

ВХ № 593  
07 04 2024

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

### **ПОРОХОНЬКА ВІТАЛІЯ БОГДАНОВИЧА**

на тему: «**ЕЛЕКТРОШЛАКОВИЙ ПЕРЕПЛАВ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ПІД ДІЄЮ ЗОВНІШНІХ ПОЗДОВЖНІХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ**», представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів

**Актуальність обраної теми дисертації та відповідність спеціальності 05.16.02 – металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.**

Одним з основних напрямків розвитку сучасних технологій спеціальної електрометалургії є розроблення теорії і технологій, створення та вдосконалення металургійного обладнання, зокрема, на основі використання комплексу зовнішніх впливів та ефективності керування металургійного процесу отримання високоякісної металопродукції при економному застосуванні електричної енергії.

Титан та його сплави завдяки ряду виключно високих властивостей (жаростійкість, жароміцність, корозійна стійкість, густина, міцність, пластичність, біологічна сумісність) масово застосовуються при виготовленні сучасної техніки (літако- та ракетобудуванні, суднобудуванні та інших галузях машинобудування), а також в різних виробництвах (металургійному, ливарному, хімічному, енергетичному, харчовому, медичному).

Україна входить в коло металургійних держав здатних поставляти на світовий і внутрішній ринки якісну та конкурентоспроможну продукцію. Виробництво в країні зливків тугоплавкого титану і сплавів на його основі реалізується здебільшого способом спеціальної електрометалургії. До основних проблем отримання таких зливків відносяться забезпечення дрібнозернистої бездефектної структури металу та його високої хімічної однорідності при низькому вмісту газів.

В зв'язку з цим, розвиток сучасних технологічних процесів спеціальної електрометалургії та їх теорії для підвищення якості зливків титану є актуальним завданням. Особливо актуальне це при отриманні зливків спеціальних титанових сплавів, в тому числі, складнолегованих та високоентропійних.

В паспорті спеціальності 05.16.02 в формулі значиться розробка теорії виробництва спеціальних сплавів з використанням висококонцентрованих джерел енергії та контрольованих середовищ, а в напрямках досліджень – теорія виробництва спеціальних сплавів в електропечах і агрегатах з використанням спеціальної електрометалургії, фізичне моделювання металургійних процесів, тепло- та масообмін і гідродинаміка в металургійних агрегатах. Дисертація Порохонька В. П. присвячена вирішенню питань з розвитку теорії на основі визначення закономірностей процесів плавлення, перенесення та кристалізації металу при електрошлаковому переплаві спеціальних титанових сплавів і містить теоретичні наукові результати. Ця наукова праця спрямована на розробку теорії виробництва титану і спеціальних сплавів на його основі з застосуванням електричного струму високої щільності та магнітних полів, зокрема, імпульсних, сконцентрованих у найважливіших зонах плавлення титанового сплаву, переведення його в крапельний стан в рідкому рафінуючому сольовому середовищі (шлаку), та охолодження і кристалізації металу без доступу кисню в умовах інтенсивної тепловіддачі. В зв'язку з цим обрана тема дисертації є актуальною для сучасного стану металургійного комплексу України, як складова наукового фундаменту для створення проривних технологій.



Тому, дисертаційна робота В. Б. Порохонька, присвячена розвитку теорії електрошлакового переплаву (ЕШП) титанових сплавів під дією зовнішніх поздовжніх магнітних полів, в якій поставлені завдання визначення закономірностей процесів плавлення, перенесення та кристалізації металу під зовнішніми електромагнітним впливами і розробки технологічних рекомендацій щодо цього металургійного процесу є актуальною і повною мірою відповідає паспорту спеціальності 05.16.02 - металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.

Обрана тема дисертації відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки та техніки в галузі спеціальної електрометалургії, дисертаційна робота виконувалась відповідно до планів науково-дослідних тем в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, у шести з яких автор брав участь в якості виконавця або керівника.

**Ступінь обґрунтованості та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

Усі розділи дисертаційної роботи загалом завершують взаємопов'язані, аргументовані та логічні висновки. Дисертант досліджував вельми складний фізичний об'єкт в якому одночасно протікали два фазових переходи (твердий стан – рідкий та рідкий - твердий) у системі «твердий витратний металевий електрод – рідка плівка металу на частині електроду, зануреній в розплавлений шлак», а також в зоні стику твердої металевій стінки кристалізатора, рідкого шлаку, розплавленого металу і металу, що твердне. Також в об'єкті контактували дві високотемпературні рідини, що не змішуються, - шлакова та металева, а металева переходила з форми плівки у крапельну. При цьому рідкий метал у стані плівки одночасно контактував з твердим металом електроду та рідким шлаком, а після відриву від плівки краплі мали контакт лише зі шлаком і згодом входили з певною швидкістю у поверхню рідкометалевого середовища в кристалізаторі. Вказані процеси проходили при значних термічних градієнтах на границях рідких та твердих поверхонь. На ці фізичні середовища, що знаходились у різних локальних теплових та гідродинамічних умовах, накладались високі енергетичні потоки електричного та магнітного полів. Ці поля мали в дослідженнях як постійний, так і змінний характер (синусоїдальний і амплітудно-фазовий модульований), а також чималі градієнти в об'ємі всього фізичного об'єкта.

Як встановив автор дисертації, на поверхні плівки метала, що була занурена у шлак, вільній поверхні шлакової рідини, а також на поверхні рідкого металу в кристалізаторі виникали збурення. Їх можна кваліфікувати як несталості визначених типів. Несталість поверхонь шлаку і плівки відповідає типу несталості Кельвіна – Гельмгольца, а при виникненні крапель з плівки на вісі кінцевого виступу витратного електроду та при їх зануренні у рідкий метал в кристалізаторі, як несталості типу Релея – Тейлора. При цьому у фізичному об'єкті діяли сили тяжіння, Архімеда, інерційна, в'язкого тертя, поверхневого та міжфазного натягу, електромагнітна. При чому в залежності від неоднорідностей середовища вони по-різному проявляли свою дію. Ця дія супроводжувалась електротермічними, електродинамічними, магнітогідродинамічними, а також комплексними термоелектромагнітогідродинамічними явищами, а також ефектами Зеебека, Томпсона, Пельт'є, скін-ефектом та ін.. Для цих ефектів та явищ характерна градієнтність та локальність, пов'язана з неоднорідностями середовищ різного масштабу. Зокрема, несталість міжфазної поверхні розплавленого шару витратних електродів може виникати як від швидкісної компоненти обтікаючої шлакової рідини (несталість Кельвіна – Гельмгольца), так і термічно неоднорідної дії електроструму на заглибленому в шлак конусному торцю електроду (несталість Марангоні I типу).

Незважаючи на такий набір діючих факторів в дуже неоднорідному фізичному середовищі, дисертант успішно встановив і дослідив ряд нових характеристик і закономірнос-



тей металургійного процесу при дії зовнішніх поздовжніх потужних електромагнітних полів при електрошлаковому перепау титану і спеціальних титанових сплавів. Це стало основою положень наукової новизни і показало здібності дисертанта як вченого. До наукових досягнень автора слід віднести ґрунтовне визначення температурно-концентраційних залежностей електропровідності, в'язкості та температурного інтервалу твердіння сольових композицій в якості шлаку (флюсу), для використання в процесі електрошлакового перепау та існування концентраційних мінімумів електропровідності, які забезпечують сталий процес з якісним формуванням поверхні металевих зливків.

Аналіз змісту дисертації та її автореферату показав, що вони містять теоретичні наукові результати, а наукові положення, висновки і рекомендації, викладені в роботі цілком обґрунтовані.

У першому розділі дисертації досить повно проаналізовано науково-технічну літературу і патенти за темою роботи. Критично розглянуті особливості традиційного способу електрометалургії – електрошлакового перепау, що характерні для його сучасного стану. Обґрунтовано потреби в розробці нових засобів впливу на плавлення та кристалізацію зливків сплавів титану, особливо складнолегованих. Показано перспективу залучення магнітних полів до процесу електрошлакового перепау титану та спеціальних сплавів на його основі. Визначені доцільність використання поздовжніх постійних та імпульсних магнітних полів в процесі електрошлакового перепау, мета і задачі дослідження.

У другому розділі ґрунтовно охарактеризовані методики і обладнання, використані під час дослідження процесу електрошлакового перепау титану та його сплавів під дією зовнішніх поздовжніх магнітних полів. Цілком фахово вибрано метод фізичного моделювання досліджуваного перепавного процесу спецелектрометалургії. Враховано аспекти його складності, зокрема, речовини корпусу моделі і рідина, що моделює шлак, вибрані прозорими, з можливістю витримувати підвищення температури та особливості електролізу, а для реалізації найбільш ретельного вивчення особливостей фізичних процесів використано високошвидкісну відеозйомку та метод осцилографування електричних режимів досліджуваного об'єкту. Експериментальні дослідження фізичних властивостей сольових флюсів на основі  $\text{CaF}_2$  проведено ротаційним віскозиметром, а електропровідність визначалась вольтамперним методом.

Для проведення натурних експериментів модернізовано установку для камерного електрошлакового перепау з дообладнанням джерелами магнітного поля, сучасними блоками плавного регулювання електричної напруги та отримання постійного електричного струму. Це обладнання забезпечило виконання досліджень в контрольованій атмосфері інертного газу на змінному і постійному електричному струмі в процесі перепау витратних електродів під дією поздовжніх постійних та імпульсних магнітних полів. Ресстрація параметрів плавки і електромагнітного впливу та їх обробка здійснювалась за допомогою сучасних аналого-цифрових перетворювачів з програмним забезпеченням. Використано сплави різних складів (BT6, TC6, OT4). Властивості металу досліджувались за стандартними методиками (металографічними та механічних випробувань). Хімічний аналіз проведено на сучасному обладнанні.

У третьому розділі дисертації детально проаналізовані фактори, що впливають на плавлення витратного електроду, краплеутворення та перенос крапель через рідке шлакове середовище у металеве в кристалізаторі. На цій основі дисертантом розроблено оригінальну фізичну модель для дослідження металургійних процесів при електрошлаковому перепау у магнітних полях. Завдяки моделюванню встановлено ряд кардинальних та суттєвих відмінностей від традиційного процесу перепау, що привнесли магнітні поля та визначено чимало нових залежностей. При цьому автор надав цілком коректні пояснення



зафіксованим змінам. До найважливіших результатів моделювання належить: 1) кардинальна зміна тороїдальних течій шлаку, спрямованих вниз по осі шлакової ванни і вгору біля її стінок на горизонтальне обертання рідкого шлаку навколо осі ванни і електромагнітний механізм формування цих течій; 2) встановлення залежності кутової швидкості обертання шлаку від відстані до осі ванни, а також максимальної швидкості рідкого шлаку від параметрів зовнішнього магнітного поля і електричного струму в шлаку; 3) визначення режиму, що призводить до найбільшого (у 8 разів) зростання швидкості шлакової рідини; 4) залежність ступеня зниження рівня вільної поверхні шлаку біля витратного електроду від максимальної швидкості обертання шлакової рідини, що призводить до змін електричного струму плавки; 5) встановлено вплив течій, ініційованих схрещенням електричного і магнітного полів на характер відхилення траєкторій крапель порівняно з виникаючими при відсутності дії зовнішнього магнітного поля, а також завихрення і руйнування крапель металу з витратного електроду; 6) визначено ступінь розосередження місць потрапляння крапель на поверхню рідкого металу в кристалізаторі під дією струму плавки і магнітних полів різних видів, а також відповідно часу перебування крапель в рідкому шлаку; 7) залежність сумарної площі міжфазної поверхні крапель на одиницю часу при різних схемах організації електромагнітного впливу, збільшення якої сприяє більш повній реалізації хімічної взаємодії шлаку і металу та рафінуванню металевої рідини.

Отримані результати обґрунтували напрямки застосування поздовжніх магнітних полів для ефективного керування металургійними процесами електрошлакового переплаву.

У четвертому розділі адекватність розробленої дисертантом фізичної моделі була переконливо доведена результатами дослідів процесів плавлення витратного електроду, краплеутворення, формування поверхні і структури зливків титанових сплавів при електрошлаковому переплаві під впливом поздовжніх постійного та імпульсного магнітних полів в натурних умовах в кристалізаторах діаметром 66 і 105 мм. Отримані шляхом аналізу осцилограм струму плавки результати, підтвердили тенденції збільшення частоти відриву крапель електродного металу, зниження їх маси і збільшення швидкості плавлення витратного електроду під дією зовнішніх магнітних полів. Встановлено, що величина зміни струму плавки залежить від індукції зовнішнього магнітного поля, а при імпульсному магнітному впливі ще й від тривалості імпульсів його дії. Дисертант надає вірне пояснення цьому процесу, пов'язуючи це з періодичною деформацією вільної поверхні шлакової ванни і зміною глибини занурення електроду у шлак, що призводить до періодичної зміни електроопору міжелектродного проміжку на ділянці шару рідкого шлаку.

При дослідженні макроструктури зливків титанових сплавів, в яких аналізувались особливості структуроутворення металу, форма та розміри кристалів і їх просторова орієнтація, встановлено кардинальну відмінність макроструктур зливків, отриманих без та під дією поздовжніх магнітних полів. Метал, переплавлений без впливу зовнішніх магнітних полів, мав напрямлену структуру з великими стовпчастими кристалами, які перетинались по осі зливків під кутом  $80 - 90^\circ$  і утворювали зону зустрічної кристалізації. При цьому середній розмір кристалів становив  $40 \times 3,5$  мм. Навпаки, макроструктури зливків, отриманих під дією магнітних полів, складались зі значно дрібніших глобулярних кристалів з середнім розміром  $2 \times 1,7$  мм, що близько до розмірів кристалів деформованого металу. До того ж були відсутні зона центральної слабину, пори, шлакові включення.

Важливим результатом досліджень є встановлення неоднозначної дії поздовжніх магнітних полів на якість формування поверхонь зливків та причин цього явища. Це дозволило дисертанту проаналізувати та визначити основні фактори впливу на якість поверхонь (ступінь коливань і вібрацій шлакової і металевої рідин, періодичність змін товщини і руйнування гарнісажної кірки на поверхні зливку, умови потрапляння крапель на стінки кристалізатору). Автор дисертації отримав залежності довжини кристалів, якості поверхні зливків, особливостей мікроструктури від характеристик як постійних, так і імпульсних



накладених зовнішніх магнітних полів при переплаві металу. На основі аналізу цих залежностей дисертант визначив області рекомендованих режимів впливу магнітних полів різного виду для забезпечення високої якості структури і поверхонь зливків.

В п'ятому розділі на основі проведених досліджень дисертантом розроблені достатньо обгрунтовані технологічні рекомендації щодо реалізації процесу електрошлакового переплаву титанових сплавів під впливом поздовжніх магнітних полів. Вони стосуються обладнання, матеріалів, режимів роботи цього різновиду спецеелектрометалургії. В цьому розділі дисертації визначені оптимальні склади флюсів (шлаків), що відіграють одну з ключових ролей в процесі електрошлакового переплаву титану і його сплавів. На основі досліджень було розроблено і запатентовано флюс системи  $\text{CaF}_2 - \text{SrCl}_2 - \text{Na}_3\text{AlF}_6$ , застосування якого забезпечило стабільність металургійного процесу переплаву, якісну поверхню зливків та зниження питомої витрати електроенергії порівняно з флюсом  $\text{CaF}_2$ .

На основі узагальнення результатів досліджень автором детально розроблені рекомендації стосовно обладнання та середовищ (витратного електроду, шлаку (флюсу), атмосфери плавильного простору, установки камерного типу з механізмом подачі витратного електроду, вакуумною системою та кристалізатором, електромагнітною системою, системами електроживлення і керування). Центральне місце займають ґрунтовні рекомендації стосовно проведення процесу спецеелектрометалургії з використанням дії поздовжніх магнітних полів (підготовчі операції, старт електрошлакового процесу, стаціонарний процес переплаву, виведення усадкової пористості, заключні операції). Також добре сформульовані рекомендації по режимам і кількісним параметрам електрошлакового процесу отримання зливків титанових сплавів в магнітних полях.

Встановлено, що отримані згідно розробленим рекомендаціям зливки титанових сплавів (ВТ6, ТС6, ОТ4), мають високу хімічну однорідність, повністю відповідають стандарту по хімічному складу, а легуючі елементи по висоті і радіусу зливків розподілені рівномірно і без ознак зональної ліквіації. Забезпечено також вміст газів (O, N, H) менший за вимоги стандарту. Механічні випробування на міцність, пластичність і ударну в'язкість теж підтвердили ефективність рекомендацій дисертанта – показники міцності відповідають типовим значенням для даних сплавів, а характеристики пластичності і ударної в'язкості суттєво (до 25 %) їх перевищують.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

Положення наукової новизни відповідають визначеним завданням опонованої дисертації. До найбільш суттєвих з наукової точки зору результатів дисертації Порохонька В. Б. слід віднести:

- отримали подальший розвиток уявлення про процеси плавлення перенесення та кристалізації металу при електрошлаковому переплаві у умовах дії поздовжніх постійних і імпульсних магнітних полів та вперше встановлено, що створене під впливом поздовжнього магнітного поля горизонтальне обертання розплаву в шлаку призводить до збурень і деформації його вільної поверхні, а також міжфазної поверхні шлакової та металеві рідких фаз;

- вперше встановлено, що накладання в процесі електрошлакового переплаву поздовжнього магнітного поля з середньою індукцією 0.25 Тл збільшує частоту відриву крапель електродного металу, зменшує їх середню масу, збільшує довжину траєкторії руху крапель і термін їх перебування в рідкому шлаку, а також призводить до збільшення розосередження місць входу крапель в поверхню рідкої металеві ванни та швидкості плавлення електроду;

- вперше встановлено, що накладання в процесі електрошлакового переплаву поздовжнього постійного магнітного поля викликає зменшення струму плавки та збільшення



амплітуди його коливань, а при застосуванні поздовжнього імпульсного магнітного поля зменшення струму плавки має циклічний характер і величина цього зниження залежить від індукції та тривалості імпульсів магнітного поля:

- визначено параметри поздовжніх постійного та імпульсного магнітних полів (постійне поле 0.12 – 0.22 Тл, імпульсне 0.18 – 0.30 Тл при тривалості імпульсів 0.9 – 2.5 с, пауз 6 – 15 с), які ефективно забезпечують покращення якості макроструктури (розорієнтацію кристалів, їх глобуляризацію та подрібнення) зливоків титанових сплавів діаметром 70 – 140 мм.

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

Розроблено технічні і технологічні рекомендації щодо обладнання та його модернізації, матеріалів, режимів процесу спеціальної електрометалургії – електрошлакового переплаву зливоків титану і легованих та складнолегованих титанових сплавів в поздовжніх магнітних полях, що забезпечують отримання зливоків, метал яких характеризується високими показниками хімічної і структурної однорідності, пластичності і ударної в'язкості, а також розроблення складу шлаку (флюсу), який забезпечує стабільний електрошлаковий процес переплаву з якісним формуванням поверхні зливку і економію питомих витрат електроенергії до 18 %.

### **Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи в наукових публікаціях.**

Основні результати дисертаційної роботи пройшли опробування на 11 науково-технічних конференціях, в тому числі 5 міжнародних. Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 29 роботах, 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 і 3 патентах України.

Публікації в достатній мірі відображають основні положення дисертації і відповідають вимогам МОН України.

Автореферат дисертації містить всю необхідну інформацію для оцінки дисертації, цілком ідентичний роботі, включає основні наукові положення, висновки і рекомендації, які приведені у дисертації.

### **Зауваження по змісту дисертації.**

1. В меті роботи зазначена, крім визначення закономірностей досліджуваних процесів, ще й розробка технічних рекомендацій. Це досить повно викладено в тексті дисертації (зокрема, в табл. 5.3 та рис. 5.8). Але в авторефераті дисертації конкретним рекомендаціям присвячено тільки три строчки констатуючої інформації (стор. 14), що недостатньо характеризує в авторефераті досягнення дисертаційної роботи.

2. В п. 4 наукової новизни вказано діапазон діаметрів титанових зливоків 70...140 мм, для яких визначено ефективні параметри постійного та імпульсного поздовжніх магнітних полів, а в п. 7 загальних висновків зазначено, що технологічні рекомендації розроблено для зливоків титанових сплавів діаметром 60...220 мм. Така розбіжність в дисертації не пояснена.

3. При фізичному моделюванні процесу плавлення витратного електроду в електрошлаковому переплаві під впливом поздовжніх магнітних полів визначальним масштабом прийнято тільки геометричний, але його значення не наведено. Використаний при моделюванні критерій подібності (число S) характеризує вихрову та теплову дію електричного струму, що розтікається з витратного електроду в рідкій шлаковій ванні, але не застосова-



ні критерії подібності дії як постійного, так і імпульсного магнітних полів, зокрема, параметр магнітогідродинамічної взаємодії (N) та магнітне число Фур'є для нестационарних полів. Встановлення при фізичному моделюванні виникнення деформації вільної поверхні шлакової ванни завдяки застосуванню поздовжнього магнітного поля і виникнення відцентрових сил, утворених горизонтальним обертанням ванни навколо своєї вісі, потребує більшого узагальнення впливу цього явища на переплавні процеси ЕШП. Тому треба було використати в роботі відповідні критерії подібності (наприклад, число Тейлора).

4. В роботі досліджено розподілення індукції зовнішнього поздовжнього магнітного поля по вісі модельної ємності ( $x = 0$ ) при різних значеннях електроструму в обмотках соленоїдів, але не менше важливе розподілення індукції поздовжнього магнітного поля у поперечному перерізі ємності ( $x > 0$ ) не визначено. Також не вказані діаметр ємності і внутрішній діаметр соленоїдів.

5. В текстах дисертації і автореферату зустрічаються невідповідності і похибки. Так, на рис. 12 автореферату назва не відповідає самому рисунку, є похибки в списку опублікованих праць дисертанта (п. 26, 28, 29), списку використаних джерел – п. 136, а п. 146 і 152 – однакові. Є також деякі друкарські похибки.

Наведені зауваження не знижують наукову та практичну цінність роботи, не ставлять під сумнів достовірність результатів дисертації.

**Висновки.**

Дисертаційна робота Порохонька В. Б. за темою: «Електрошлаковий переплав титанових сплавів під дією зовнішніх поздовжніх магнітних полів», представляє собою підсумок цілеспрямованих досліджень, які виконані в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України і є завершеною працею. В ній отримані нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують наукову задачу з розвитку теорії виробництва спеціальних титанових сплавів з застосуванням електричного струму високої щільності та магнітних полів, в тому числі імпульсних, в процесі електрошлакового переплаву, що має суттєве значення для розвитку наукового напрямку спеціальної електromеталургії. Вважаю, що дисертаційна робота відповідає вимогам до кваліфікаційних наукових праць даного рівня, зокрема «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженому Постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24.07.2013 року (з подальшими змінами, внесеними його постановами №656, №1159), а її автор ПОРОХОНЬКО ВІТАЛІЙ БОГДАНОВИЧ заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.

Офіційний опонент  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник,  
провідний науковий співробітник  
відділу магнітної гідродинаміки  
Фізико-технологічного інституту  
металів та сплавів НАН України

*В.О.Середенко*

В. О. Середенко

Підпис д. т. н. Середенка В. О. засвідчую.  
Вчений секретар Фізико-технологічного інституту  
металів та сплавів НАН України,  
кандидат технічних наук



*В.А.Лахненко*

В. А. Лахненко