

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

**ПОРОХОНЬКО**  
**Віталій Богданович**



УДК 669.187.56

**ЕЛЕКТРОШЛАКОВИЙ ПЕРЕПЛАВ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ПІД  
ДІЄЮ ЗОВНІШНІХ ПОЗДОВЖНІХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ**

Спеціальність 05.16.02

«Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів»

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

**Протоковілов Ігор Вікторович**

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, провідний науковий співробітник відділу плазмово-шлакової металургії

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Середенко Володимир Олексійович**

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, провідний науковий співробітник відділу магнітної гідродинаміки

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

Захист відбудеться «26» квітня 2021 р. об 10:00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.182.02, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: Україна, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: Україна, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

Автореферат розісланий « 17 » березня 2021 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради Д 26.182.02  
кандидат технічних наук

С. Г. Григоренко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Завдяки високій питомій міцності, корозійній стійкості, низькій густині і теплопровідності титан та сплави на його основі знаходять широке застосування в аерокосмічній, хімічній і суднобудівній галузях, в енергетичному та харчовому машинобудуванні, хімічній промисловості. Поширюється застосування титану при будівництві морських газо- і нафтовидобувних платформ та цивільному будівництві, в медицині та автомобілебудуванні.

Сьогодні найпоширенішим способом отримання зливок титанових сплавів є подвійний (інколи потрійний) вакуумно-дуговий переплав, стрімко розвивається технологія електронно-променевої плавки з проміжною ємністю. Крім того, для виплавки зливок титану застосовують плазмово-дуговий переплав, вакуумно-дугову гарнісажну плавку, індукційну плавку у вакуумі або аргоні, електрошлаковий переплав.

Кожен із цих способів виплавки титанових зливок має свої переваги і недоліки. Проте, проблема отримання хімічно однорідних зливок титанових сплавів із дрібнозернистою структурою, без дефектів ліквацийного характеру залишається однією з пріоритетних. Особливо актуальна вона при отриманні зливок багатокомпонентних, складнолегованих сплавів, чутливих до хімічної і структурної неоднорідності.

Електрошлаковий переплав (ЕШП) має ряд важливих технологічних особливостей, які зумовлюють перспективність його використання для виплавки зливок титану. Це розосереджене джерело тепловиділення, відсутність випаровування легуючих компонентів з високою пружністю пари, добре формування поверхонь зливок, щільна макроструктура металу, можливість рафінування і легування металу шлаком та ін. Проте, при ЕШП титанових сплавів основною проблемою залишається отримання зливок з високим рівнем хімічної і структурної однорідності.

Ефективним інструментом безконтактного силового впливу на металургійний розплав при ЕШП є магнітні поля. Їх застосування дає можливість впливати на плавлення витратного електроду, перенесення електродного металу і кристалізацію зливку. Проте, відомі методи електромагнітного впливу вимагають великих потужностей, а обладнання для їх реалізації громіздке, що є серйозною перешкодою на шляху їх практичного використання.

Проведений аналіз вказує на перспективність використання поздовжніх постійних і імпульсних магнітних полів для керування процесами плавлення та кристалізації металу при ЕШП. Їх застосування дозволяє активізувати гідродинамічний вплив на металургійну ванну при зменшенні масогабаритних характеристик магнітних систем.

Отже, актуальним завданням є визначення закономірностей процесів плавлення, перенесення та кристалізації металу при ЕШП в умовах дії постійних та імпульсних поздовжніх магнітних полів і розробка технічних рекомендацій щодо їх застосування при виплавці зливок титанових сплавів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України відповідно до планів науково-дослідних робіт, у яких автор брав безпосередню

участь як виконавець або керівник: № 38/4-П “Дослідження гідродинамічних та теплових механізмів впливу на кристалізацію металу зварних швів при електрошлаковому зварюванні (ЕШЗ) титану” (2013 р., № д/р 0113U002027); № 38,15/2-П “Дослідження в’язкості і електропровідності безкисневих сольових флюсів для електрошлакових процесів зварювання і переплаву титану” (2014 р., № д/р 0114U003147); № 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 р.- до тепер, № д/р 0118U100514).

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є визначення закономірностей процесів плавлення, перенесення та кристалізації металу при ЕШП в умовах дії постійних та імпульсних поздовжніх магнітних полів і розробка технічних рекомендацій щодо їх застосування при виплавці зливків титанових сплавів.

Для досягнення мети, поставленої в дисертаційній роботі, необхідно вирішити наступні **задачі**:

- розробити «холодну» фізичну модель для дослідження процесів плавлення витратного електроду і перенесення електродного металу при ЕШП в умовах дії зовнішніх поздовжніх магнітних полів;
- визначити закономірності впливу поздовжніх магнітних полів на особливості краплеутворення та перенесення металу при ЕШП;
- розробити лабораторне обладнання для проведення натурних експериментів з ЕШП титану під дією поздовжніх магнітних полів;
- дослідити технологічні особливості ЕШП титану під дією постійних та імпульсних поздовжніх магнітних полів та їх вплив на структуроутворення, хімічну однорідність та на механічні властивості отриманих зливків;
- визначити ефективні параметри електромагнітного впливу при ЕШП титанових сплавів та розробити технологічні рекомендації щодо процесу ЕШП під дією зовнішніх поздовжніх магнітних полів.

**Об'єкт дослідження** - ЕШП зливків титанових сплавів, отриманих під дією поздовжніх магнітних полів.

**Предмет досліджень** - закономірності процесів плавлення, перенесення та кристалізації металу при ЕШП під дією поздовжніх магнітних полів, хімічна і структурна однорідність зливків титанових сплавів.

**Методи досліджень.** Для вирішення поставлених задач і отримання основних результатів роботи використовували аналітичні та експериментальні методи досліджень. Дослідження металургійних процесів при ЕШП у магнітних полях здійснювали шляхом фізичного моделювання на моделі власної розробки, та шляхом натурних експериментів при виплавці титанових зливків на модернізованій електрошлаковій установці камерного типу. Дослідження в'язкості флюсів проводили на віскозиметрі ротаційного типу, а електропровідності - методом вимірювання активної компоненти падіння напруги на вольфрамових електродах, включених в мостову схему. Дослідження властивостей металу проводили із застосуванням стандартних методик металофізичних досліджень і методів механічних випробувань. Отримані експериментальні дані обробляли з використанням статистичних методів.

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

1. Вперше шляхом фізичного моделювання процесу ЕШП встановлено, що створені під дією поздовжнього магнітного поля горизонтальні обертання розплаву шлаковій ванни призводить до деформації її вільної поверхні та поверхні поділу *шлакова - металева* ванни. Величина деформації вільної поверхні ванни залежить від швидкості обертання розплаву і при 350...420 мм/с досягає 10...12 мм. Крім того, застосування поздовжнього магнітного поля індукцією 0,2...0,35 Тл призводить до збільшення частоти відриву крапель електродного металу (з 0,62 до 0,75...0,9 Гц), зменшення їх середньої маси (з 1,4 до 0,7...1,28 г), збільшення траєкторій їх руху (з 30 до 40...80 мм) і терміну перебування в шлаковій ванні (з 0,2...0,25 до 0,4...0,8 с), а також до розосередження місць попадання крапель на дзеркало рідкої металевої ванни.

2. Вперше експериментально встановлено, що застосування при ЕШП постійного поздовжнього магнітного поля призводить до зменшення струму плавки і збільшення амплітуди його коливань, без цілеспрямованої зміни інших параметрів процесу. У випадку застосування імпульсного поздовжнього магнітного поля, зменшення струму плавки має циклічний характер, а величина його падіння залежить від величини індукції і тривалості імпульсів магнітного поля і може сягати до 70...80%.

3. Вперше, шляхом натурних експериментів при ЕШП доведено, що під дією зовнішнього поздовжнього магнітного поля індукцією 0,2...0,28 Тл частота відриву крапель електродного металу збільшується на 18...62 %, а швидкість плавлення електроду - на 3...6 %. При цьому, середній діаметр крапель металу зменшуються на 5...16%, а їх маса на 13...41%.

4. Визначено ефективні параметри постійного та імпульсного поздовжнього магнітних полів, необхідні для забезпечення розорієнтації та подрібнення макроструктури зливків діаметром 70...140 мм. Для постійного поля такий діапазон індукції становить 0,12...0,22 Тл, а для імпульсного - 0,18...0,3 Тл при тривалості імпульсів 0,9...2,5 с, а пауз 6...15 с.

**Практичне значення отриманих результатів.** Модернізовано обладнання для камерного ЕШП під впливом поздовжніх магнітних полів. Розроблено технологічні рекомендації щодо обладнання, матеріалів, режимів ЕШП зливків титанових сплавів у поздовжніх магнітних полях. Отримано дослідні зразки зливків

титанових сплавів ВТ6, ТС6 та ОТ4, які характеризуються високими показниками хімічної та структурної однорідності, пластичності та ударної в'язкості.

Розроблено флюс для ЕШП титану, який забезпечує стабільний електрошлаковий процес з хорошим формуванням поверхні зливку, при зниженні питомих витрат електроенергії до 18,5%.

**Особистий внесок здобувача.** У дисертаційній роботі мета і задачі досліджень, формування наукових положень, узагальнення результатів – виконані автором особисто. Усі експериментальні дослідження проводились за участю автора. В публікаціях автору належить:

- планування та проведення експерименту, розробка технологічних режимів процесу ЕШП, обробка та аналіз результатів досліджень [1-3, 5, 6, 9, 13, 23,29];
- аналітичний підбір складу флюсів, підготовка, планування і проведення експериментів, обробка і аналіз експериментальних даних [10, 24, 25];
- аналіз і узагальнення літературних даних, участь в оформленні результатів дослідження [7, 12, 14-20, 29];
- розробка методики і обладнання для проведення експериментів, аналіз і узагальнення результатів фізичного моделювання [4, 8, 11, 21, 23];
- підготовка і проведення експериментальних досліджень та визначення оптимальних параметрів процесу [26, 28].

**Апробація результатів роботи.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались й обговорювались на: п'ятій всеукраїнській міжгалузевій науково-технічній конференції “Зварювання та споріднені технології”, 18-20 квітня 2012 р, Київ, Україна; всеукраїнській науково-практичній конференції “Зварювання та споріднені процеси і технології”, 4-8 вересня 2012 р, Миколаїв, Україна; науково-технічній конференції “Современные проблемы металлургии, технологии сварки и наплавки сталей и цветных металлов”, 25-26 жовтня 2012 р., Київ, Україна; VII науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів “Сварка и родственные технологии”, 22-24 травня 2013 р, Київ, Україна; міжнародній конференції Зварювання та споріднені технології”, 25-26 листопада 2013 р., Київ, Україна; конференції “Зварювання та споріднені процеси і технології” 14-16 травня 2014р., Київ, Україна; III всеукраїнській науково-технічній конференції “Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій”, 9–13 вересня 2014 р. м. Миколаїв, Україна; VIII міжнародній конференції молодих учених та спеціалістів “Зварювання та споріднені технології”, 20-22 травня 2015 р, Київ, Україна; 9-th International conference of young scientists on welding and related technologies, May 23-26, 2017, Kyiv, Ukraine; міжнародній конференції “Титан 2018: Производство и применение в Украине”, 2018 Київ, Україна; International Conference “Welding and related technologies – present and future”, 5-6 December, 2018, - Kyiv, Ukraine.

**Публікації.** По темі дисертаційної роботи опубліковано 29 публікацій, в тому числі 14 статей в спеціалізованих наукових виданнях, що внесені до переліку фахових видань України, 1 стаття внесена до реєстру міжнародних наукометричних баз [Scopus], 11 тез та доповідей в збірниках науково-технічних конференцій, 2 патенти на винахід України та 1 патент на корисну модель.

**Структура та об'єм роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатку. Загальний

об'єм роботи – 195 сторінок машинописного тексту, у тому числі 71 рисунок, 16 таблиць, список використаних джерел із 214 найменувань на 24 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і завдання досліджень, відзначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, подано інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію та публікації результатів роботи, наведено відомості про структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі розглянуто сучасні способи виплавки зливків титанових сплавів. Проаналізовано технологічні особливості, визначено переваги і недоліки процесу ЕШП титанову, розглянуто методи впливу на плавлення і кристалізацію електрошлакового металу. Показано перспективність застосування зовнішніх магнітних полів для керування структуроутворенням зливків титанових сплавів при ЕШП.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність та необхідність розробки нових методів впливу на кристалізацію зливків титанових сплавів при ЕШП з використанням поздовжніх постійних та імпульсних магнітних полів, визначено мету роботи і сформульовано основні задачі досліджень.

У другому розділі наведено опис методик, матеріалів та обладнання які використовувались в роботі для проведення експериментів і досліджень, необхідних для досягнення поставленої мети.

Процеси плавлення витратного електроду і крапельного перенесення металу при ЕШП під впливом зовнішніх поздовжніх магнітних полів досліджували шляхом фізичного моделювання. Для цього було розроблено «холодну» фізичну модель, яка базується на плавленні витратного електроду, виготовленого із сплаву Вуда, в оптично-прозорому електроліті на основі пересиченого розчину  $ZnCl_2$  за рахунок Джоулевого тепла, що виділяється в ньому при проходженні електричного струму (рис. 1).

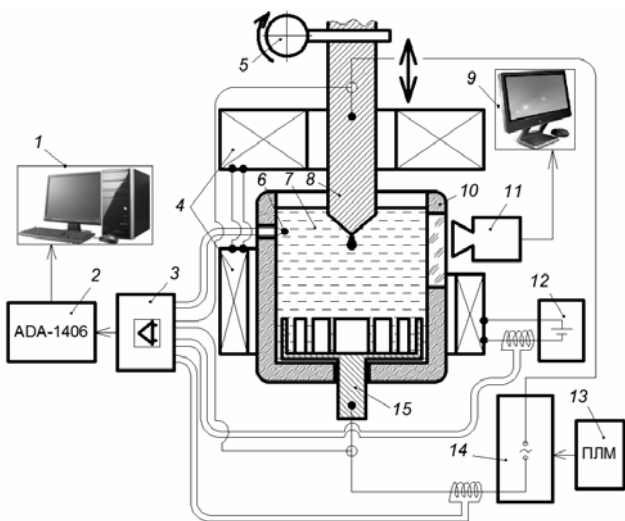


Рис. 1 – Схема експериментальної установки для моделювання плавлення витратного електроду при ЕШП: 1 – комп'ютер; 2 – аналого-цифровий перетворювач; 3 – перетворювач з гальванічною ізоляцією; 4 – електромагнітна система; 5 – механізм подачі електроду; 6 – термопара; 7 – електроліт; 8 – електрод; 9 – монітор; 10 – ємність з оптично-прозорого матеріалу; 11 – відеокамера; 12 – джерело живлення електромагнітної системи; 13 – програмований логічний модуль; 14 – джерело живлення моделі; 15 – донний струмопідвід.

Модель створена з дотриманням критерію геометричної подібності та з урахуванням критерію  $S = \mu_0 I^2 / \rho v^2$ , де  $\mu_0$  – магнітна проникність середовища,  $I$  – сила електричного струму,  $\rho$  – густина рідини,  $v$  – кінематична в'язкість рідини.

Критерій  $S$  характеризує співвідношення електромагнітної сили до сили в'язкості і є вирішальним при визначенні інтенсивності руху рідини, що збуджується електромагнітною силою. Для дослідження процесів краплеутворення і перенесення металу використовували високошвидкісну відеозйомку та метод осцилографування електричних режимів процесу.

Натурні експерименти з ЕШП титанових сплавів проводили на модернізованій установці для камерного електрошлакового переплаву. Установку було дообладнано електромагнітною системою, тиристорним блоком плавного регулювання електричної напруги плавки та діодним випрямлячем. Це дозволяло проводити експерименти в контрольованій атмосфері інертного газу на змінному та постійному струмах переплаву під впливом поздовжніх постійних та імпульсних магнітних полів.

Схема процесу ЕШП в магнітному полі наведена на рисунку 2. Його принципова відмінність від класичного ЕШП полягає в тому, що процеси плавлення, перенесення і кристалізації металу відбуваються під впливом зовнішнього поздовжнього магнітного поля, створеного соленоїдом, котрий охоплює кристалізатор.

Експерименти проводили при переплаві титанових сплавів марок BT1-0, Grade 4, BT6, TC6, OT4 тощо. Для переплаву використовували флюс марки АН-Т4 ( $\text{CaF}_2$  - 15%  $\text{SrCl}_2$ ), а також дослідні сольові флюси на основі  $\text{CaF}_2$  з додаванням  $\text{SrCl}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ . При проведенні експериментів випробовували різні режими електромагнітного впливу. Зокрема досліджували вплив магнітних полів на електричні режими електрошлакового процесу, особливості формування поверхні зливу і його макроструктуру.

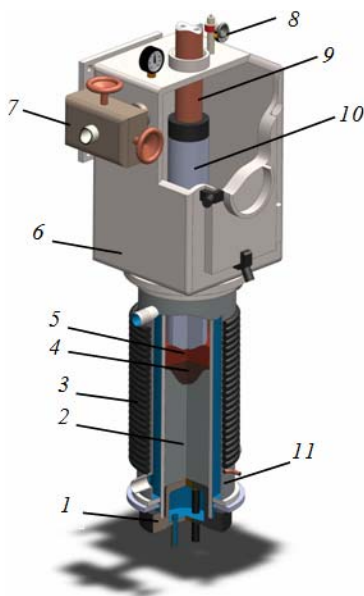


Рис. 2 – Схема процесу ЕШП в магнітному полі: 1 – піддон; 2 – зливоч; 3 – електромагнітна система (соленоїд); 4 – металева ванна; 5 – шлакова ванна; 6 – вакуумна камера; 7 – вакуумний затвор; 8 – запобіжний клапан; 9 – шток; 10 – витратний електрод; 11 – кристалізатор.

Дослідження вмісту елементів, структури та властивостей металу проводили за загальноприйнятими методиками газового, спектрального, хімічного аналізів, оптичної металографії, випробовуваннями на твердість, розтяг та ударну в'язкість при кімнатній температурі.

У другому розділі також наведено методики експериментальних досліджень фізичних властивостей сольових флюсів на основі  $\text{CaF}_2$ . Температурну залежність в'язкості флюсових композицій визначали за допомогою ротаційного віскозиметра. Високотемпературні дослідження електропровідності проводили шляхом вимірювання активної компоненти падіння напруги на вольфрамових електродах, занурених в розплав із застосуванням мостової схеми.

У другому розділі також наведено методики експериментальних досліджень фізичних властивостей сольових флюсів на основі  $\text{CaF}_2$ . Температурну залежність в'язкості флюсових композицій визначали за допомогою ротаційного віскозиметра. Високотемпературні дослідження електропровідності проводили шляхом вимірювання активної компоненти падіння напруги на вольфрамових електродах, занурених в розплав із застосуванням мостової схеми.



**Третій розділ** присвячений фізичному моделюванню процесу плавлення витратного електроду при ЕШП під впливом поздовжніх магнітних полів.

В експериментах з фізичного моделювання досліджували швидкість плавлення електродного металу, частоту відриву крапель і їх середню масу, структуру і інтенсивність гідродинамічних течій в шлаковій ванні, траєкторії переміщення крапель в ванні та інші параметри ЕШП.

Досліди проводили з використанням різних схем електричного живлення та електромагнітного впливу. Для плавлення витратного електроду використовували змінний електричний струм промислової частоти 50 Гц, постійний струм, а також модульований струм (амплітудно-фазову модуляцію струму). Магнітне поле використовували постійне та імпульсне.

Показано, що при відсутності зовнішнього магнітного поля в модельному розчині формуються тороїдальні течії, спрямовані вниз по осі ванни і вгору біля бокових стінок ємності. Максимальна швидкість таких течій становить біля 20 мм/с.

Використання зовнішнього поздовжнього магнітного поля призводить до трансформації тороїдальних течій в горизонтальні обертання навколо осі ванни. Механізм їх формування пов'язаний з взаємодією радіальної складової струму в електроліті з осьовою складовою зовнішнього магнітного поля, внаслідок чого формуються електромагнітні сили азимутального напрямку, які, призводять до обертання електроліту навколо осі ванни.

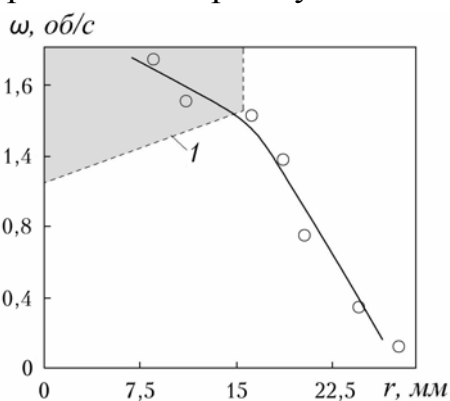


Рис. 3 – Залежність кутової швидкості обертання електроліту  $\omega$  від відстані  $r$  до осі ванни для  $B=0,32$  Тл,  $I_{ел}=12$  А,  $t_f=3$  с:  $I$  - контур витратного електроду.

Встановлено, що швидкість такого обертання - нерівномірна по радіусу ванни. Максимальна кутова швидкість зафіксована в прилеглих до витратного електроду зонах і плавно зменшується до мінімальних значень біля стінок ємності (рис. 3). Це пояснюється характером розподілу електричного струму у ванні, коли його щільність максимальна біля торця електроду, і мінімальна - біля стінок ванни.

Показано, що максимальна швидкість течій рідини суттєво залежить від параметрів зовнішнього магнітного поля і електричного струму в електроліті, проте у всіх випадках вона значно перевищує швидкість течій при відсутності зовнішнього електромагнітного впливу (рис. 4). При застосуванні постійного магнітного поля ( $B=0,2$  Тл) та змінного струму плавки ( $I_{ел}=12$  А) максимальна швидкість течій електроліту складала 80 мм/с. Інтенсивність вищезгаданих потоків частково збільшується (до 90 мм/с) в результаті використання постійного струму плавки ( $I_{ел}=12$  А). Застосування імпульсного магнітного поля індукцією до  $B=0,35$  Тл та змінного струму плавки ( $I_{ел}=12$  А), призводить до збільшення швидкості потоків електроліту до 100 мм/с. Найбільший гідродинамічний ефект виявлено в експериментах з використанням амплітудно-фазової модуляції струму плавки під час дії імпульсів магнітного поля. В даному випадку, максимальна швидкість обертання модельної рідини досягала 420 мм/с.

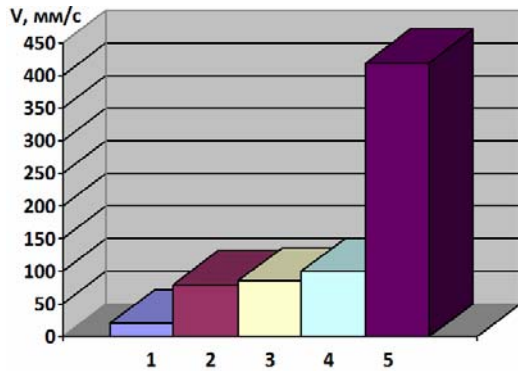


Рис. 4 – Максимальна швидкість руху електроліту при різних схемах моделювання: 1 - струм плавки змінний 12 А, магнітне поле відсутнє; 2 - струм плавки змінний 12 А, магнітне поле постійне 0,2 Тл; 3 - струм плавки постійний 12 А, магнітне поле постійне 0,2 Тл; 4 - струм плавки змінний 12 А, магнітне поле імпульсне 0,32 - 0,35 Тл; 5 - струм плавки модульований 12/35 А, магнітне поле імпульсне 0,35 Тл.

При цьому виявлено, що при застосуванні імпульсного магнітного поля, швидкість обертання модельної рідини залежить не тільки від індукції магнітного поля, але і від тривалості дії його імпульсів. Спочатку, при збільшенні тривалості імпульсів швидкість обертання рідини лінійно збільшується, а далі стабілізується на певному рівні (рис. 5).

В процесі фізичного моделювання було встановлено, що поздовжнє магнітне поле призводить до деформації вільної поверхні шлакової ванни (рис. 6). Це відбувається внаслідок дії відцентрових сил, утворених горизонтальним обертанням ванни навколо своєї осі. Величина деформації збільшується пропорційно збільшенню швидкості обертання електроліту і при 350...420 мм/с сягає 10...12 мм.

Виявлено, що деформація вільної поверхні ванни призводить до зменшення глибини занурення електроду в модельну рідину. Це обумовлює підвищення електроопору ділянки контуру витратний електрод - металева ванна і, відповідно, зниження струму плавки.

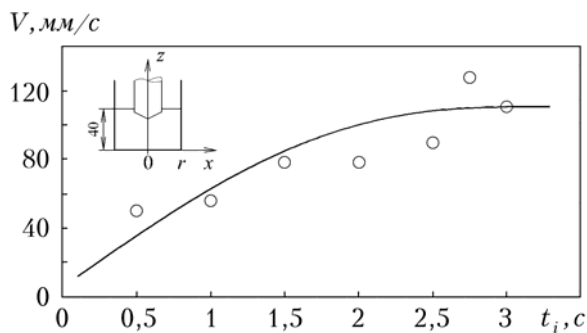


Рис. 5 – Залежність швидкості обертання електроліту від тривалості імпульсів магнітного поля:  $B=0,32$  Тл,  $I_{ел}=12$  А,  $x=0,5r$ ,  $z=25$  мм.

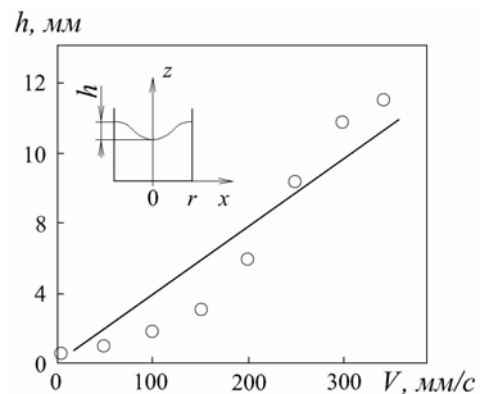


Рис. 6 – Залежність глибини деформації вільної поверхні електроліту  $h$  від максимальної швидкості його обертання  $V$ .

Показано, що гідродинамічні ефекти у шлаковій ванні впливають на процеси плавлення та крапельного перенесення електродного металу. В залежності від режимів, магнітне поле може призводити до відхилення, завихрення або до руйнування крапель.

Параметри крапельного перенесення, отримані при різних схемах проведення експериментів, наведені в таблиці 1. Встановлено, що застосування поздовжнього магнітного поля індукцією 0,2...0,35 Тл призводить до збільшення частоти відриву

крапель електродного металу з 0,62 Гц до 0,75...0,9 Гц і зменшення їх середньої маси з 1,4 г до 0,7...1,28 г.

Таблиця 1 – Параметри крапельного перенесення при різних схемах фізичного моделювання

Схема проведення експерименту	$V_{пе}, \text{мм/с}$	$V_{пл}, \text{г/с}$	$f, \text{Гц}$	$m, \text{г}$	$*D_k, \text{мм}$
Струм плавки змінний, МП відсутнє	0,05	0,87	0,62	1,4	6,5
Струм плавки змінний, МП постійне	0,055	0,96	0,75	1,28	6,3
Струм плавки постійний, МП постійне	0,05	0,85	0,9	1,1	5,4
Струм плавки змінний, МП імпульсне	0,05	0,75	0,8	1,22	6
Струм плавки модульований, МП імпульсне	0,06	1,0	0,8 (3,5)	0,7	3,5

\* форму краплі умовно прийнято за сферичну.

Виявлено, що відхилення і завихрення траєкторій руху крапель під дією магнітного поля призводить до розосередження місць їх потрапляння на дзеркало металеві ванни (рис. 7).

Показано, що в експериментах без електромагнітного впливу, більше 75% крапель попадає на дзеркало металеві ванни по осі електроду (рис. 7 а), а при використанні поздовжнього магнітного поля цей показник може зменшуватись до 45% (рис 7 з).

На рисунку 8 наведено траєкторії руху крапель при різних схемах моделювання та середні відстані, які вони долають у ванні. Отримані дані свідчать, що при відсутності магнітного поля краплі долають у ванні відстань, в середньому 30 мм. Під впливом магнітного поля, внаслідок інтенсивних гідродинамічних течій і завихрення траєкторій руху крапель відстань, яку долають краплі при проходженні через шлак може бути збільшена до 80 мм, тобто майже в 2,6 рази.

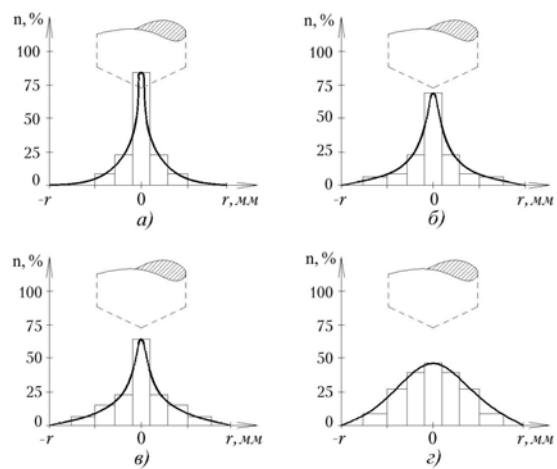


Рис. 7 – Розподілення місць падіння крапель на дзеркало металеві ванни: а - струм плавки змінний, МП відсутнє; б - струм плавки змінний, МП постійне; в - струм плавки змінний, МП імпульсне; з - струм плавки модульований, МП імпульсне.

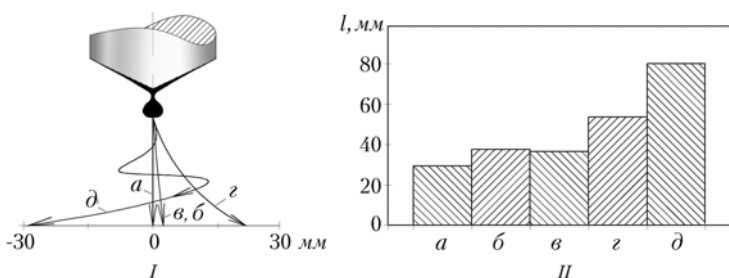


Рис. 8 – Схематичне зображення траєкторій руху крапель (I) та середні відстані  $l$  проходження крапель через шлак (II) при різних схемах моделювання: а – без МП; б – з постійним МП та змінним струмом плавки; в – з постійним МП та постійним струмом плавки; з – з імпульсним МП та змінним струмом плавки; д – з імпульсним МП і модуляцією струму плавки.

В свою чергу, це призводить до збільшення часу перебування крапель у розплаві (рис. 9). Так, краплі, які утворюються без використання магнітного поля, в середньому перебувають в розплаві електроліту протягом 0,2...0,25 с. Застосування поздовжнього магнітного поля, при тих самих інших умовах, забезпечує збільшення терміну перебування крапель в розплаві електроліту в середньому до 0,4...0,8 с.

Ще одним наслідком дії поздовжнього магнітного поля є збільшення площі геометричних поверхонь реагування, приведеної на одиницю часу (рис. 10). Отримані дані свідчать, що застосування магнітного поля може призводити до збільшення згаданого параметру з 81 мм<sup>2</sup>/с до 135 мм<sup>2</sup>/с.

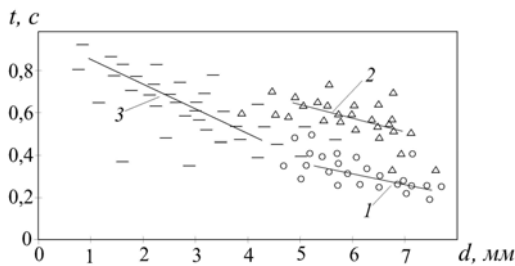


Рис. 9 – Залежність часу перебування крапель електродного металу в розплаві електроліту від їх середніх діаметрів при схемах переплаву: 1 – без МП 2 – з імпульсним впливом МП та змінним струмом плавки; 3 – з імпульсним впливом МП і модуляцією струму плавки.

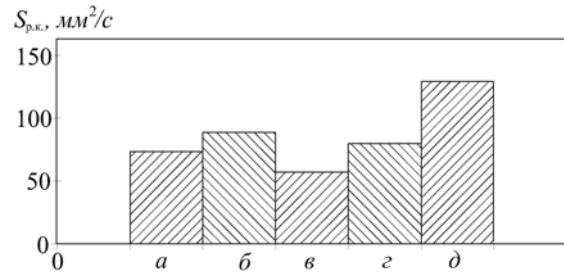


Рис. 10 – Площа геометричних поверхонь реагування на одиницю часу  $S_{p,к}$ , при різних схемах моделювання: а – без МП; б – з постійним МП та змінним струмом плавки; в – з постійним МП та постійним струмом плавки; г – з імпульсним МП та змінним струмом плавки; д – з імпульсним МП і модуляцією струму плавки.

Варто звернути увагу, що встановлені ефекти збільшення часу перебування крапель в шлаковій ванні та збільшення площі поверхні реагування є позитивним наслідком дії магнітного поля. В умовах ЕШП це повинно сприяти більш повній реалізації процесів хімічної взаємодії *шлак - метал* і видаленню із металу домішок і шкідливих включень.

Загалом, результати фізичного моделювання показали ефективність застосування зовнішнього поздовжнього магнітного поля для керування процесами плавлення електроду і крапельного перенесення його металу при ЕШП.

**У четвертому розділі** досліджено процеси плавлення витратного електроду, формування поверхні і структури титанових зливок при ЕШП під впливом поздовжніх магнітних полів.

Результати фізичного моделювання процесу крапельного перенесення під впливом поздовжніх магнітних полів були апробовані в натурних умовах ЕШП електродів зі сплаву ВТ1-0, діаметром 32 і 70 мм в кристалізаторах діаметром 66 і 105 мм, відповідно (табл. 2). Крапельне перенесення вивчали шляхом аналізу осцилограм струму плавки.

Встановлено, що застосування магнітного поля призводить до збільшення частоти відриву крапель в середньому на 18...62 %. При цьому, середній діаметр крапель електродного металу зменшується на 5...16%, а їх маса на 13...41%. Також спостерігається підвищення швидкості плавлення електроду на 3...6 %.

Таблиця 2 – Параметри крапельного перенесення при ЕШП титану в поздовжніх магнітних полях

Параметри	$d_{\text{ел.}}=32 \text{ мм}, d_{\text{кр.}}=66 \text{ мм}$			$d_{\text{ел.}}=70 \text{ мм}, d_{\text{кр.}}=105 \text{ мм}$	
	без МП	постійне МП	імпульсне МП	без МП	постійне МП
$f, \text{Гц}$	2,74	4,45	3,25	3,6	4,8
$m_{\text{крп.}}, \text{Г}$	1,5	0,96	1,3	1,78	1,04
$d_{\text{крп.}}, \text{мм}$	8,6	7,4	8,2	9,1	7,6
$V_{\text{п.е.}}, \text{г/с}$	4,04	4,27	4,16	3,8	3,95

Таким чином, було показано, що тенденції збільшення частоти відриву крапель електродного металу, зменшення їх маси і збільшення швидкості плавлення, під дією зовнішнього магнітного поля, отримані при фізичному моделюванні, збереглися і при натурних експериментах. Це свідчить про адекватність розробленої фізичної моделі.

Було встановлено, що поздовжнє магнітне поле впливає на електричні параметри ЕШП. Так, використання постійного зовнішнього магнітного поля індукцією  $B=0,2 \text{ Тл}$  призвело до зменшення струму плавки на величину до 20% та збільшення амплітуди його коливань до 15...18 %.

Використання імпульсного поздовжнього магнітного поля призводить до циклічної зміни струму плавки без цілеспрямованої зміни напруги та інших параметрів процесу. В момент дії імпульсу магнітного поля струм плавки різко зменшується на величину до 70...80 %, далі, протягом паузи він відновлюється до початкового рівня. Причому величина падіння струму плавки залежить як від індукції зовнішнього магнітного поля, так і від тривалості імпульсів його дії (рис. 11). Таке падіння струму плавки пояснюється періодичною деформацією вільної поверхні шлакової ванни і зменшенням глибини занурення електроду у шлак, і відповідно, періодичним збільшенням електроопору міжелектродного проміжку.

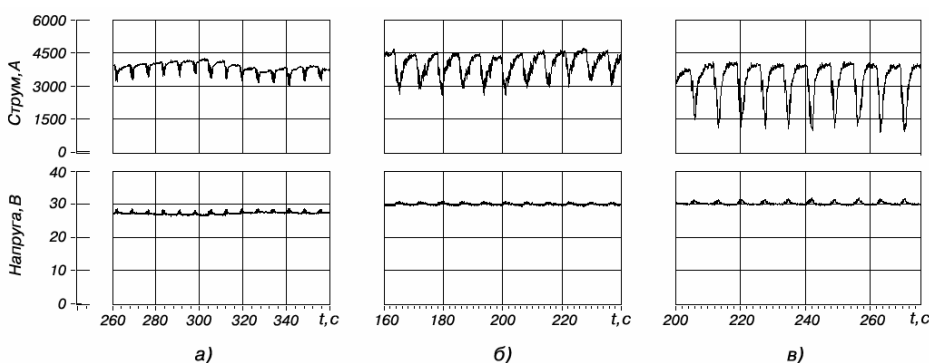


Рис. 11 – Фрагменти реєстрограм струму і напруги при ЕШП із використанням імпульсних магнітних полів:  
 а –  $B=0,1 \text{ Тл}, t_{\text{імп}}=0,8 \text{ с}$ ;  
 б –  $B=0,22 \text{ Тл}, t_{\text{імп}}=0,8 \text{ с}$ ;  
 в –  $B=0,22 \text{ Тл}, t_{\text{імп}}=1,8 \text{ с}$ .

Досліджено вплив зовнішніх поздовжніх магнітних полів на макроструктуру злиwkів ЕШП. Макроструктуру оцінювали на предмет наявності металургійних дефектів, досліджували особливості структуроутворення металу, форму та розміри кристалів і їх просторову орієнтацію. На рисунку 12 наведено типові макроструктури титанових злиwkів, які отримані без та з використанням магнітного поля, в таблиці 3 - їх характеристики.

Доведено, що поздовжні магнітні поля дозволяють суттєво впливати на характер структуроутворення і розмір кристалів. Макроструктури зливоків, отриманих під впливом поздовжнього магнітного поля (рис. 12, №2-4) кардинально відрізняються від макроструктури, отриманої без використання магнітного поля (рис. 12, №1).

Без магнітного поля метал зливку характеризується направленою структурою з великими стовпчастими кристалами, які перетинаються по осі зливку під кутом 80-90°, утворюючи зону зустрічної кристалізації. Середній розмір кристалів при цьому становить 40×3,5 мм.

Макроструктури зливоків, виплавлених із використанням магнітного поля характеризуються значним подрібненням, відсутністю центральної зони слабини, пор, шлакових включень та інших дефектів. При застосуванні імпульсного магнітного поля ( $B=0,24$  Тл,  $t_{\text{имп}}=2,0$  с,  $t_{\text{п}}=10$  с) середній розмір кристалів становить 2×1,7 мм, тобто наближається до розмірів структури деформованого металу (рис. 12 № 4).

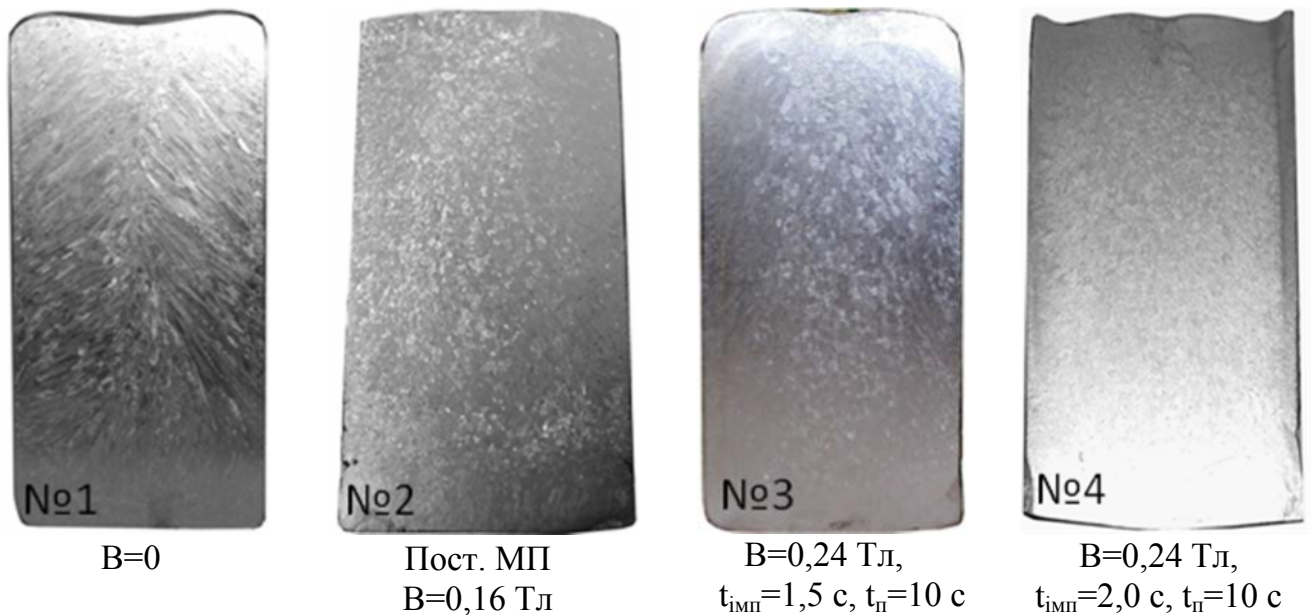


Рис. 12 - Типові макроструктури титанових зливоків, отриманих ЕШП, без використання магнітного поля

Таблиця 3 – Параметри магнітних полів та характеристики макроструктур отриманих зливоків

№ п/п	Параметри магнітного поля			Характеристики макроструктури зливоків			
	B, Тл	$t_{\text{имп}}$ , с	$t_{\text{п}}$ , с	розмір крист. a×b, мм	кут перетину, град	форма кристалів	наявність дефектів
1	-	-	-	40×3,5	80-90°	витягнута	нема
2	0,16	-	-	3×2	-	глобулярна	є
3	0,24	1,0	10	3,6×2,5	-	глобулярна	нема
4	0,24	2,0	10	2×1,7	-	глобулярна	нема

Експериментально встановлено, що поздовжнє магнітне поле може призводити до погіршення якості формування поверхонь зливків. Це відбувається за рахунок коливання і вібрацій розплавів шлакової і металевої ванн, періодичної зміни товщини і руйнування гарнісажної кірки на поверхні зливку, а також через розкидання крапель на стінки кристалізатору. Внаслідок цього, ступінь подрібнення макроструктури зливків, за допомогою дії магнітного поля, на певному етапі обмежується значним погіршенням їх зовнішньої поверхні.

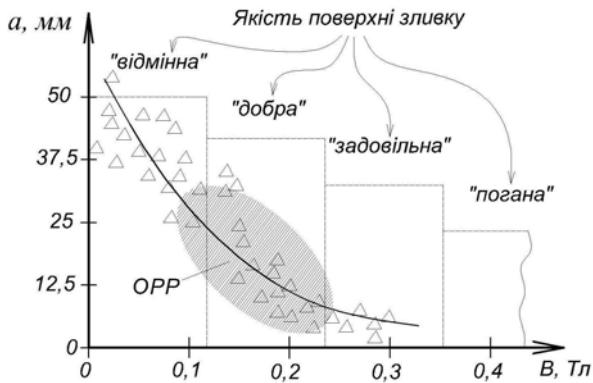
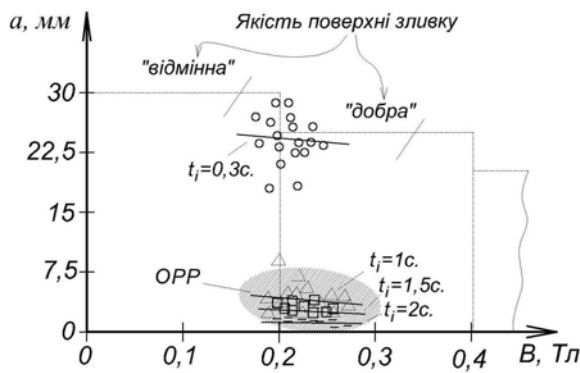
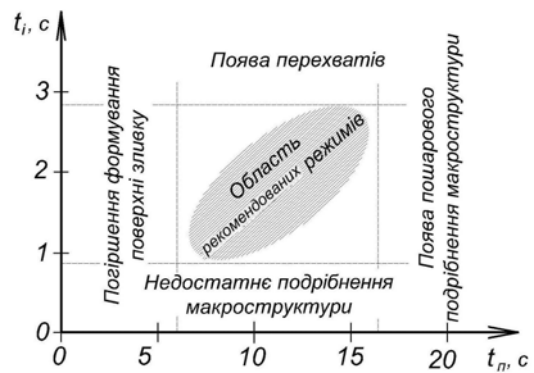


Рис. 13 – Область рекомендованих режимів впливу постійним МП при ЕШП титанових зливків:  $a$  – довжина дендритів;  $B$  – індукція магнітного поля; ОРР – область рекомендованих режимів

імпульсів ( $t_{\text{імп}}$ ) та пауз ( $t_n$ ) його дії (рис. 14 а). Теж саме стосується якості формування поверхні зливків (рис. 14 б).



а)



б)

Рис. 14 – Область рекомендованих режимів впливу імпульсним МП при ЕШП титанових зливків в залежності від індукції магнітного поля для  $t_n = 10$  с (а) і в залежності від тривалості імпульсів і пауз його дії для  $B = 0,18 \dots 0,3$  Тл (б) де:  $a$  – довжина дендритів;  $B$  – індукція магнітного поля; ОРР – область рекомендованих режимів.

У п'ятому розділі розроблено технологічні рекомендації щодо обладнання, матеріалів та режимів ЕШП титану під дією зовнішніх поздовжніх магнітних полів, наведено результати досліджень якості металу отриманих зливків.

Проведено дослідження щодо оптимізації складу флюсу для ЕШП титанових сплавів. Метою робіт було зменшення електропровідності сольового флюсу для ЕШП титану задля покращення теплового ККД процесу і зменшення витрат електроенергії. Досліджували подвійні і потрійні флюсові композиції на основі  $\text{CaF}_2$

з додаванням  $MgF_2$ ,  $SrCl_2$  та  $Na_3AlF_6$ . Встановлено, що додавання до  $CaF_2$  згаданих вище компонентів призводить до збільшення електроопору флюсової композиції, причому для кожної композиції існують концентраційні мінімуми електропровідності. На основі досліджень температурних залежностей електропровідності та експериментів в умовах натурального ЕШП титану було розроблено і запатентовано флюс системи  $CaF_2 - SrCl_2 - Na_3AlF_6$ , який забезпечує стабільний електрошлаковий процес з хорошим формуванням поверхні зливку, при зниженні, в середньому на 10...18 %, питомої витрати електроенергії, по відношенню до виплавки аналогічних зливок під флюсом 100%  $CaF_2$ .

Узагальнюючи результати досліджень було розроблено технологічні рекомендації щодо обладнання, матеріалів та режимів ЕШП зливок титанових сплавів діаметром 60...220 мм під дією зовнішніх поздовжніх магнітних полів.

Згідно розроблених технологічних рекомендацій було отримано зливки титанових сплавів ВТ6, ТС6 та ОТ4. Встановлено, що отримані сплави по хімічному складу повністю відповідають вимогам стандартів (табл. 4). По висоті та радіусу зливок легуючі елементи розподілені рівномірно, без ознак зональної ліквіації. Максимальне відхилення вмісту легуючих компонентів (Al, V, Cr) не перевищує 0,31 %, що свідчить про високу хімічну однорідність металу.

Табл. 4 – Хімічний склад титанових сплавів, отриманих способом ЕШП в магнітному полі

Сплав	Ti	Al	V	Mn	Mo	Cr	Si	O	N	H
ТС6	76,5	3,09	6,1	-	4,06	10,06	-	0,086	0,0045	0,00286
ОТ4	93,8	3,9	-	1,59	-	-	0,079	0,14	0,0079	0,00220
ВТ6	89,3	6,1	4,25	0,007	0,037	-	0,08	0,14	0,0096	0,00223

Результати механічних випробувань на розтяг і ударну в'язкість показали, що середні показники міцності сплавів ВТ6, ТС6, ОТ4, отриманих способом ЕШП в магнітному полі, відповідають типовим значенням для даних сплавів після проведення аналогічної термомеханічної обробки, а характеристики пластичності і ударної в'язкості перевищують їх в середньому на 10...25 % (табл. 5).

Табл. 5 – Механічні властивості титанових сплавів, отриманих способом ЕШП в магнітному полі

Сплав	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	$KCU_{20}$ , Дж/см <sup>2</sup>
ВТ6, (литий метал)	854,7	813,5	14,2	35	61,9
ВТ6 (пруток катаний, термооброблений)	971,4	929,9	16,9	44,1	38,7
ТС6 (пруток катаний, термооброблений)	1315,8	1248,3	12,7	28,2	28,6
ОТ4, (пруток катаний, термооброблений)	722	610	14,2	32,8	48,0

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено фізичну модель для дослідження процесів плавлення витратного електроду і крапельного перенесення металу при ЕШП в умовах дії зовнішніх магнітних полів. Шляхом фізичного моделювання встановлено:



- в процесі ЕШП у шлаковій ванні утворюються вихрові течії у вертикальній площині, які спрямовані вниз по осі ванни, і вгору, біля бокових стінок ємності. Під дією поздовжнього магнітного поля ці течії трансформуються в горизонтальні обертання навколо осі ванни;

- викликані дією зовнішнього поздовжнього магнітного поля обертання рідини навколо осі ванни призводять до деформації її вільної поверхні та поверхні поділу *шлакова - металева ванни*. Із збільшенням швидкості обертання величина деформації вільної поверхні ванни лінійно збільшується і при швидкості 350...420 мм/с сягає 10...12 мм;

- застосування поздовжнього магнітного поля індукцією 0,2...0,35 Тл призводить до збільшення частоти відриву крапель електродного металу з 0,62 Гц до 0,75...0,9 Гц і зменшення їх середньої маси з 1,4 г до 0,7...1,28 г;

- під дією поздовжнього магнітного поля траєкторії руху крапель в шлаковій ванні набувають спіралеподібної форми, що призводить до розосередження місць їх попадання на дзеркало рідкого металу. При цьому відстань, яку долають краплі в шлаковій ванні, збільшується з 30 до 40...80 мм, а термін перебування крапель в ванні – з 0,2...0,25 до 0,4...0,8 с;

2. Шляхом натурних експериментів встановлено, що під дією зовнішнього поздовжнього магнітного поля індукцією 0,2...0,28 Тл частота відриву крапель електродного металу збільшується на 18...62 %, а швидкість плавлення електроду на 3...6 %. При цьому, середній діаметр крапель металу зменшуються на 5...16%, а їх маса на 13...41%.

3. Встановлено, що застосування імпульсного магнітного поля призводить до циклічної зміни струму плавки. Зокрема, імпульсне магнітне поле ( $B=0,28$  Тл,  $t_{\text{имп}}=10$  с,  $t_n=40$  с) призводить до циклічного різкого падіння електричного струму на величину до 70...80% без цілеспрямованої зміни інших параметрів процесу. Протягом паузи дії магнітного поля струм плавки відновлюється до початкового рівня. Величина падіння електричного струму залежить від величини індукції і тривалості імпульсів магнітного поля.

4. Визначено ефективні величини індукції постійного та імпульсного поздовжнього магнітних полів, які забезпечують максимальну розорієнтацію та подрібнення макроструктури зливоків діаметром 70...140 мм при відсутності дефектів і збереженні якісного формування їх поверхні. Встановлено, що для постійного магнітного поля такий діапазон індукції становить  $B=0,12...0,22$  Тл, а для імпульсного -  $B=0,18...0,3$  Тл при тривалості імпульсів  $t_{\text{имп}}=0,9...2,5$  с, та пауз -  $t_n=6...15$  с.

5. Досліджено температурні залежності електропровідності, в'язкості та інтервалу твердіння сольових композицій на основі  $\text{CaF}_2$ . На їх основі розроблено та запатентовано сольовий, трикомпонентний флюс для ЕШП титану системи  $\text{CaF}_2 - \text{SrCl}_2 - \text{Na}_3\text{AlF}_6$ , який забезпечує стабільний електрошлаковий процес з хорошим формуванням поверхні зливу, при зниженні, в середньому на 10...18 %, питомої витрати електроенергії.

6. Способом ЕШП в поздовжньому магнітному полі отримано зливки титанових сплавів ВТ6, ТС6 та ОТ4. Встановлено, що хімічний склад сплавів повністю відповідає вимогам діючих стандартів. При цьому метал зливоків

характеризується високою хімічною і фізичною однорідністю. Характеристики міцності дослідних зразків відповідають типовим значенням для даних сплавів, а характеристики пластичності і ударної в'язкості перевищують в середньому на 10...25 %.

7. Розроблено технологічні рекомендації щодо обладнання, матеріалів та режимів ЕШП злиwkів титанових сплавів діаметром 60...220 мм під дією зовнішніх поздовжніх магнітних полів.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

- стаття внесена до реєстру міжнародних наукометричних баз [Scopus]:

1. I. Protokovilov. Effect of layer-by-layer formation of ingot during electroslag remelting on the quality of its surface and solidification structure / I. Protokovilov, V. Sharovalov, **V. Porokhonko** // Ironmaking & Steelmaking. 2020. <https://doi.org/10.1080/03019233.2020.1731255>.

- статті в спеціалізованих наукових виданнях України:

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

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

4. И.В. Протоковиллов. Физическое моделирование кристаллизации слитков в изложнице в условиях электрошлакового обогрева и подпитки / [И.В. Протоковиллов, **В.Б. Порохонько** Ф.К.Биктагирови и др..] // Современная электрометаллургия. – 2019. – №3. – С.3–9.

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

6. И.В. Протоковиллов. Особенности структурообразования прецизионного сплава 29НК при ЭШП с порционным формированием слитка / [И.В. Протоковиллов, Д.А. Петров, **В.Б. Порохонько**, О.Т. Назарчук] // Современная электрометаллургия. – 2019. – №1. – С.11–16.

7. И.В. Протоковиллов. Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа / [И.В. Протоковиллов, Д.А. Петров, **В.Б. Порохонько**, О.Т. Назарчук] // Современная электрометаллургия. – 2018. – №2. – С.45–51.

8. И.В. Протоковиллов. Физическое моделирование капельного переноса электродного металла при ЭШП с наложением импульсных магнитных полей / И.В. Протоковиллов, **В.Б. Порохонько** // Современная электрометаллургия. – 2017. – №3. – С.9–13.

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

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

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

12. И.В. Протокилов. Способы управления кристаллизацией металла слитков при ЭШП / И.В. Протокилов, **В.Б. Порохонько** // Современная электрометаллургия 2014 - №3 С. 7-16.

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

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

15. И.В. Протокилов. Особенности создания импульсных магнитных полей для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки / И.В. Протокилов, **В.Б. Порохонько**, Д.А. Петров // Современная электрометаллургия. 2013. – №3, С. 8-11.

*- патенти на винахід України та на корисну модель:*

16. І.В. Протоковілов. Спосіб електрошлакового переплаву / І.В. Протоковілов, **В.Б. Порохонько**, В.О.Шаповалов, О.Т. Назарчук // Патент України на винахід UA 119931 Заявл. 13.12.2017, опубл. 27.08.2019, бюл. № 16.

17. І.В. Протоковілов. Спосіб магнітокерованої електрошлакової плавки / І.В. Протоковілов, **В.Б. Порохонько** // Патент України на корисну модель UA 123715. Заявл. 26.07.2017, опубл. 12.03.2018, бюл. №5.

18. І.В. Протоковілов. Флюс для електрошлакового переплаву титанових сплавів / І.В. Протоковілов, **В.Б. Порохонько** // Патент України на винахід UA 110591 С2. Заявл. 24.02.2015, опубл. 12.01.2016, бюл. №1.

*- тези та матеріали доповідей науково-технічних конференцій:*

19. И.В. Протокилов. Управление формированием сварного соединения при электрошлаковой сварке титана / И.В. Протокилов, **В.Б. Порохонько** // Титан 2018. Производство и применение в Украине. Сб. докл. межд. конф. Под. ред. проф. С.В. Ахонина. - Киев, 2018. - С. 134-136.

20. И.В. Протокилов. Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа / [И.В. Протокилов, Д.А. Петров, **В.Б. Порохонько**, О.Т. Назарчук] // Титан 2018. Производство и применение в Украине. Сб. докл. межд. конф. Под. ред. проф. С.В. Ахонина. - Киев, 2018. - С. 128-133.

21. I. Protokovilov. Physical modelling of the drop metal transfer in ESR under effect of longitudinal magnetic field / I. Protokovilov, **V. Porokhonko** // Welding and related technologies – present and future. - International Conference.- 5-6 December, 2018, - Kyiv. P.128.

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

23. І. В. Протоковілов. Фізичне моделювання плавлення витратного електроду при ЕШП в умовах дії зовнішнього магнітного поля / І.В. Протоковілов, **В.Б. Порохонько** // Матеріали III всеукраїнської науково-технічної конференції «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій» та «Зварювання та споріднені процеси і технології» 9 – 13 вересня 2014 р. Миколаїв С. 94-96.

24. **В.Б. Порохонько**. Дослідження в'язкості і електропровідності флюсових композицій для ЕШП титану / [В.Б. Порохонько, А.М. Дученко, І.О. Гончаров, Д.Д. Міщенко] // Матеріали III всеукраїнської науково-технічної конференції «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій» та «Зварювання та споріднені процеси і технології» 9 – 13 вересня 2014 р. м. Миколаїв С. 91-94.

25. **В.Б. Порохонько**. Дослідження сольового флюсу на основі  $\text{CaF}_2$  для електрошлакового переплаву титану / **В.Б. Порохонько**, А.М. Дученко, І.О. Гончаров // Матеріали конференції «Зварювання та споріднені процеси і технології» 14-16 травня 2014р., Київ. С. 10.

26. І.В. Протоковілов. Особенности электрошлаковой сварки титана с использованием электромагнитных методов воздействия / І.В. Протоковілов, **В.Б. Порохонько**, Д.А. Петров // Вісник НУК імені адмірала Макарова – 2012. – №5. – С.170-176. [електронне видання].

27. І.В. Протоковілов. Дослідження технологічних особливостей виплавки гамма - алюмінідів титану методом МЕР / І.В. Протоковілов, **В.Б. Порохонько**, Д.А. Петров // Материалы VII. науч. техн. конф. молодых ученых и специалистов “Сварка и родственные технологии”, 22-24 мая 2013 г, Киев. - С.145.

28. І.В. Протоковілов. Электрошлаковая сварка титановых сплавов с импульсным электромагнитным воздействием / І.В. Протоковілов, О.Т. Назарчук, **В.Б. Порохонько** // Збірник тез доповідей міжнародної конференції «Зварювання та споріднені технології», 25-26 листопада 2013 р., Київ, С.146.

29. І.В. Протоковілов. Технологические особенности использования электромагнитных методов воздействия на процесс ЭШС титана / І.В.Протоковілов, **В.Б. Порохонько**, Д.А. Петров // Тез. докл. науч.-техн. конф. «Современные проблемы металлургии, технологии сварки и наплавки сталей и цветных металлов», 25-26 октября 2012 г., Киев – С. 49.

## АНОТАЦІЯ

**Порохонько В.Б. Электрошлаковый переплав титановых сплавів під дією зовнішніх поздовжніх магнітних полів.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів» (013 – Механічна інженерія). Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена визначенню закономірностей процесів плавлення, перенесення та кристалізації металу при ЕШП в умовах дії зовнішніх,

постійних та імпульсних поздовжніх магнітних полів і розробці технічних рекомендацій щодо їх застосування при виплавці зливків титанових сплавів.

Шляхом фізичного моделювання досліджено особливості плавлення витратного електроду, характеру формування і відриву крапель електродного металу та їх рух в шлаковій ванні при ЕШП в умовах дії зовнішніх магнітних полів. Експерименти проводили за різними схемами із застосуванням змінного, постійного і модульованого струму плавки під дією зовнішнього постійного або імпульсного поздовжнього магнітного поля.

В результаті проведених експериментів встановлено, що під дією поздовжнього магнітного поля тороїдальні гідродинамічні течії в шлаковій ванні трансформуються в горизонтальні обертання навколо її осі, що призводить до деформації вільної поверхні шлакової ванни та поверхні поділу *шлакова - металева ванни*. Величина деформації вільної поверхні ванни залежить від швидкості обертання розплаву.

Фізичним моделюванням встановлено ряд закономірностей. Зокрема, застосування поздовжнього магнітного поля індукцією 0,2...0,35 Тл призводить до збільшення частоти відриву крапель електродного металу (на 20...30%), зменшення їх середньої маси (на 10...50%), збільшення траєкторій їх руху (на 30...160%) і терміну перебування в шлаковій ванні (з 0,2...0,25 до 0,4...0,8 с), а також до розосередження місць попадання крапель на дзеркало рідкої металевої ванни.

Основні результати фізичного моделювання були апробовані в умовах натурального ЕШП титану на модернізованому обладнанні під дією поздовжніх магнітних полів. Експериментально встановлено, що поздовжнє магнітне поле індукцією 0,2 Тл призводить до зменшення струму плавки (на величину до 20 %) і збільшення амплітуди його коливань, без цілеспрямованої зміни інших параметрів процесу. У випадку застосування імпульсного поздовжнього магнітного поля зменшення струму плавки має циклічний характер, а величина цього падіння залежить від величини індукції і тривалості імпульсів магнітного поля і може сягати до 70...80%.

За допомогою аналізу осцилограм електричних режимів ЕШП під дією зовнішнього поздовжнього магнітного поля індукцією 0,2...0,28 Тл встановлено, що частота відриву крапель електродного металу збільшується на 18...62 %, а швидкість плавлення електроду - на 3...6 %. При цьому, середній діаметр крапель металу зменшується на 5...16%, а їх маса на 13...41%.

Експериментально встановлено, що поздовжні магнітні поля при ЕШП призводять до суттєвого подрібнення макроструктури титанових зливків, при одночасному погіршенні якості формування їх бокової поверхні. Визначено оптимальні величини індукції постійного та імпульсного поздовжнього магнітних полів, які забезпечують максимальну розорієнтацію та подрібнення макроструктури зливків діаметром 70...140 мм, при мінімальному погіршенні якості їх бокових поверхонь та відсутності внутрішніх дефектів. Встановлено, що для постійного магнітного поля такий діапазон індукції становить  $B=0,12...0,22$  Тл, а для імпульсного -  $B=0,18...0,3$  Тл при тривалості імпульсів  $t_{imn}=0,9...2,5$  с, та пауз -  $t_n = 6...15$  с.

Досліджено температурні залежності електропровідності, в'язкості та інтервалу твердіння сольових композицій на основі  $\text{CaF}_2$ . На їх основі розроблено сольовий, трикомпонентний флюс для ЕШП титану системи  $\text{CaF}_2 - \text{SrCl}_2 - \text{Na}_3\text{AlF}_6$ .

Розроблено технологічні рекомендації щодо обладнання, матеріалів, режимів ЕШП злиwkів титанових сплавів у поздовжніх магнітних полях.

Способом ЕШП в поздовжньому магнітному полі отримано зливки титанових сплавів ВТ6, ТС6 та ОТ4. Встановлено, що хімічний склад сплавів повністю відповідає вимогам діючих стандартів. При цьому метал злиwkів характеризується високою хімічною і фізичною однорідністю. Характеристики міцності дослідних зразків відповідають типовим значенням для даних сплавів, а характеристики пластичності і ударної в'язкості перевищують в середньому на 10...25 %.

**Ключові слова:** електрошлаковий переплав (ЕШП), магнітне поле, титанові сплави, фізичне моделювання, витратний електрод, плавлення, шлакова ванна, гідродинамічні течії, крапля, макроструктура, сольовий флюс.

## ABSTRACT

**Porokhonko V.B. Electroslag remelting of titanium alloys under influence of external longitudinal magnetic fields. - Manuscript.**

The thesis for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences in specialty – 05.16.02 “Metallurgy of ferrous and nonferrous metals and special alloys” (013 – Mechanical Engineering). – E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

Dissertation is devoted to determination of regularities of processes of metal melting, transferring and crystallization at ESR in conditions of effect of external constant and impulse longitudinal magnetic fields and development of technical recommendations on their application for melting of titanium alloys.

The peculiarities of melting of the consumable electrode, the nature of formation and detachment of electrode metal droplets and their movement in the slag pool at ESR under the conditions of external magnetic fields are investigated by mean of physical modeling. The experiments were carried out according to different schemes using alternating, direct and modulated melting current under the action of an external constant or pulsed longitudinal magnetic field.

As a result of these experiments it was found that under the influence of a longitudinal magnetic field torroidal hydrodynamic flows in the slag pool are transformed into horizontal rotation around its axis, which leads to deformation of the free surface of the slag pool and the interface *slag-metal pools*. The amount of deformation of the pool free surface depends on the speed of its rotation.

By means of the physical modeling a number of laws was established. In particular, use of longitudinal magnetic field induction of 0.2...0.35 Tesla leads to a decrease in the frequency of detachment of electrode metal (by 20...30%), a decrease in their average weight (up to 10...50%), an increase in their trajectories of movement (up to 30...160%) and the period of passing through slag pool (from 0,2...0,25 to 0,4... 0,8 s), as well as to the dispersal of places where they fall on the mirror of the liquid metal pool.

The main results of physical modeling were tested in the conditions of real ESR on the modernized equipment for melting under the action of longitudinal magnetic fields. It

was experimentally established that the longitudinal magnetic field induction of 0.2 Tesla leads to a decrease in the melting current (by up to 20%) and an increase in the amplitude of its oscillations, without direct change in other parameters of the process. If an impulse magnetic field is used, the reduction of the melting current has a cyclic nature, and the value of its reduction depends on the induction and the duration of its impulses and can be up to 70...80%.

By means of analysis of the electric modes of the ESR under the influence of an external longitudinal magnetic field induction of 0,2...0,28 Tesla it was established that the frequency of the electrode metal droplet detachment increases by 18...62 %, and the electrode melting rate - by 3...6 %. At the same time, the average diameter of metal droplets decreases by 5...16%, and their mass by 13...41%.

It was been experimentally established that the longitudinal magnetic fields at ESR lead to essential refinement of macrostructure of titanium ingots with simultaneous deterioration of the quality of their lateral surface. The optimum values of induction of direct and impulse longitudinal magnetic fields, which ensure the maximum disorientation and macrostructure refinement of ingots of diameter 70...140 mm with minimal deterioration in the quality of their surface and the absence of internal defects. It was found that for the direct magnetic field such induction range is  $B=0,12...0,22$  Tesla, and for the pulse one -  $B=0,18...0,3$  Tesla with the duration of pulses  $t_{imp}=0,9...2,5$  s, and pauses -  $t_p = 6...15$  s.

The temperature dependence of electrical conductivity, viscosity and solidification interval of salt compositions based on  $CaF_2$  was investigated. On their basis the salt, three-component flux of  $CaF_2 - SrCl_2 - Na_3AlF_6$  system for ESR of titanium was developed.

Technological recommendations on equipment, materials, regimes for ESR of ingots of titanium alloys in longitudinal magnetic fields were developed.

The pilot ingots of titanium alloys VT-6, TS6 and OT-4 were obtained by ESR method in the external magnetic field. It was found that the chemical composition of alloys fully meets the requirements of current standards. The ingot metal is characterized by high chemical and physical homogeneity. The characteristics of the strength of the test samples correspond to the typical values for these alloys, and the characteristics of ductility and impact elasticity exceed on average by 10...25%.

**Key words:** electroslag remelting (ESR), magnetic field, titanium alloys, physical modeling, consumable electrode, melting, slag pool, hydrodynamic flows, drop, macrostructure, salt flux.