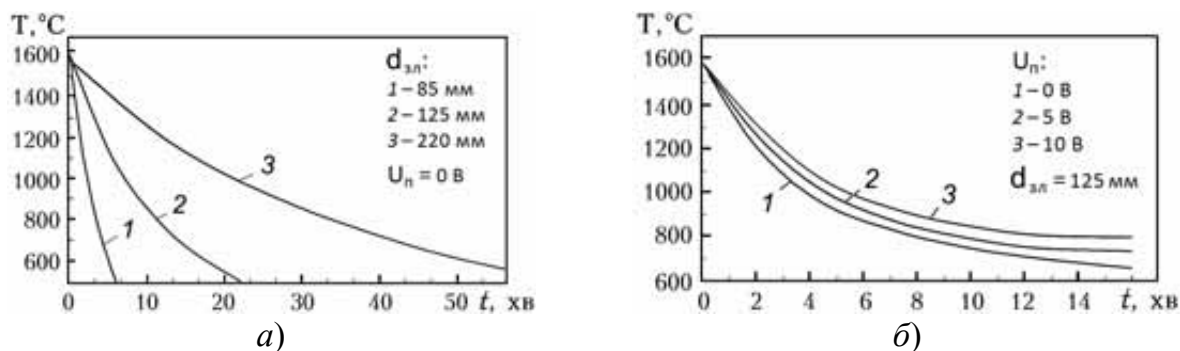


Рисунок 8 – Динаміка зміни температури металу після відключення (зменшення) напруги для зливків різних діаметрів (а) і різних режимів підігріву шлакової ванни (б):  $U_{пл} = 38$  В, місце виміру температури –  $0,25 \times d_{зл}$

Експериментальні дослідження процесу ЕШП з пошаровим формуванням зливка здійснювали при переплаві витратних електродів з прецизійного сплаву 29НК та вуглецевої сталі в водоохолоджуваних кристалізаторах діаметрами 85, 125, 160 і 220 мм із застосуванням флюсів АН-Т4 і АНФ-6. Плавки проводили відповідно до циклограми, представленої на рис. 9. Тривалість пауз  $t_{пU}$  в експериментах становила 180...600 с під час яких напругу на ванні зменшували від робочих значень до  $U_n = 7...11$  В.

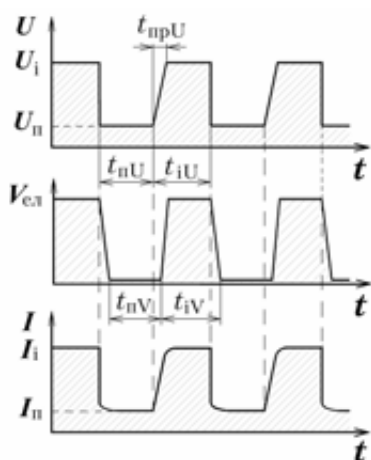


Рисунок 9 – Циклограма зміни напруги ( $U$ ), струму ( $I$ ) і швидкості подачі електрода ( $V_{ел}$ ) в процесі ЕШП з пошаровим формуванням зливка:  $t_{iU}$ ,  $t_{пU}$  – тривалість імпульсів і пауз напруги;  $t_{пV}$ ,  $t_{iV}$  – тривалість імпульсів і пауз подачі електрода;  $U_i$ ,  $U_n$  – напруга під час імпульсів і пауз;  $I_i$ ,  $I_n$  – струм під час імпульсів і пауз

Проведені експерименти довели можливість практичної реалізації процесу ЕШП з пошаровим формуванням зливка. Показано широкі можливості керування характером структуроутворення металу зливків при відсутності, за правильно обраних режимах, дефектів по зонах сплавлення окремих шарів (рис.10). При



цьому, вибір раціональних режимів електричного живлення під час імпульсів та пауз плавлення металу дозволяє зберегти стабільність електрошлакового процесу та високу якість формування бічної поверхні зливка.

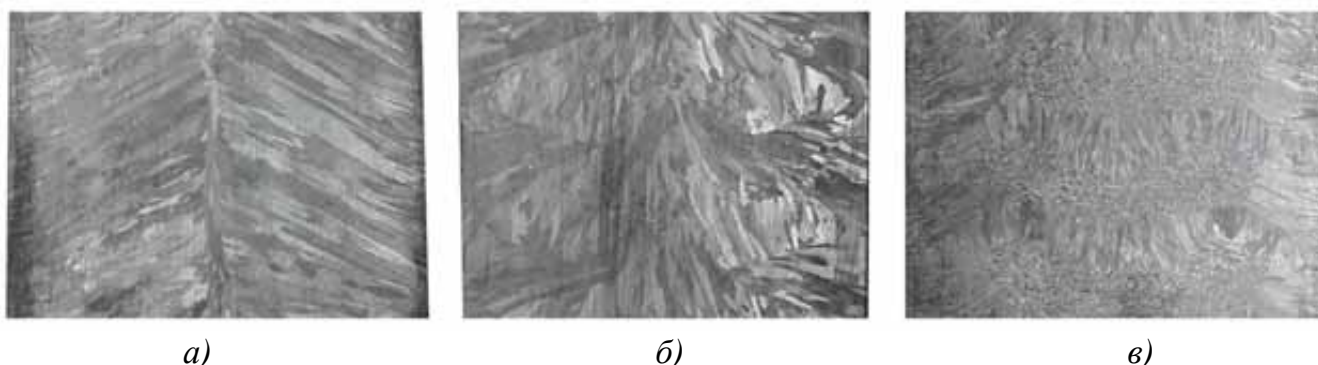


Рисунок 10 – Макроструктура осевого перерізу злиwkів сплаву 29HK діаметром 85 мм, отриманих традиційним ЕШП (а) і ЕШП з пошаровим формуванням (б, в)

Зливки пошарового формування мають щільну структуру, характеризуються відсутністю великих стовпчастих кристалів та зони зустрічної кристалізації по вісі зливка. Максимальна довжина кристалів обмежується висотою окремого наплавленого шару (рис.11, 12). Через це, дисперсність структури злиwkів пошарового формування значно вище, ніж у аналогічних злиwkів традиційного ЕШП, де довжина зерна співрозмірна з радіусом зливка.

Ведення процесу ЕШП в нестационарному режимі з пошаровим формуванням зливка також дозволяє зменшити глибину металевої ванни і отримати плоский фронт кристалізації, що знижує імовірність утворення дефектів ліквіаційного походження. Наприклад, при виплавці злиwkів діаметром 220 мм глибина ванни не перевищувала  $0,13...0,25 \times d_{зл}$ , чого складно досягти при класичному ЕШП.

Результати механічних випробувань зразків, які вирізали як уздовж так і поперек шарів кристалізації показали, що характеристики міцності і пластичності зон сплавлення ( $\sigma_B=451,0$  МПа,  $\delta=22,6$  %,  $a_H=114,1$  Дж/см<sup>2</sup>) мало відрізняються від характеристик основного металу ( $\sigma_B=448,1$  МПа,  $\delta=24,3$  %,  $a_H=110,1$  Дж/см<sup>2</sup>), що свідчить про надійне з'єднання окремих наплавлених шарів між собою.

В цілому, розорієнтованість структури металу, відсутність великих стовпчастих дендритів, направлених перпендикулярно вісі зливка, відсутність зони "слабини", плоский фронт кристалізації, невеликий об'єм металевої ванни, рівнозначність механічних характеристик вздовж і поперек шарів кристалізації - все це свідчить про ефективність використання пошарового формування зливка для керування структуроутворенням електрошлакового металу.

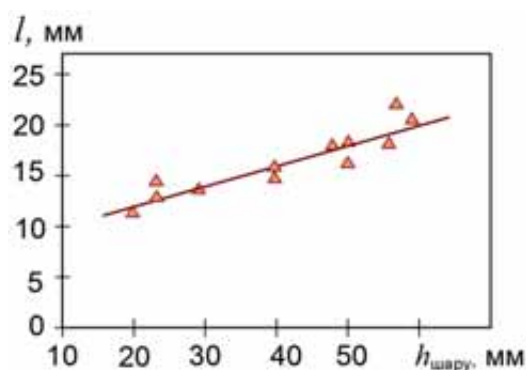


Рисунок 11 – Залежність середнього характерного розміру зерна  $l$  від висоти наплавленого шару  $h_{шару}$  (для злиwkів  $\varnothing 220$  мм)



Рисунок 12 – Зовнішній вигляд, макроструктура і схема кристалізації зливка діаметром 220 мм, отриманого ЕШП з пошаровою кристалізацією

На основі проведених досліджень були визначені основні принципи щодо пошарового формування зливків діаметром до 220 мм (рис. 13):

- висоту окремих шарів наплавленого металу доцільно обирати в межах  $(0,1...0,5) \times d_{\text{зл}}$ . При меншій висоті шару погіршується якість формування бічної поверхні з можливістю утворення дефектів на периферії зливка, при більший – зберігається типовий характер структуроутворення металу з великими стовбчастими кристалами, орієнтованими в напрямку тепловідведення. Виходячи з висоти наплавленого шару розраховується тривалість імпульсів плавлення металу;

- необхідно, щоб в процесі порційного формування на поверхні зливка весь час залишався шар рідкого металу. Виходячи з цього, тривалість пауз рекомендовано обирати за умов твердіння за цей час 75...95% об'єму металеві ванни. При меншому об'ємі затверділого металу зберігається транскристалізація по вісі зливка, при більшому – можливе утворення дефектів по межах сплавлення. Вказаний діапазон затверділого металу досягається вибором параметрів  $t_{\text{пU}}$ ,  $U_{\text{п}}$ ,  $I_{\text{п}}$ . Величина  $U_{\text{п}}$  обирається виходячи зі складу сплаву, що переплавляють і марки флюсу. Вона має бути такою, щоб температура шлакової ванни була менше за температуру плавлення металу проте забезпечувала стабільність електрошлакового процесу і бездефектне формування поверхні зливка. При переплаві титанових сплавів під фторидно-хлоридними флюсами рекомендована величина  $U_{\text{п}}$  становить 10...13 В, при переплаві сталі – 8...11 В.

- необхідно, щоб під час пауз плавлення металу в металевій ванні завжди протікав електричний струм  $I_{\text{п}}$ , який забезпечує підігрів границі поділу *шлакова ванна – металева ванна*. Його величина визначається величиною  $U_{\text{п}}$  і електричним опором міжелектродного проміжку;

- перехід від пауз плавлення к періодам плавлення має відбуватися за заданою програмою з плавним підвищенням потужності і швидкості подачі електроду.

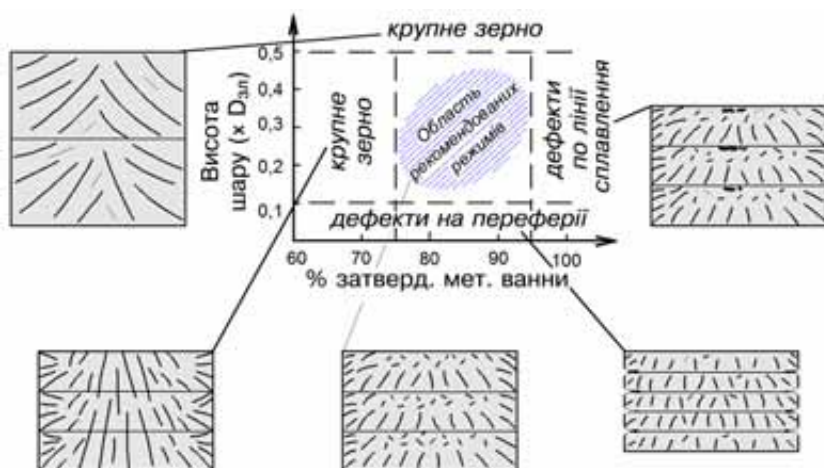


Рисунок 13 – Область рекомендованих режимів і характерні схеми кристалізації при ЕШП з пошаровим формуванням зливка

П'ятий розділ присвячений дослідженню методів керування структуроутворенням зливків ЕШП, оснований на фізичному впливі на гідродинамічний стан рідкої металеві ванни за допомогою зовнішніх, імпульсних електричних та магнітних впливів. В якості інструменту для реалізації таких впливів розглянуто розрядні ємнісні накопичувачі електричної енергії (конденсаторів). Батареї конденсаторів, при відносно малих габаритах, дозволяють у короткий термін (соті частки секунди) виділяти суттєву електричну енергію та формувати потужні розрядні імпульси струму для впливу на кристалізацію металу.

На рис. 14 наведені варіанти застосування розрядів конденсаторів для імпульсного електромагнітного впливу на процес ЕШП. Розряди можна здійснювати безпосередньо на металургійну ванну (під металургійною ванною мається на увазі сукупність шлакової та металеві ванн) (рис. 14 б), на соленоїд, який охоплює кристалізатор (рис. 14 а), а також одночасно на соленоїд і металургійну ванну (рис. 14 в).

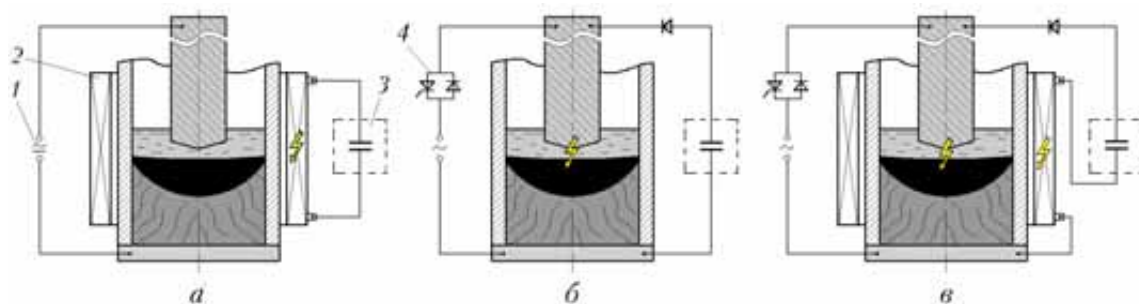


Рисунок 14 – Схеми впливу на процес ЕШП з використанням розрядів конденсаторів на соленоїд (а), на металургійну ванну (б), та одночасних розрядів на соленоїд і металургійну ванну (в): 1 – джерело живлення печі ЕШП; 2 – соленоїд; 3 – джерело генерування електричних розрядів; 4 – тиристорний ключ

Схема впливу на електрошлаковий процес шляхом розрядів конденсаторів безпосередньо на металургійну ванну (рис. 14 б) спрямована на формування гідродинамічних "ударів" по фронту кристалізації зливка і утворення механічних коливань ванни, що сприятиме подрібненню дендритів і підвищенню структурної однорідності металу. Механізм утворення таких "ударів" пояснюється дією електромагнітної сили, яка формується внаслідок взаємодії розрядного струму в розплавах шлакової і металеві ванн з власним магнітним полем. Крім того,



періодичні розряди конденсаторів на металургійну ванну впливають на крапельне перенесення електродного металу внаслідок пінч-ефекту. Перевагою даного методу впливу є те, що він не потребує використання додаткових пристроїв для створення магнітних полів.

Експерименти з розрядами конденсаторів безпосередньо на металургійну ванну проводили при виплавці зливків технічного титану ВТ1-0 в кристалізаторі перерізом 80×80 мм під флюсом АН-Т4. Для живлення установки використовували постійний струм зворотної полярності. Розряди здійснювали як безперервно, із заданою частотою, так і окремими серіями із 3...7 розрядів, які чергувались з паузами тривалістю 5...7 с. Максимальний піковий струм розряду в експериментах становив біля 12 кА, а частота – 0,9...3,0 Гц.

Проведені експерименти довели можливість практичної реалізації такого процесу. В усіх випадках розряди конденсаторів на ванну не призводили до критичних порушень стабільності електрошлакового процесу. Виплавлені зливки мали добру якість формування бічної поверхні, макроструктура металу була щільною, без пор, включень, тріщин та інших дефектів металургійного походження (рис. 15).



Рисунок 15 – Макроструктура титанових зливків  $\square 80 \times 80$  мм, виплавлених з розрядами конденсаторів на ванну:  
*a* –  $f=3,0$  Гц,  $I_{\text{розр}}=6,4$  кА;  
*б* –  $f=1,0$  Гц,  $I_{\text{розр}}=11,5$  кА;  
*в, з* –  $f=0,9$  Гц,  $I_{\text{розр}}=12,0$  кА

Спостерігалось часткове подрібнення структури металу зливків, яке залежало від величини розрядного струму (рис. 16). Проте, в усіх випадках зберігалася стовпчаста структура зливків, що свідчить про недостатній вплив електричних розрядів для бажаного подрібнення і гомогенізації металу ЕШП.

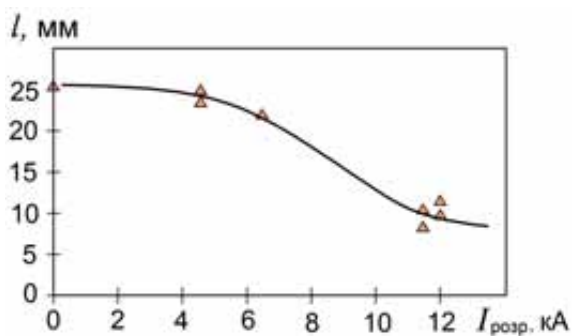


Рисунок 16 – Вплив розрядного струму на характерний розмір зерна (для зливків ВТ1-0  $\square 80 \times 80$  мм)

Другий варіант використання розрядів конденсаторів для впливу на процес ЕШП полягає в їх застосуванні для живлення обмоток соленоїда, що охоплює кристалізатор (рис. 14 *a*). Це дає можливість, використовуючи компактні соленоїди з відносно невеликим перетином провідників обмоток, створювати в зоні плавки потужні імпульси поздовжнього магнітного поля.

Механізм дії поздовжнього магнітного поля на процес ЕШП полягає в його

взаємодії з радіальною складовою струму плавки, внаслідок чого в струмонесучих розплавах шлаку і металу утворюється азимутальна електромагнітна сила, що призводить до формування електровихрових течій або вібрацій розплаву. Таким чином, відбувається безконтактний силовий вплив на рідкий метал і фронт кристалізації, що дає змогу впливати на процеси структуроутворення металу.

Експерименти проводили при переплаві витратних електродів в кристалізаторах діаметром 65, 85 і 125 мм і прямокутному кристалізаторі перерізом 80×80 мм. Матеріалом електродів були титанові сплави ВТ1-0, ОТ4, ВТ6, прецизійний сплав 29НК, які переплавляли під флюсами АН-Т4 і АНФ-1.

Було встановлено, що імпульсне магнітне поле, створене розрядами конденсаторів на соленоїд кристалізатора, призводить до циклічних коливань струму плавки без цілеспрямованої зміни інших параметрів процесу. Ці коливання проявляються у періодичному зменшенні сили струму плавки під час дії імпульсів магнітного поля і його відновленні під час пауз (рис. 17). Величина зменшення сили струму може сягати до 70 % від його початкового рівня і залежить від частоти розрядів і їх питомої енергії. Експериментально доведено, що механізми зменшення сили струму плавки пов'язаний з гідродинамічними ефектами в металургійній ванні, викликаними дією імпульсів магнітного поля, внаслідок чого зменшується площа контакту витратного електроду зі шлаком, збільшується міжелектродний проміжок і погіршується електричний контакт на поверхні поділу *електрод - шлак*.

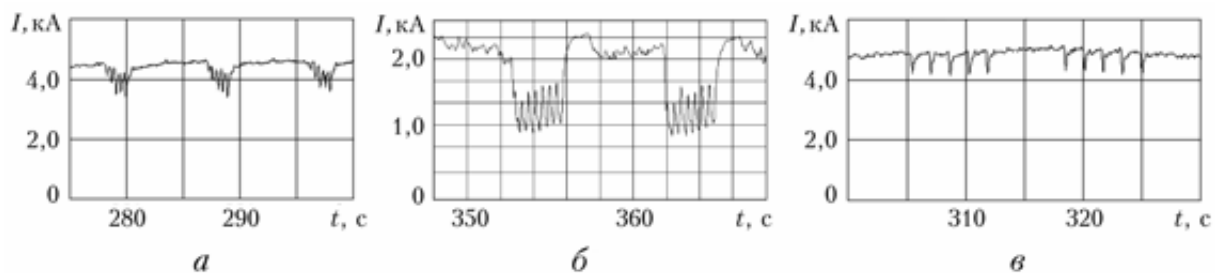


Рисунок 17 – Фрагменти реєстрограм струму плавки при різній частоті  $f$  і питомій енергії розрядів  $W/S$  на зовнішній магнітний контур:  $a - f=2,5$  Гц,  $W/S=0,27$  Дж/мм<sup>2</sup>;  $b - f=2,18$  Гц,  $W/S=0,52$  Дж/мм<sup>2</sup>;  $в - f=0,6$  Гц,  $W/S=0,27$  Дж/мм<sup>2</sup>

Незважаючи на суттєве коливання сили струму плавки усі виплавлені зливки мали якісно сформовану бічну поверхню, з незначними гофрами (рис. 18). Структура металу зливок була щільною, без внутрішніх дефектів. Зливки діаметром 65 мм характеризувалися однорідною, дрібнозернистою структурою (рис. 18 *a*). Середній розмір зерна становив 2,0×4,1 мм, що значно менше, ніж в аналогічному зливку, отриманому без електромагнітного впливу (5,2×26,0 мм). Це свідчить про позитивний вплив імпульсного магнітного поля на характер структуроутворення металу. При виплавці зливок вдвічі більшого перерізу ефект від дії магнітного поля був вже менш помітним. Переважно зберігалася стовбчаста, "ялинкова" структура зливок (рис. 18 *б*) з тенденцією зменшення розмірів зерна зі збільшенням енергії розрядів. Найбільш дисперсна структура, з середнім розміром

зерна  $1,6 \times 8,4$  мм, була отримана при енергії розрядів 3240 Дж і частоті 0,6 Гц (рис. 18 в).

Загалом, незважаючи на встановлену можливість керування структуроутворенням зливок ЕШП за допомогою розрядів конденсаторів окремо на магнітний контур або на металургійну ванну, їх вплив виявився недостатньо стабільним і таким, що погіршується зі збільшенням перерізу зливка.

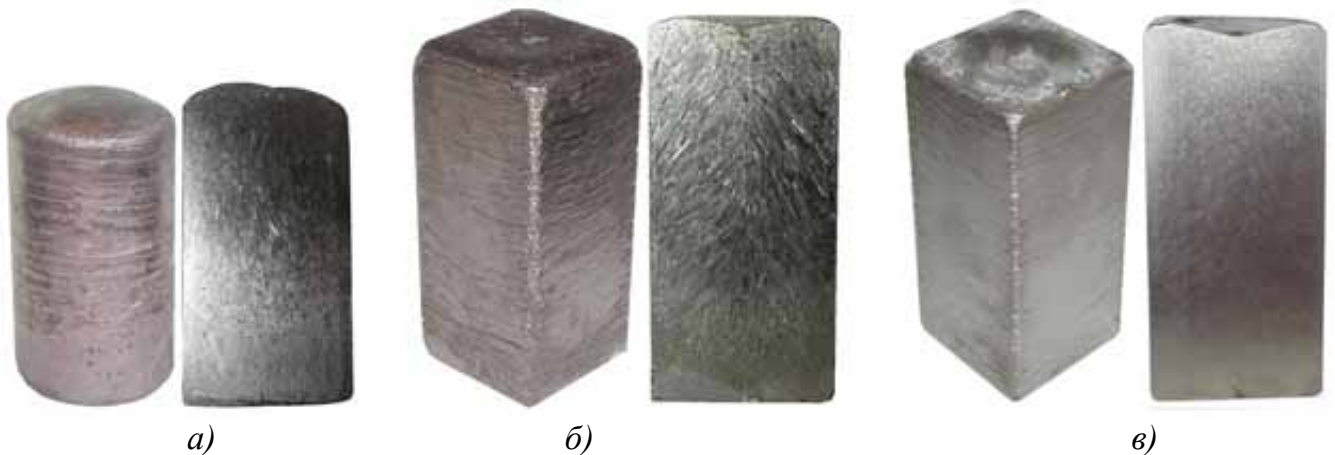


Рисунок 18 – Зовнішній вигляд і макроструктура титанових зливок діаметром 65 мм (а) і перерізом  $80 \times 80$  мм (б, в), виплавлених з використанням розрядів конденсаторів на соленоїд: а –  $f=3,0$  Гц,  $W=1166$  Дж; б –  $f=2,5$  Гц,  $W=1742$  Дж; в –  $f=0,6$  Гц,  $W=3240$  Дж

Для інтенсифікації електромагнітного впливу на кристалізацію зливок ЕШП було запропоновано здійснювати одночасні електричні розряди як на магнітний контур так і на металургійну ванну (рис. 14 в). В цьому випадку поєднуються механізми впливу на кристалізацію металу імпульсними магнітними полями і електричними розрядами. При цьому, розряди на ванну, які діють синхронно з імпульсами струму в соленоїді, призводять до періодичного збільшення сили струму  $\vec{I}$  у рідкому металі а відповідно – електромагнітної сили  $\vec{F}_e = \vec{I} \times \vec{B}$ , яка діє на розплав, що, в свою чергу, збільшує гідродинамічний вплив на фронт кристалізації зливка.

На рис. 19 наведено вигляд і макроструктура титанового зливка перерізом  $80 \times 80$  мм, виплавленого з одночасними розрядами на соленоїд і металургійну ванну. Розряди конденсаторів здійснювали в безперервному режимі з частотою 3 Гц і енергією окремого розряду 1900 Дж. Використовували постійний струм плавки зворотної полярності.

Процес плавки проходив стабільно. На поверхні зливка є гофри глибиною до 0,8 мм, які не розповсюджуються в глибину зливка. Макроструктура зливка суттєво відрізняється від традиційної структури литого металу ЕШП. По всьому перерізу зливка вона складається з дрібних, рівноосних зерен середнім розміром 0,2...1,0 мм, що наближає її до структури деформованого металу (рис. 19). Повністю відсутні великі стовбчасті кристаліти, різномірні структурні зони по висоті і радіусу зливка та дефекти металургійного характеру. Аналогічні результати подрібнення структури металу були отримані і при виплавці зливок більшого діаметру – 140 мм (рис. 20).



Рисунок 19 – Зовнішній вигляд і макроструктура титанового зливка  $\square 80 \times 80$  мм, виплавленого з одночасними розрядами на соленоїд і металургійну ванну

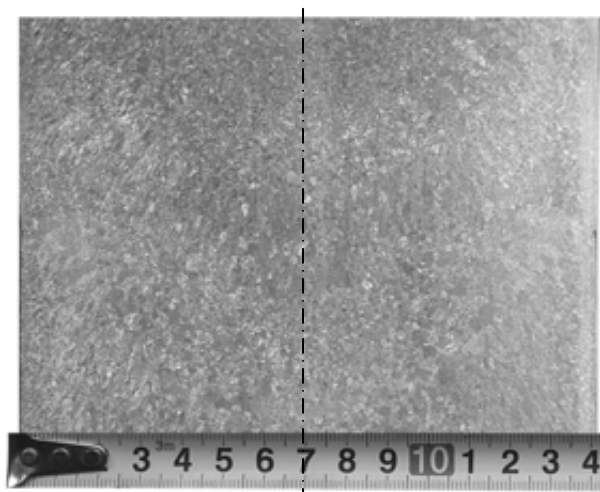


Рисунок 20 – Макроструктура титанового зливка  $\varnothing 140$  мм (осьовий переріз), виплавленого з розрядами на соленоїд і металургійну ванну

Аналіз експериментальних даних показав, що при збільшенні діаметру (перерізу) зливка енергія розрядів, яка необхідна для подрібнення структури зливок збільшується в квадратичній залежності (рис. 21). Незмінною, в певних межах, залишається питома енергія розрядів, тобто енергія поділена на площу поперечного перерізу зливка, яка становить  $0,3 \dots 0,4$  Дж/мм<sup>2</sup>, при частоті розрядів  $0,6 \dots 3$  Гц.

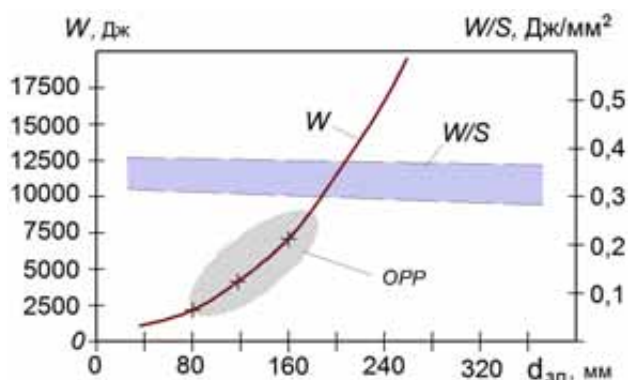


Рисунок 21 – Енергія розрядів  $W$  і питома енергія  $W/S$ , необхідні для подрібнення структури зливок різних діаметрів (OPP – область рекомендованих режимів)

Механізми подрібнення литої структури металу пов'язані з силовою дією поздовжнього магнітного поля на рідку металеву ванну і фронт кристалізації зливка. Магнітне поле призводить до утворення електровихрових течій розплаву інтенсивність яких значно перевищує конвективні потоки при традиційному ЕШП. Таки потоки рідини біля гілок зростаючих дендритів можуть призводити до їх часткового розчинення/оплавлення/руйнування (рис. 22). Відокремлені фрагменти кристалів стають зародками для формування нових кристалів. Навіть, якщо фрагменти повністю розплавляються у рідині, вони являють собою готові концентраційні неоднорідності, які значно полегшують утворення нових кристалів, що призводить до диспергування структури металу.

Крім того, електромагнітна сила  $F_e$  діє не тільки на рідкий метал, але і безпосередньо на зростаючі кристали, крізь які тече електричний струм (рис. 22).



При розрядах конденсаторів сила  $F_e$  утворюється протягом мілісекунд, створюючи тим самим "удари" на гілки зростаючих дендритів. При періодичній дії розрядів утворюються вібрації, які при достатній їх частоті і амплітуді можуть руйнувати гілки дендритів.

Таким чином один з механізмів подрібнення структури зливків пов'язаний з руйнуванням/розчиненням/розплавленням дендритних гілок, фрагменти яких розносяться перед фронтом кристалізації і стають центрами формування нових кристалів. Цей механізм підсилюється більш сприятливими умовами при утворенні вібрацій для формування нових центрів кристалізації на різного роду активних домішках і неоднорідностях, які є перед фронтом кристалізації.

Отже, експериментальна оцінка різних варіантів електромагнітного впливу з використанням розрядів ємнісних накопичувачів електричної енергії показала, що найбільш ефективним є поєднання розрядів на металургійну ванну і на соленоїд кристалізатора. Такий метод впливу повністю усуває формування стовбчастої орієнтованої структури металу, забезпечує її подрібнення і гомогенізацію. На основі проведених досліджень були сформульовані основні принципи, щодо побудови обладнання і застосування розрядів конденсаторів для впливу на кристалізацію металу при ЕШП.

**Шостий розділ** присвячений дослідженню процесу ЕШП в умовах вакууму. Показано, що при ЕШП сплавів, до складу яких входять високореакційні метали (Ti, Cr, Ni, Zr, Co та ін.), виникає проблема забезпечення захисту рідкого металу від взаємодії з атмосферою повітря. Через це ЕШП таких сплавів, зокрема на основі титану, здійснюють в камерній печі при незначному надлишковому тиску інертного газу. Проте дуже перспективним, з точки зору дегазації металу, може бути ведення процесу ЕШП в умовах вакууму.

Експериментальні дослідження проводили в електрошлаковій печі камерного типу, яка дозволяє вести перепад як в умовах надлишкового тиску інертного газу до 500 кПа, так і у вакуумі. В експериментах використовували оксидні флюси АНФ-1, АНФ-6, АНФ-28 та сольові – АН-Т2, АН-Т4.

Було встановлено, що лімітуючим чинником реалізації процесу ЕШП у вакуумі є закипання флюсу, викликане інтенсивним випаровуванням легколетючих сполук, насамперед хлоридів і фторидів. Для всіх досліджуваних флюсів існував мінімальний тиск, нижче за який підвищувалась гідродинамічна активність шлакової ванни, порушувалася стабільність струму плавки і флюс закипав (рис. 23).

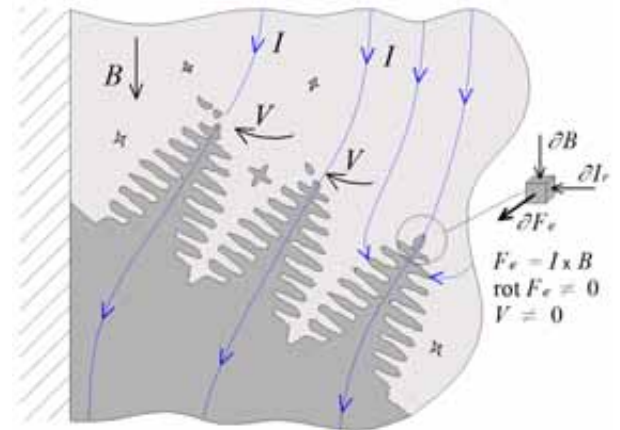


Рисунок 22 – Щодо механізмів подрібнення структури металу під дією імпульсних електромагнітних впливів:  $I$  – лінії електричного струму;  $B$  – напрямок дії магнітного поля;  $V$  – рух розплаву

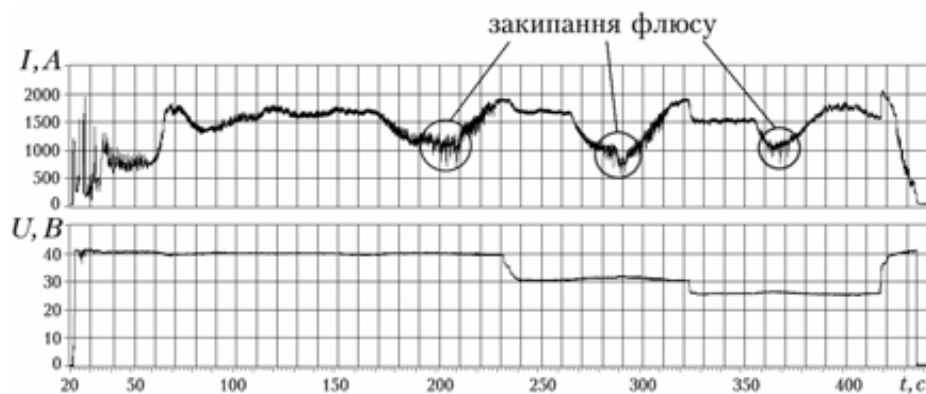


Рисунок 23 –  
Реєстрограми струму і  
напруги процесу ЕШП  
при зменшенні тиску в  
плавильному просторі  
( $d_{ел}=40$  мм,  $d_{кр}=65$  мм,  
флюс – АНФ-6)

При цьому, рівень критичного тиску, при якому флюс починав кипіти, залежав як від складу флюсу, так і від електричних режимів ЕШП, що визначають потужність процесу і температуру шлакової ванни. Чим вище була потужність, тим при вищому тиску закипав флюс (рис. 24).

Встановлено, що для сольових флюсів типу АН-Т2 та АН-Т4 тиск закипання шлакової ванни становить 12...22 та 15...26 кПа, відповідно, а для фторидно-оксидних флюсів АНФ-1, АНФ-6, АНФ-28 – він нижчий і становить біля 3...15 кПа (рис. 24).

Було досліджено вплив тиску в плавильному просторі на газовий склад і особливості структуроутворення титанових зливок. Плавки проводили при перепаді пресованих з губчастого титану ТГ-110 (під ВТ1-0), і ТГ-130 та лігатури К5 (під ВТ22), витратних електродів в кристалізаторах діаметром 85 і 105 мм під флюсом АН-Т4. Перед плавкою плавильний простір вакуумували до тиску 2,6 Па ( $2 \times 10^{-2}$  мм. рт. ст.), потім заповнювали аргоном. Експерименти проводили при різних значеннях тиску в плавильному просторі, який змінювали в межах від 20 кПа до 300 кПа.

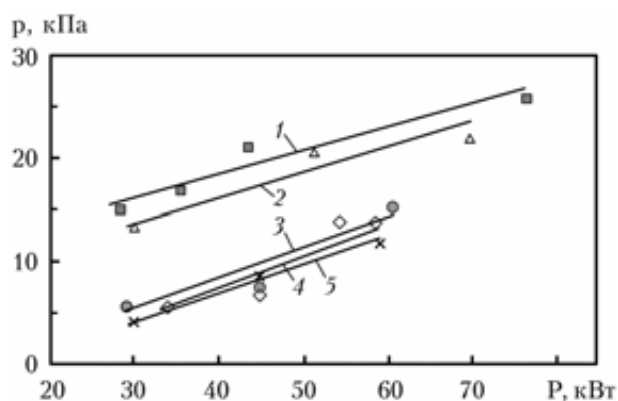


Рисунок 24 – Вплив потужності процесу ЕШП на тиск закипання різних флюсів:  
1 – АН-Т4; 2 – АН-Т2; 3 – АНФ-28; 4 – АНФ-1; 5 – АНФ-

В усьому досліджуваному діапазоні тисків процес ЕШП проходив стабільно. Зливки мали гладку поверхню, структура металу щільна, без внутрішніх дефектів. Середній розмір зерен (у поперечному перерізі) в зливку, виплавленому при 25 кПа, становив  $3,1 \times 1,7$  мм, при 160 кПа –  $2,3 \times 1,2$  мм (рис. 25). Тобто, зливок, виплавлений в умовах вакууму, мав більш крупнозернисту структуру. Це можна пояснити через вплив вакууму на режими ЕШП, що призводить до зниження струму плавки і, тим самим, впливає на локальну швидкість твердіння і розмір зерна литого металу.

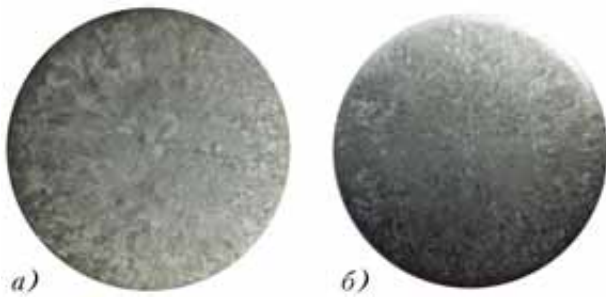


Рисунок 25 – Макроструктура поперечного перерізу титанових зливків, отриманих при тиску в плавильному просторі 25 кПа (а) і 160 кПа (б)

Результати газового аналізу металу виплавлених зливків надані в табл. 1 і на рис. 26. Аналіз отриманих даних показує, що у досліджуваному діапазоні рівень тиску в плавильному просторі мало впливає на вміст кисню і азоту в титанових зливках. Відхилення вмісту цих газів, які були зафіксовані, не мають якоїсь закономірності і, вочевидь, пов'язані з неконтрольованими відмінностями при

Таблиця 1 – Вміст газів в титанових зливках, отриманих ЕШП при різному тиску в плавильному просторі

Сплав	Тиск Ar, кПа	Вміст, мас. %		
		[O]	[N]	[H]
BT1-0	25	0,074	0,0060	0,0034
	160	0,070	0,0056	0,0052
BT22	25	0,13	0,015	0,0052
	50	0,14	0,027	0,0053
	75	0,09	0,022	0,0065
	100	0,14	0,020	0,0076
	150	0,14	0,025	0,0068
	200	0,14	0,027	0,0064
	300	0,13	0,014	0,0070

проведенні експериментів і похибками вимірювань.

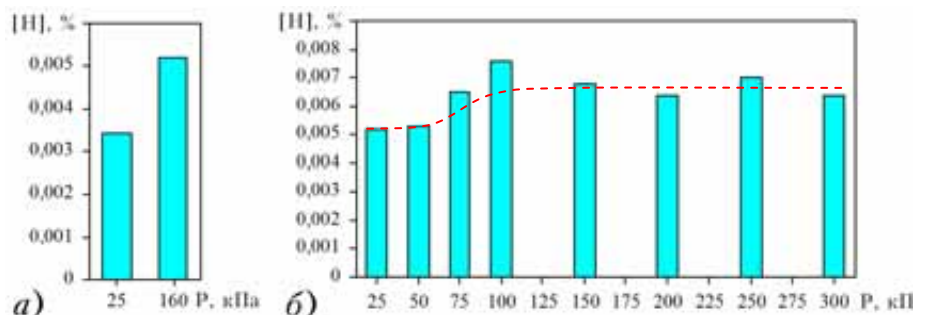
Щодо вмісту водню, то в даному випадку, як для зливків технічного титану BT1-0, так і для зливків сплаву BT22 була помічена певна закономірність, яка виявляється в зменшенні наявності водню при зниженні тиску. Для зливків BT1-0, зменшення тиску з 160 до 25 кПа дало можливість зменшити вміст водню з 0,0052 до 0,0034 мас. %, тобто на 35 %. Для зливків сплаву BT22 мала місце схожа ситуація, вміст водню зменшився приблизно на 20 %.

Зменшення вмісту водню пов'язане з

видаленням адсорбованого на розвиненій поверхні губчастого титану водню, а також зменшенням ступеня його розчинності у титані при зменшенні тиску, яке має зворотний характер.

Таким чином, проведені експерименти довели можливість зменшення на 20...35 % вмісту водню у титанових сплавах, шляхом ведення процесу ЕШП в умовах вакууму (20...25 кПа).

Рисунок 26 – Вплив тиску в плавильному просторі печі ЕШП на наявність водню в зливках титану BT1-0 (а) і сплаву BT22 (б)



Можливість зменшення наявності атмосферних газів в металі, шляхом ведення процесу ЕШП в умовах вакууму, також була підтверджена при переplаві відходів титанової і сталевий стружки при виплавці феротитану  $FeTi$ . В цьому випадку зменшення тиску в плавильному просторі з 130 до 20 кПа призвело до зменшення вмісту кисню, азоту і водню в отриманому феротитані з 0,25, 0,03 і 0,012 % до 0,21, 0,02 і 0,009 % відповідно. В даному випадку зменшення вмісту газів пов'язане, в першу чергу, з видаленням в процесі вакуумного ЕШП з плавильного простору вологи та інших домішок (змащувально-охолоджувальної рідини та ін.), які можуть бути адсорбовані розвиненою поверхнею стружки (або заходиться на внутрішній поверхні камери печі).

Вищенаведене показує ефективність і перспективність застосування вакуумного ЕШП для дегазації металу при переplаві вторинної сировини, зокрема, титановий стружки в процесі виплавки високовідсоткового феротитану.

**У сьомому розділі** розроблено технологічні процеси камерного ЕШП високореакційних і прецизійних сплавів, представлено обладнання для реалізації даних процесів, надані данні щодо властивостей одержуваних матеріалів.

Створена дослідно-промислова установка для ЕШП високореакційних і прецизійних сплавів дозволяє вести переplав витратних електродів в контрольованій інертній атмосфері при надлишковому тиску, або в умовах вакууму, із живленням процесу змінним, постійним, або імпульсним електричним струмом. Обладнанням передбачено ведення процесу з пошаровим формуванням зливка та електромагнітним впливом на металургійну ванну із застосуванням розрядів конденсаторів. Технічні характеристики установки надані в таблиці 2.

Таблиця 2 – Технічні характеристики установки для ЕШП високореакційних і прецизійних металів та сплавів

Параметр	Величина
Потужність, кВт	724
Максимальна сила струму переplаву, А	10 000 (8 000 DC)
Робоча напруга, В	0...72
Регулювання напруги	плавне, під навантаженням
Мінімальний залишковий тиск в камері, Па	1,06
Робочий тиск в камері при плавці, кПа	20...300
Індукція зовнішнього поля в зоні плавки, Тл	до 0,5
Максимальна сила струму в розрядному контурі системи електромагнітного впливу, кА	до 28
Продуктивність установки, кг/год	до 150
Діаметр зливка, мм	50...260
Максимальна довжина зливку, мм	900
Маса зливка, кг	до 200
Діаметр витратного електроду, мм	20...200
Довжина витратного електроду, мм	до 1500
Габаритні розміри установки, мм	4300 × 2800 × 3800



Розроблена технологія виплавки зливків титанових сплавів передбачає переплавлення витратних електродів, які виготовляють шляхом порційного пресування титану губчастого і легуючих компонентів крізь конусну прохідну прес-форму. Переплавлення електродів відбувається під дією імпульсного магнітного поля, створеного розрядами конденсаторів.

В якості флюсів при ЕШП титанових сплавів рекомендовано використання флюсів АНТ-2, АНТ-4, АНТ-6, АНТ-12. Для підвищення техніко-економічних показників процесу запропоновано низку флюсів для ЕШП титану систем  $\text{CaF}_2\text{--}8\text{...}30 \text{SrCl}_2\text{--}2\text{...}5 \text{Na}_3\text{AlF}_6$ ,  $\text{CaF}_2\text{--}3\text{...}44 \text{MeCl}_2\text{--}0,5\text{...}3 \text{MgTiF}_6$ , де  $\text{MeCl}_2$  – хлорид лужноземельного металу.

Технологія була випробувана при виплавці широкої номенклатури титанових сплавів. Їх типові механічні характеристики наведені в табл. 3. Порівняно з металом, отриманим традиційним способом, при порівняній міцності вони відрізняються більш високими показниками пластичності і ударної в'язкості.

Таблиця 3 – Типові механічні характеристики титанових сплавів технології ЕШП

Сплав	Стан	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
BT1-0	литий	440	360	28,0	57,0	185,0
OT4	пруток катаний і термооброблений	730	610	14,5	33,0	50,0
BT6	литий	940	890	9,3	24,0	48,0
	пруток катаний і термооброблений	1020	920	11,0	38,0	43,0
BT22	литий	970	940	8,5	21,7	33,0
	пруток катаний і термооброблений	1300	1210	12,0	31,0	34,0
Ti-10-2-3	литий	980	920	6,7	12,4	30,0
	деформований і термооброблений	1210	1120	13,0	36,5	45,0
ТС6	пруток катаний і термооброблений	1350	1180	12,0	25,0	28,2
Ti-48Al-2Cr-2Nb (ат. %), $T_{\text{исп}}=700^{\circ}\text{C}$	литий	470	520	3,7	8,3	-

Важливою перевагою розробленого процесу є можливість отримання зливків різного поперечного перерізу – циліндричних, прямокутних, порожнистих, з якісним формуванням бічної поверхні і щільною, однорідною макроструктурою (рис. 27).



Рисунок 27 – Зливки титанових сплавів технології ЕШП, різного поперечного перерізу

Ефективною сферою застосування розробленого процесу є виплавка зливків нікеліду титану. Це функціональний матеріал, який має ефект пам'яті форми, і до якого ставляться жорсткі вимоги щодо однорідності хімічного складу. В табл. 4 надано розподіл хімічних елементів по висоті і радіусу зливка, отриманого розробленим способом із вихідних шихтових матеріалів (титану губчастого ТГ110 і нікелю НП1). Отримані данні показують, що за хімічним складом метал цілком відповідає вимогам ТУ. При цьому, максимальне відхилення вмісту Ti і Ni в об'ємі зливка не перевищує 0,18 і 0,24 %, відповідно, що свідчить про високий рівень хімічної однорідності металу.

Таблиця 4 – Хімічний склад зливка Ti-55Ni (мас.%) технології ЕШП

Місце аналізу		Вміст, % мас.								
		Ti	Ni	Al	Fe	Si	Cu	O	N	H
зливков верх	Центр	44,68	54,72	0,12	0,035	0,020	0,032	не визначали		
	1/2R	44,75	54,67	0,14	0,024	0,015	0,030			
	Край	44,78	54,54	0,14	0,042	0,028	0,030			
зливков середина	Центр	44,80	54,64	0,14	0,032	0,032	0,056	0,09	0,016	0,002
	1/2R	44,80	54,53	0,12	0,030	0,050	0,028			
	Край	44,62	54,78	0,12	0,030	0,032	0,040			
зливков низ	Центр	44,63	54,78	0,12	0,067	0,026	0,046	не визначали		
	1/2R	44,70	54,72	0,12	0,100	0,040	0,052			
	Край	44,65	54,78	0,12	0,095	0,035	0,030			
ТН1 (ТУ 1-809-394-84)		основа	53,5-56,5	не регл.	≤0,3	≤0,15	не регл.	≤0,2	≤0,05	≤0,013

Були розроблені схема і режими гарячої деформації зливків нікеліду титану технології ЕШП. Вони включають наступні етапи: герметизацію зливка в конверті; відпал при  $T=650...700$  °С, протягом 1 години; осадку при  $T=890...910$  °С з  $\varepsilon \approx 15...20\%$ ; прокатування осаджених поковок при  $T=850...870$  °С з обтисненням  $\varepsilon \approx 5...8\%$  за один прохід, з отриманням пластин необхідної товщини ( $\delta=0,5...15$  мм). Для подальшого отримання дроту, з прокатаних пластин виготовляють циліндричні заготовки, які піддають прокатці при кімнатній температурі на калібрувальних вальцях з послідуочим волочінням дроту.

Розроблені режими деформації дозволили отримати зі зливків сплаву Ti-55Ni (мас.%) технології ЕШП пластини товщиною 0,5...15 мм і дріт діаметром 0,3...1,2 мм, без поверхневих дефектів у вигляді тріщин, розшарувань та ін. (рис. 28 а, б). Оптична металографія показала відсутність внутрішніх дефектів (рис. 28 в).

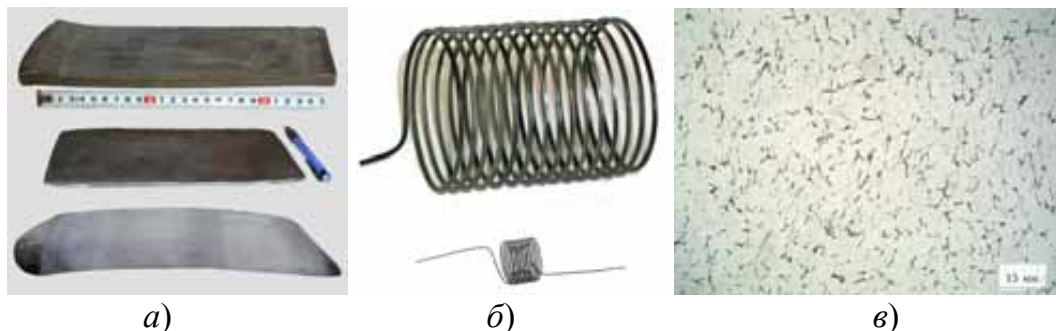


Рисунок 28 – Пластини товщиною  $\delta=0,8...14$  мм (а), дріт  $1,2 \times 1,2$  і  $\varnothing 0,4$  мм (б) сплаву Ti-55Ni (мас.%) технології ЕШП, і його мікроструктура (в)

Дилатометричні дослідження і вивчення функціональних властивостей виготовленого дроту показали наявність у металу яскраво вираженого ефекту пам'яті форми. Таким чином, проведені дослідження довели ефективність застосування розробленої технології для отримання зливків нікеліду титану.

Ще одним прикладом практичного застосування результатів роботи є переплав відходів прецизійних сплавів. Слід зазначити, що сьогодні в Україні немає власного промислового виробництва прецизійних сплавів. Тому перероблення таких сплавів є актуальним завданням, яке становить практичний інтерес.

З огляду на це, та через конкретні замовлення українських підприємств були розроблені процеси ЕШП відходів прецизійних сплавів типу 29НК, 50Н, 46Н, 49КФ. Схема перероблення включає підготовку шихтових матеріалів, виготовлення з них витратних електродів і їх переплав. Витратні електроди виготовляють шляхом пресування або за допомогою TIG зварювання. Для їх переплаву рекомендовано застосовувати флюси типу ESR 2027, ESR 2060, ESR 2065, ESR 2015 ELH, 2029 ELH, АН-Т4. Для гомогенізації хімічного складу сплаву застосовується вплив імпульсним поздовжнім магнітним полем.

Результати хімічного аналізу металу зливків прецизійних сплавів, виплавлених з відходів, надані в табл. 5. Отримані дані показали, що склад сплавів відповідає вимогам нормативних документів і характеризується високою хімічною однорідністю металу.

Таблиця 5 – Хімічний склад прецизійних сплавів, отриманих ЕШП відходів

Сплав	Місце аналізу		Вміст, % мас.						
			Si	Mn	Cu	Ni	Co	Cr	Fe
29НК	Низ	Центр	-	0,2	0,19	29,1	17	0,03	53,3
		Край	-	0,22	0,18	28,9	17,2	0,04	53,4
	Середина	Центр	-	0,18	0,20	28,8	17,2	0,04	53,5
		Край	-	0,20	0,20	29,2	17,0	0,04	53,2
	Верх	Центр	-	0,20	0,16	29,4	16,9	0,03	53,2
		Край	-	0,20	0,16	29,5	16,9	0,04	53,14
	Середнє значення		-	0,20	0,18	29,16	17,04	0,038	53,3
ДСТУ 10994-74			≤0,3	≤0,4	≤0,2	28,5-29,5	17,0-18,0	≤0,1	решта
50Н	Низ	Центр	0,14	0,4	0,18	49,8	-	-	49,1
		Край	0,15	0,4	0,14	49,5	-	-	49,4
	Середина	Центр	0,14	0,46	0,16	49,9	-	-	48,8
		Край	0,14	0,46	0,16	49,6	-	-	49,2
	Верх	Центр	0,16	0,4	0,18	49,5	-	-	49,3
		Край	0,16	0,4	0,14	49,5	-	-	49,4
	Середнє значення		0,15	0,42	0,16	49,63	-	-	49,2
ДСТУ 10994-74			≤0,3	0,3-0,6	≤0,2	49,0-50,5	-	-	решта
46Н	Низ	Центр	-	0,22	0,15	45,8	-	-	53,5
		Край	-	0,2	0,15	45,6	-	-	54
	Середина	Центр	-	0,22	0,15	45,9	-	-	53,7
		Край	-	0,2	0,18	45,8	-	-	53,6
	Верх	Центр	-	0,18	0,16	45,9	-	-	53,6
		Край	-	0,18	0,16	45,8	-	-	53,8
	Середнє значення		-	0,20	0,16	45,8	-	-	53,7
ДСТУ 10994-74			≤0,3	≤0,4	≤0,2	45,5-46,5	-	-	решта

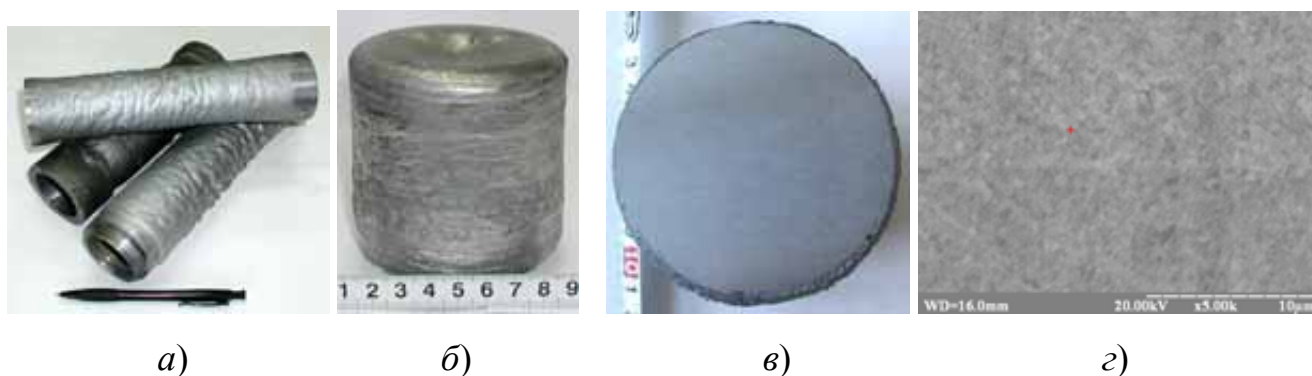
Проведені дослідження стали основою для виконання промислових замовлень з переробки відходів прецизійних сплавів, включаючи виготовлення витратних електродів, одноразовий їх переплав, гарячу прокатку зливків з подальшим відпалом і механічним обробленням з отриманням чистових прутків (рис. 29).



Рисунок 29 – Зливки прецизійного сплаву 29НК технології ЕШП та виготовлені з них поковки та прутки

Ще одною можливою сферою застосування результатів досліджень є переплав відпрацьованих катодів з хрому, які являють собою порожнисті циліндричні вироби із зовнішнім діаметром 55...60 мм і довжиною 180...220 мм (рис. 30 *а*).

Було розроблено технологічний процес переплаву відпрацьованих катодів у камерній печі ЕШП з електромагнітним впливом. Отримано дослідні зразки зливків хрому, які є витратним матеріалом для подальшого нанесення покриттів на поверхню виробів спеціального призначення. Показано, що за хімічним складом метал зливків відповідає вимогам ДСТУ 5905-2004 до хрому марки Х99Н1. При цьому, метал характеризується щільною структурою і відсутністю дефектів металургійного походження (рис. 30 *б,в*). Електронна мікроскопія також не виявила внутрішніх дефектів (рис. 30 *г*). Наслідком цих робіт стала розробка карти технологічного процесу рециклінгу відпрацьованих катодів Cr в камерній печі ЕШП.



*а)*

*б)*

*в)*

*г)*

Рисунок 30 – Відпрацьовані катода з хрому (*а*), виплавлений з них зливок  $\varnothing 84$  мм (*б*), його поперечний переріз (*в*) і мікроструктура (*г*)

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Теоретично обґрунтовані і експериментально досліджені нові методи вирішення фундаментальної проблеми керування процесами структуроутворення металу зливків ЕШП. Вони базуються на застосуванні нестационарних режимів електричного живлення, із зменшенням об'єму металевої ванни і забезпеченням пошарового формування зливка, а також на імпульсному впливі на

гідродинамічний стан розплавів шлаку і металу зовнішніми електричними і магнітними полями.

2. Показано, що параметри процесу ЕШП з нестационарним живленням електричною енергією визначаються ступенем інерційності теплових режимів витратного електроду, металеві і шлакової ванн, та гарнісажної кірки, серед яких останній є обмежуючим чинником. При цьому, в залежності від параметрів живлення, можливо два принципово різних варіанти реалізації електрошлакового процесу: у безперервному режимі або з забезпеченням періодичності процесів плавлення і кристалізації металу.

3. Встановлено, що застосування нестационарних режимів електричного живлення дозволяє зменшувати на 7...10 % питомі витрати електроенергії та подрібнювати і гомогенізувати структуру литого металу, у порівнянні з традиційним ЕШП, зменшуючи в 1,5...2 рази розмір зерна при щільності струму у ванні  $\geq 0,4 \text{ А/мм}^2$ .

4. Доведена ефективність керування структуроутворенням зливок ЕШП шляхом порційного тепловнесення із забезпеченням пошарового формування зливка. Показано, що зливки, отримані способом пошарового формування, мають щільну структуру, без пористості та шлакових включень, характеризуються відсутністю великих стовпчастих кристалів та зони зустрічної кристалізації по осі зливка. При цьому, максимальна довжина кристалів обмежується висотою окремого наплавленого шару, а дисперсність структури вище, ніж у зливок традиційного ЕШП.

5. Встановлено, що для забезпечення пошарового формування зливка з відсутністю дефектів по межах сплавлення окремих шарів, періоди подачі і плавлення витратного електроду повинні чергуватись з паузами, при яких в шлаковій ванні підтримується електричний струм, виходячи з умов твердіння під час пауз 75...95 % об'єму рідкої металеві ванни при висоті шарів наплавленого металу в межах  $(0,1...0,5) \times d_{\text{зл}}$ .

6. На основі експериментальних даних запропоновані розрахункові залежності для визначення параметрів пошарового твердіння зливок ЕШП діаметром до 220 мм:

- час повного твердіння металеві ванни (хв)  $\tau_{\text{п}} = (0,06...0,08) \cdot k_{\text{пд}} \cdot k_{\text{тфм}} \cdot d_{\text{зл}}^2$ , де  $d_{\text{зл}}$  – діаметр зливка (см),  $k_{\text{пд}}$  – коефіцієнт підігріву металу при неповному відключенні напруги,  $k_{\text{тфм}} = \alpha_{\text{ст}} / \alpha_{\text{м}}$  ( $\alpha_{\text{ст}}$  – коефіцієнт температуропровідності вуглецевої сталі,  $\alpha_{\text{м}}$  – коефіцієнт температуропровідності досліджуваного сплаву);

- товщина затверділого шару металу (см)  $\delta = (2,5...4,5) \cdot k_{\text{пд}} \cdot \sqrt{\tau / k_{\text{тфм}}}$ , де  $\tau$  – час твердіння (с);

- температура металу на відстані  $0,5 \times d_{\text{зл}}$  від верхнього торця зливка і  $0,25 \times d_{\text{зл}}$  від бічної поверхні, після відключення напруги ( $^{\circ}\text{C}$ )  $T = T_{\text{в}} + (T_{\text{мв}} - T_{\text{в}}) \cdot k_{\text{пд}} \cdot k_{\text{тфм}} \cdot e^{-k_{\text{тп}} \tau}$ , де  $T_{\text{мв}}$  – температура металеві ванни,  $T_{\text{в}}$  – температура охолоджуючої води,  $\tau$  – час охолодження (хв),  $k_{\text{тп}}$  – коефіцієнт теплопередачі, який для зливок діаметром 85, 125 і 220 мм дорівнює 0,19, 0,056 і 0,02 відповідно.

7. Розроблені технологічні схеми застосування розрядів ємнісних накопичувачів електричної енергії для керування процесами кристалізації металу зливків ЕШП. Показано, що застосування сумісних електричних розрядів на соленоїд кристалізатора і металургійну ванну підсилює МГД вплив на рідкий метал, що дозволяє, при питомій енергії розрядів  $0,3...0,4$  Дж/мм<sup>2</sup> і частоті їх дії  $0,6...3$  Гц, повністю усунути формування стовбчастої структури металу зливка, забезпечуючи її подрібнення і гомогенізацію, наближаючи до структури деформованого металу.

8. Встановлено, що імпульсне поздовжнє магнітне поле, створене розрядами конденсаторів на соленоїд кристалізатора, призводить до циклічних коливань струму плавки. Ці коливання проявляються у періодичному падінні струму плавки, під час дії імпульсів магнітного поля і його відновленні, під час пауз, та залежать від частоти імпульсів і сили розрядного струму. Механізм зменшення струму плавки пов'язаний з МГД ефектами в шлаковій ванні, внаслідок чого зменшується площа контакту витратного електроду зі шлаком, збільшується міжелектродний проміжок і погіршується електричний контакт на поверхні поділу *електрод - шлак*.

9. Показано, що лімітуючим чинником реалізації процесу ЕШП у вакуумі є закипання флюсу, викликане інтенсивним випаровуванням легколетючих сполук, насамперед хлоридів і фторидів. При цьому, тиск закипання флюсу залежить як від його складу, так і від електричних режимів ЕШП. Встановлено, що критичний рівень тиску для сольових флюсів типу АН-Т2, АН-Т4 становить  $12...26$  кПа, а для фторидно-оксидних флюсів типу АНФ-1, АНФ-6, АНФ-28 –  $3...15$  кПа.

10. Отримано експериментальні дані, щодо впливу тиску в плавильному просторі, в діапазоні  $20...300$  кПа, на газовий склад металу зливків. Встановлена можливість зменшення на  $20...35$  % вмісту водню у титанових сплавах, шляхом ведення процесу ЕШП в умовах вакууму ( $20...25$  кПа).

11. Створено дослідно-промислове обладнання для ЕШП високореакційних і прецизійних сплавів потужністю  $724$  кВт. Обладнання призначене для переплаву в контрольованій інертній атмосфері при надлишковому тиску, та в умовах вакууму, із живленням змінним, постійним та імпульсним електричним струмом. Обладнанням передбачено ведення процесу з пошаровим формуванням зливка та електромагнітним впливом із застосуванням розрядів конденсаторів.

12. Розроблено технологічні процеси камерного ЕШП титанових сплавів, нікеліду титану, прецизійних сплавів типу 29НК, 50Н, 46Н, 49КФ, хрому. Отримані дослідні і промислові партії зливків, метал яких характеризується високою хімічною і структурною однорідністю і відповідає вимогам нормативних документів. Розроблені технології створюють передумови для вирішення важливої народногосподарської проблеми організації в Україні конкурентоспроможного виробництва вказаних металів і сплавів та імпортозаміщення відповідних виробів.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science*

1. **Igor Protokovilov**, Victor Shapovalov, Vitaly Porokhonko. (2021). Effect of layer-by-layer formation of ingot during electroslag remelting on the quality of its



surface and solidification structure. *Ironmaking & Steelmaking*. Vol. 48, No. 1, 62–68. <https://doi.org/10.1080/03019233.2020.1731255>. (*Scopus, Web of Science*).

2. **I. Protokovilov**, V. Shapovalov, V. Porokhonko, T. Beinerts (2021). Effect of the longitudinal magnetic field on the droplets evolution during electroslag remelting process. *Magnetohydrodynamics* Vol. 57, No. 4, pp. 559–568. <https://doi.org/10.22364/mhd.57.4.10>. (*Scopus, Web of Science*).

3. V. Shapovalov, **I. Protokovilov**, V. Porokhonko. (2022). Structure and mechanical properties of thick-walled joints of Ti-6-4 titanium alloy made by electroslag welding. *Procedia Structural Integrity*, 36, 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.033> (*Scopus*)

4. Ya. Kompan, **I. Protokovilov**, Y. Fautrelle, Yu. Gelfgat, A. Bojarevics. (2010). Magnetically Controlled Electroslag Melting of Titanium Alloys // *Magnetohydrodynamics* Vol. 46, No. 3, pp. 317–324 (*Scopus, Web of Science*).

### *Статті у фахових виданнях*

5. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протоковилів І.В.** К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов. *Современная электрометаллургия*. 2007. №4. С.3-7.

6. **Протоковилів І.В.** Электрошлаковая выплавка галогенидных бескислородных флюсов. *Современная электрометаллургия*. 2008. №2. С.13-16.

7. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протоковилів І.В.** Мелкозернистые слитки многокомпонентных титановых сплавов. *Теория и практика металлургии*. 2008. №2. С.35-40.

8. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., Петров Д.А., Белов А.М., **Протоковилів І.В.** Интерметаллидное жароупрочнение сплавов титана, получаемых способом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. *Современная электрометаллургия*. 2009. №1. С.1-11.

9. **Протоковилів І.В.** Измельчение кристаллической структуры полых титановых слитков при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке. *Современная электрометаллургия*. 2011. №4. С.3–5.

10. **Протоковилів І.В.** МГД-технологии в металлургии (Обзор). *Современная электрометаллургия*. 2011. №4. С.32–41.

11. **Протоковилів І.В.**, Петров Д. А. Получение сплавов системы Ti-Ni с эффектом памяти формы методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. *Титан*. 2011. №4(34). С.40-44.

12. **Протоковилів І.В.** Дегазация электрода спрессованного из губчатого титана в процессе вакуумирования камерной печи ЭСП. *Современная электрометаллургия*. 2012. №1. С.12–15.

13. **Протоковилів І.В.**, Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Петров Д. А. Возможности использования импульсных электромагнитных воздействий в электрошлаковых процессах. *Современная электрометаллургия*. 2012. №2. С.8–13.

14. **Протоковилів І.В.**, Скиба И. А., Петров Д. А. Технологические аспекты магнитоуправляемой электрошлаковой плавки и термомеханической обработки никелида титана. *Современная электрометаллургия*. 2012. №2. С.17–20.

15. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Петров Д.А. Особенности электрошлаковой сварки титана с использованием электромагнитных методов воздействия. Вісник НУК імені адмірала Макарова. 2012. №5. С.170-176 (електронне видання).

16. Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О., **Протокилов И.В.** Физическое моделирование электровихревых течений при ЭШП. Современная электрометаллургия. 2013. №1. С.3–7.

17. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б., Бабич Л.М. Изготовление расходуемых электродов для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки титана. Современная электрометаллургия. 2013. №3. С.8–11.

18. **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Порохонько В.Б. и др. Особенности создания импульсных магнитных полей для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Современная электрометаллургия. 2013. №4. С.21–26.

19. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Назарчук А.Т. и др. Способы создания внешних магнитных полей для управления процессом электрошлаковой сварки. Автоматическая сварка. 2013. №12. С.45-50.

20. **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Порохонько В.Б. и др. Электрошлаковая выплавка титановых слитков с импульсным электропитанием. Современная электрометаллургия. 2014. №2. С.10–14.

21. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б. Способы управления кристаллизацией металла слитков при ЭШП. Современная электрометаллургия. 2014. №3. С.7–15.

22. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б. Физическое моделирование процесса плавления расходуемого электрода при ЭШП в условиях внешнего электромагнитного воздействия. Современная электрометаллургия. 2015. №1. С.8–12.

23. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Гончаров И.А., Мищенко Д.Д. Исследование физических и технологических свойств солевых флюсов для ЭШП титана. Современная электрометаллургия. 2015. №3. С.7–12.

24. **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Порохонько В.Б., Петров Д.А. Использование разрядов конденсаторов для управления кристаллизацией металла при ЭШП. Современная электрометаллургия. 2015. №4. С.3–8.

25. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Электрошлаковый переплав отходов прецизионных сплавов. Современная электрометаллургия. 2016. №2. С.18–22.

26. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Электрошлаковая выплавка и термомеханическая обработка высокопрочного титанового псевдо  $\beta$ -сплава ТС6. Современная электрометаллургия. 2016. №3. С.16–20.

27. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А. Структура и свойства высокопрочного титанового сплава Ti-10-2-3 электрошлакового переплава. Современная электрометаллургия. 2017. №1. С.9–14.

28. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б. Физическое моделирование капельного переноса электродного металла при ЭШП с наложением импульсных магнитных полей. Современная электрометаллургия. 2017. №3. С.9–14.

29. **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Петров Д.А. и др. Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в



электрошлаковых печах камерного типа. Современная электрометаллургия. 2018. №2. С.45–51.

30. **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Петров Д.А. и др. Особенности структурообразования прецизионного сплава 29НК при ЭШП с порционным формированием слитка. Современная электрометаллургия. 2019. №1. С.11–16.

31. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Получение титанового сплава ОТ4, легированного марганцем, в электрошлаковой печи камерного типа. Современная электрометаллургия. 2019. №2. С.3–6.

32. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Биктагиров Ф.К. та ін. Физическое моделирование кристаллизации слитков в изложнице в условиях электрошлакового обогрева и подпитки. Современная электрометаллургия. 2019. №3. С.3–9.

33. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Влияние технологических параметров ЭШП на особенности плавления расходного электрода из прецизионного сплава 29НК. Сучасна електрометалургія. 2019. № 4. С.4–8.

34. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Исследование технологических особенностей и допустимых давлений процесса ЭШП в вакууме. Сучасна електрометалургія. 2020. № 2. С.3–9.

35. **Протокилов І.В.**, Порохонько В.Б., Петров Д.А. Вплив зовнішнього поздовжнього магнітного поля на електричні режими ЕШП. Сучасна електрометалургія. 2021. № 3. С.5–8.

#### *Тези та матеріали доповідей на науково-технічних конференціях*

36. Белов А.М., Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протокилов И.В.** Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка (МЭП) титановых сплавов в продольном магнитном поле. Материалы IV всеукр. н-тех. конф. молодых ученых “Сварка и смежные технологии”, 23-25 мая 2007г. С.97.

37. Компан Я.Ю., **Протокилов И.В.** Технологические аспекты получения однородных мелкозернистых слитков титановых сплавов. Материалы междунар. конф. HighMatTech “Материалы и покрытия в экстремальных условиях”, 15-19 октября 2007 г., Киев, С. 152.

38. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протокилов И.В.** Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка титановых сплавов с дискретными воздействиями магнитных полей. Материалы междунар. конф. “Ti-2008 в СНГ”, 18-21 мая 2008 г. С.96-99.

39. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протокилов И.В.** и др. Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка в импульсных магнитных полях. Сборник тезисов междунар. конф. “Сварка и родственные технологии – в третье тысячелетие”, 24-26 ноября 2008, Киев. С.212-213.

40. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протокилов И.В.** и др. Возможность получения  $\gamma$ -алюминидов титана методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП). Материалы V Всеукр. науч. тех. конф. молодых ученых и спец. “Сварка и смежн. технологии”, 27-29 мая 2009 г. Киев. С.130.

41. Ya. Kompan, I. Protokovilov, Yu. Gelfgat. Magnetically-Controlled

Electroslag Melting (MEM) of Titanium Alloys. Proceedings of the 6th Int. Conf. on Electro-magnetic processing of materials EMP 2009, Oct. 19-23, 2009, Germany. P.615.

42. Компан Я.Ю., **Протоковиллов И.В.** Электрошлаковые технологии плавки и сварки титановых сплавов с управляемыми гидродинамическими процессами. Материалы междунар. конф. “Ti-2010 в СНГ”, 16-19 мая 2010 г, Екатеринбург. С. 154–157.

43. Ya. Kompan, **I. Protokovilov**, Y. Fautrelle, Yu. Gelfgat, A. Bojarevics. Magnetically Controlled Electroslag Melting of Titanium Alloys. Proceedings of the 6th Int. Scientific Colloquium Modelling for Material Processing, Riga, Sep. 16-17, 2010. P.85-90.

44. **Протоковиллов И.В.**, Петров Д.А., Белов А.М. Технологические аспекты получения сплавов с эффектом памяти формы системы Ti-Ni методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Матер. XI меж. конф. “Эффективность реализации науч., ресурсного и пром. потенц. в соврем. услов.”, 10-14 фев. 2011г, п. Плавь, С. 68-70.

45. **Протоковиллов И.В.**, Петров Д.А., Белов А.М. Получение слитков никелида титана методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Материалы VI Научно-техн. конф. молодых ученых и специалистов “Сварка и смежные технологии”, 25-27 мая 2011г. Киев. С.125.

46. **Протоковиллов И.В.**, Петров Д.А. Получение сплавов системы Ti-Ni с эффектом памяти формы методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Матер. междунар. конф. “Ti-2011 в СНГ”, 25-28 апреля 2011 г, Львов. С. 144–147.

47. Порохонько В.Б., **Протоковиллов И.В.**, Петров Д.А. Особливості електрошлакового зварювання титану з використанням електромагнітних методів впливу. Матеріали II всеукр. науково-практичної конф. “Зварювання та споріднені процеси і технології”, 4-8 вересня 2012 р, Миколаїв. С. 19.

48. Порохонько В.Б., **Протоковиллов И.В.**, Петров Д.А., Бабич Л.М. Технологические особенности использования электромагнитных методов воздействия на процесс ЭШС титана. Тез. докл. науч.-техн. конф. «Современные проблемы металлургии, технологии сварки и наплавки сталей и цветных металлов», Киев: Междунар. ассоциация «Сварка», 2012. С. 49.

49. Петров Д.А., **Протоковиллов И.В.**, Порохонько В.Б., Бабич Л.М. Дослідження технологічних особливостей виплавки  $\gamma$ -TiAl методом МЕМ. Материалы VII науч. техн. конф. молодых ученых и специалистов “Сварка и смежные технологии”, 22-24 мая 2013 г, Киев. С.145.

50. **Протоковиллов И.В.**, Петров Д.А., Назарчук А.Т., Бабич Л.М. Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка никелида титана. Сборник тезисов междунар. конф. “Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее”, 25-26 ноября 2013, ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, Киев. С.195.

51. Ivochkin Y., Teplyakov I., Guseva A., Vinogradov D., Tokarev Y., **Protokovilov I.** Influence of the swirled electrovortex flow on the melting of the eutectic alloy IN-GA-SN. Proc. of the 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Fundamental and Applied MHD. Riga, Latvia, June 16-20, 2014, Volume 1, P. 105-109.

52. Порохонько В.Б., **Протоковілов І.В.** Фізичне моделювання плавлення витратного електроду при ЕШП в умовах дії зовнішнього магнітного поля.

Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій: матер. Всеукр. наук.-техн. конф. - Миколаїв: НУК, 2014. С. 94-96.

53. Петров Д.А., **Протоковилів І.В.**, Порохонько В.Б., Бабич Л.М. Электрошлаковый переплав отходов прецизионных сплавов. Матеріали VIII міжнар. конф. молодих учених та спеціалістів “Зварювання та споріднені технології”, 20-22 травня 2015 р, Київ. С.150.

54. Порохонько В.Б., **Протоковилів І.В.** Фізичне моделювання процесу ЕШП в умовах дії зовнішніх електромагнітних полів. Матеріали VIII міжнар. конф. молодих учених та спеціалістів “Зварювання та споріднені технології”, 20-22 травня 2015 р, Київ. С.152.

55. **Igor Protokovilov**. Magnetically-Controlled Electroslag Melting of Titanium Alloys. The 34-th ISTC-Korea workshop on titanium materials and their manufacturing technology. Pusan, Korea, November 26-27, 2015. P. 171-183.

56. **I. Protokovilov**, A. Nazarchuk, V. Porokhonko. ESR of titanium with electromagnetic effect on metal solidification. Proceedings of the Medovar memorial symposium. Kyiv, Ukraine, June 7-10, 2016, P. 110-115.

57. **Протоковилів І.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка интерметаллидных сплавов на основе титана. Тези доповідей IV Міжнар. конф. “Титан 2016: виробництво та використання в авіабудуванні”. “МоторСіч”. Запоріжжя, 2016 р. С. 32-36.

58. **I. Protokovilov**, V. Porokhonko, A. Nazarchuk. Control of metal solidification during ESR using the energy of the electric discharges. Proceed. of the 9-th Int. conf. of young scientists on welding and related technologies. Kyiv, May 23-26, 2017, P. 44-49.

59. V. Porokhonko., **I. Protokovilov**. Physical modelling of the drop metal transfer in ESR under effect of longitudinal magnetic field. Proceedings of the Int. conf. "Welding and related technologies - present and future". 5-6 December, 2018, Kyiv, Ukraine. P. 128.

60. **Протоковилів І.В.**, Назарчук А.Т., Петров Д.А., Порохонько В.Б. Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа. Титан 2018. Производство и применение в Украине. Сб. докл. межд. конф. Под. ред. проф. С.В. Ахонина. Киев, 2018. С. 128-133 с.

61. **I. Protokovilov**, V. Shapovalov, V. Porokhonko. Control of the crystallization of the ESR ingots using non-stationary power supply modes. Proceedings of the All-Ukrainian scientific and technical conference «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ». Dnipro, Ukraine, November 22-24, 2022, P. 39-40.

### *Патенти*

62. Патент України на винахід № 119931. Спосіб електрошлакового переплаву. **Протоковилів І.В.**, Порохонько В.Б., Шаповалов В.О., Назарчук О.Т. Опубл. 27.08.2019, бюл. № 16.

63. Патент України на корисну модель № 123715. Спосіб магнітокерованої електрошлакової плавки. **Протоковилів І.В.**, Порохонько В.Б. Опубл. 12.03.2018, бюл. №5.

64. Патент України на винахід № 110591 С2. Флюс для електрошлакового

переплаву титанових сплавів. **Протоковілов І.В.**, Порохонько В.Б. Опубл. 12.01.2016, бюл. №1.

65. Патент України на винахід № 97778. Спосіб магнітокерованої електрошлакової плавки титанових сплавів. Компан Я. Ю., Назарчук О. Т., **Протоковілов І.В.** Опубл. 12.03.2012, бюл. №5.

## АНОТАЦІЯ

**Протоковілов І.В. Електрошлаковий переплав високореакційних і прецизійних металів та сплавів з нестаціонарними режимами електричного живлення і електромагнітного впливу.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів». – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, 2023.

Дисертація присвячена вирішенню проблеми покращення експлуатаційних характеристик високореакційних і прецизійних сплавів, шляхом підвищення хімічної і структурної однорідності металу зливків при електрошлаковому переплаві (ЕШП). Проведено комплекс теоретичних досліджень та експериментальних розробок процесів плавлення, перенесення і кристалізації металу при ЕШП в умовах нестаціонарних режимів електричного живлення і зовнішнього електромагнітного впливу. Запропоновано нові методи і технологічні рішення з керування процесами структуроутворення металу зливків. Вони базуються на веденні електрошлакового процесу в імпульсному режимі, із забезпеченням пошарового формування зливка, а також на імпульсному впливі на гідродинамічний стан металеві ванни електричними і магнітними полями, створеними із застосуванням розрядів ємнісних накопичувачів електричної енергії. Розроблені методи впливу на кристалізацію зливків ЕШП дозволяють повністю усунути формування стовбчастої структури металу, забезпечують її подрібнення і гомогенізацію, наближаючи до структури деформованого металу.

Проведені дослідження процесу ЕШП в умовах вакууму. Показано, що лімітуючим чинником реалізації переплаву у вакуумі є закипання флюсу, викликане інтенсивним випаровуванням легколетючих сполук, насамперед хлоридів і фторидів. Встановлено, що тиск закипання флюсу при ЕШП залежить як від складу флюсу, так і від електричних режимів, які визначають потужність процесу і температуру ванни. Визначено критичний рівень тиску для сольових та фторидно-оксидних флюсів. Доведена можливість зменшення вмісту водню у титанових сплавах шляхом ведення переплаву в умовах вакууму.

Виходячи з результатів проведених досліджень, розроблено технологічні процеси камерного ЕШП високореакційних і прецизійних металів і сплавів з нестаціонарними режимами електричного живлення і електромагнітного впливу. Створено відповідне дослідно-промислове обладнання потужністю 724 кВт для виплавки зливків діаметром до 260 мм і довжиною до 900 мм. Отримані дослідні зразки і промислові партії зливків титанових сплавів, нікеліду титану, прецизійних сплавів типу 29НК, 50Н, 46Н, 49КФ, хрому, метал яких характеризується високою хімічною і структурною однорідністю.

Отримані у дисертаційній роботі результати є теоретичним узагальненням та

підгрунтям для вирішення важливої науково-технічної проблеми, що має народногосподарське значення, а саме – створення в Україні конкурентоспроможного виробництва високореакційних і прецизійних сплавів та імпортозаміщення виробів з них.

**Ключові слова:** електрошлаковий переплав (ЕШП), фізичне моделювання, титанові сплави, прецизійні сплави, нікелід титану, магнітне поле, нестационарне живлення, пошарове формування, розряди конденсаторів, зливки, кристалізація, макроструктура.

## ABSTRACT

Protokovilov I.V. **Electroslag remelting of high-reaction and precision metals and alloys with non-stationary modes of electric power supply and electromagnetic impact.** – Manuscript.

Thesis for the Doctor of Sciences degree on specialty 05.16.02 – «Metallurgy of ferrous and nonferrous metals and special alloys». – The E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2023.

The thesis is devoted to solving the problem of increasing the chemical and structural homogeneity of ingots of high-reaction and precision alloys during electroslag remelting (ESR). A complex of theoretical researches and experimental developments of the processes of melting, transfer and crystallization of metal during ESR in the conditions of non-stationary regimes of electric power supply and external electromagnetic influence has been carried out. New methods and technological solutions for controlling the processes of structure formation of ingots metal are proposed. They are based on conducting the electroslag process in a pulse mode, ensuring the layer-by-layer formation of the ingot, as well as on the pulse effect on the hydrodynamic state of the metal pool by electric and magnetic fields created with the use of discharges of capacitive electric energy storage devices. The developed methods of influencing the crystallization of ESR ingots make it possible to completely eliminate the formation of the columnar structure of the metal, ensure its refining and homogenization, making it similar to the structure of deformed metal

Investigations of the ESR process under rarefied pressure conditions were carried out. It is shown that the limiting factor for the realization of remelting in a vacuum is the boiling of the flux caused by the intense evaporation of volatile components, primarily – chlorides and fluorides. It was established that the flux boiling pressure during the ESR depends both on the composition of the flux and on the electrical modes that determine the thermal power of the process. The critical pressure level for salt and fluoride-oxide fluxes was determined. The possibility of reducing the content of hydrogen in titanium alloys by remelting in vacuum conditions has been proven.

Based on the results of the conducted research, the technological processes of the chamber ESR of high-reaction and precision alloys with non-stationary modes of electric power supply and electromagnetic impact have been developed. Appropriate pilot equipment with a capacity of 724 kW was created for melting ingots with a diameter of up to 260 mm and a length of up to 900 mm. Experimental samples and industrial batches of ingots of titanium alloys, titanium nickelide, precision alloys of type 29NK,

50N, 46N, 49KF and chromium, whose metal is characterized by high chemical and structural homogeneity, were obtained.

The results obtained in the dissertation are a theoretical generalization and a basis for solving an important scientific and technical problem of national economic importance, namely, the creation of competitive production of high-reaction and precision alloys in Ukraine and import substitution of the corresponding products.

**Key words:** electroslag remelting (ESR), physical modeling, titanium alloys, precision alloys, titanium nickelide, magnetic field, non-stationary power supply, layer-by-layer formation, capacitor discharges, ingot, crystallization, macrostructure.