

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Протоковілова Ігоря Вікторовича** «Електрошлаковий переплав високореакційних і прецизійних металів та сплавів з нестаціонарними режимами електричного живлення і електромагнітного впливу», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів

1. Актуальність теми дисертації

Дисертаційна робота Протоковілова І.В. присвячена визначенню закономірностей структуроутворення металу при електрошлаковому переплаві (ЕШП) в умовах нестаціонарних режимів електричного живлення і зовнішнього електромагнітного впливу, та розробці на цій основі технологічних процесів і обладнання для виплавки зливоків високореакційних і прецизійних металів та сплавів.

Структурний фактор є одним з найважливіших показників якості литого металу і тим резервом, завдяки якому можуть бути покращені його механічні і експлуатаційні властивості. Отримання зливоків з дрібнозернистою, однорідною первиною структурою, з гарантовано рівномірним розподіленням легуючих компонентів і зміцнюючих фаз, є передумовою і запорукою високої якості сплавів і ресурсу виготовлених з них виробів.

В зв'язку з цим, розробка методів керування процесами кристалізації і структуроутворення литого металу, є одним з пріоритетних напрямків досліджень в сучасній електрометалургії. Особливо актуальним це стає при виплавці складнолегованих сплавів, до яких ставляться підвищені вимоги щодо хімічної і структурної однорідності металу. Саме такими матеріалами є прецизійні сплави, функціональні матеріали типу нікеліду титану, титанові сплави тощо, які є об'єктами досліджень в дисертаційній роботі.

Сьогодні в Україні відсутнє власне промислове виробництво цілого ряду затребуваних прецизійних сплавів, нікеліду титану, деяких титанових сплавів (легованих матеріалами з високою пружністю пари). Через це розробка ефективних технологій виготовлення таких сплавів може стати

підґрунтям для створення такого виробництва в Україні і зменшення імпортозалежності вітчизняних підприємств.

Виходячи з цього тема дисертаційної роботи є без сумніву актуальною, яка має як науковий інтерес так і практичне значення.

2. Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 279 найменувань та 4 додатків. Її зміст у повній мірі відповідає паспорту спеціальності 05.16.02 – *Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів*.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан і тенденції розвитку електрошлакових технологій, приведено відомості про властивості і області застосування досліджуваних високореакційних і прецизійних сплавів, висвітлено технологічні особливості і проблеми їх виплавки в печах ЕШП.

У другому розділі розглянуті процеси плавлення витратного електроду і формування кристалічної будови зливків ЕШП. Досліджено особливості плавлення витратного електроду з прецизійного сплаву 29НК, визначено вплив параметрів процесу на форму торця електроду і глибину його занурення у шлак.

Методом фізичного моделювання визначені особливості плавлення електродного металу крапельного перенесення в умовах дії зовнішнього поздовжнього магнітного поля. Встановлено, що під дією поздовжнього магнітного поля суттєво змінюється структура і інтенсивність течій шлакового розплаву, що у свою чергу, призводить до збільшення частоти відриву крапель електродного металу, зменшення їх маси, при збільшенні довжини траєкторій руху крапель і часу їх перебування в шлаковій ванні.

Третій розділ присвячено дослідженню процесу ЕШП з нестационарними режимами електричного живлення. Експериментальним шляхом показано, що нестационарне електричне живлення дає можливість впливати на процеси структуроутворення металу зливків, при зменшенні витрат електроенергії. Встановлено факти зменшення на 7...10% питомих витрат електроенергії та подрібнення і гомогенізації структури металу, у порівнянні з традиційним ЕШП. Показано, що механізм дії нестационарних режимів живлення на процес ЕШП полягає в примусовій періодичній зміні

теплого і гідродинамічного стану металургійної ванни за рахунок зміни потужності.

У четвертому розділі представлено результати досліджень процесу ЕШП з пошаровим формуванням зливка. Встановлено, що зливки, отримані способом пошарового формування, характеризуються відсутністю великих стовпчастих кристалів та зони зустрічної кристалізації по висі зливка, при цьому дисперсність структури значно вище, ніж у злиwkів традиційного ЕШП. Надано рекомендації стосовно застосування процесу пошарового формування для виплавки злиwkів діаметром до 220 мм.

У п'ятому розділі запропоновано і досліджено методи впливу на кристалізацію злиwkів із застосуванням розрядів емнісних накопичувачів електричної енергії (конденсаторів). Встановлено, що найбільш дієвим методом є одночасні електричні розряди на соленоїд кристалізатора і на металургійну ванну, що забезпечує подрібнення і гомогенізацію литої структури металу зливка, наближаючи її до структури деформованого металу. Запропоновані фізичні механізми, які призводять до подрібнення і гомогенізації структури металу.

У шостому розділі досліджено процес ЕШП в умовах вакууму. Встановлено, що лімітуючим чинником реалізації переplаву у вакуумі є закипання флюсу. Встановлено, що тиск закипання флюсу залежить як від складу флюсу, так і від електричних режимів процесу. Визначено допустимий рівень вакууму для сольових та фторидно-оксидних флюсів, показана можливість зменшення вмісту водню у титанових сплавах, шляхом ведення переplаву в умовах вакууму.

У сьомому розділі розроблено технологічні процеси камерного ЕШП високореакційних і прецизійних сплавів з використанням електромагнітного впливу на кристалізацію металу. Отримані зразки злиwkів титанових сплавів, нікеліду титану, прецизійних сплавів типу 29НК, 50Н, 46Н, 49КФ, хрому. Приведені данні, щодо їх хімічного складу і механічних властивостей.

У висновках відображені основні результати дисертаційної роботи.

У додатках надані відомості, щодо практичного застосування результатів досліджень і список опублікованих праць.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих в дисертації, їх достовірність

Обґрунтованість та достовірність основних наукових положень і висновків дисертації визначається наступним:

- використанням сучасних методів металофізичних досліджень отриманих високореакційних і прецизійних металів та сплавів;
- застосуванням методів фізичного моделювання з урахуванням критеріїв подібності;
- значним обсягом експериментальних даних, які отримані шляхом прямих експериментів в умовах реального електрошлакового процесу;
- успішним застосуванням результатів досліджень при дослідно-промисловій перевірці розроблених технологічних процесів;
- публікаціями у фахових виданнях та апробацією на всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях.

4. Наукова новизна отриманих результатів

Положення наукової новизни відповідають поставленим завданням дисертаційної роботи. До найбільш суттєвих наукових результатів слід віднести:

- 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 металевої 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;
- 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 металевої ванни при висоті шарів наплавленого металу в межах $(0,1...0,5) \times d_{зл}$, де $d_{зл}$ – діаметр зливка;

- 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 $0,3...0,4$ Дж/мм² 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;

- 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. Практичне значення результатів, отриманих в дисертаційній роботі

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробленні, захищених патентами України, технологічних процесів для виплавки в камерних печах ЕШП титанових сплавів, нікеліду титану, прецизійних сплавів 29НК, 50Н, 46Н, 49КФ та хрому.

Комплекс запропонованих в роботі технологічних рішень реалізовано в створеній дослідно-промисловій установці потужністю 724 кВт для ЕШП зливків високореакційних і прецизійних металів.

Розроблені технологічні процеси і обладнання використовуються при виготовленні промислових партій зливків для вітчизняних підприємств, що

підтверджується відповідними довідками від ТОВ "НЕКСТМЕТАЛІС ЮКРЕЙН" і ТОВ "КОНРАД ГРУП".

Також, практичне значення результатів дисертаційного дослідження полягає в їх використанні у навчальному процесі під час підготовки аспірантів в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ (курс "Методи підвищення ефективності металургійного виробництва").

6. Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи в опублікованих працях

Основні результати і положення дисертаційної роботи висвітлені в 65 наукових працях, в тому числі: 35 статей у фахових виданнях 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.

Кількість публікацій і їх зміст в достатній мірі відображають основні положення дисертації і відповідають вимогам, що висуваються МОН України.

7. Зауваження до дисертаційної роботи

1. У розділі 3 досліджено вплив нестационарних режимів електричного живлення на структуроутворення зливків ЕШП, в табл. 3.1 надані відповідні режими експериментальних плавок. Але з яких міркувань обрані ці режими (зокрема тривалості імпульсів і пауз плавлення) не пояснено і рекомендацій, щодо їх вибору не надано.

2. У розділі 4 наведено результати формування пошарових структур зливків ЕШП. Відмічено, що важливим завданням є забезпечення бездефектності зон з'єднання окремих шарів. З цього приводу доцільно було б проведені автором дослідження макроструктури і механічних характеристик цих зон доповнити дослідженнями мікроструктури і хімічного складу. Це дало б можливість більш об'єктивно оцінити якість поєднання шарів.

3. В роботі не приведено даних, щодо продуктивності процесу ЕШП з пошаровим формуванням зливка. Вочевидь, що вона буде нижче, ніж при традиційному ЕШП. Тому виникають питання про економічну доцільність такого процесу. Загалом в роботі нема техніко-економічної оцінки розроблених процесів ЕШП і їх порівняння з традиційним ЕШП і з іншими способами спеціальної металургії.

4. В роботі автор досліджує і пропонує декілька методів впливу на кристалізацію зливків при ЕШП, а саме: нестационарне електричне живлення, пошарове формування, розряди конденсаторів. Пороте, у підсумку, не надано чітких рекомендацій, в яких випадках і для яких матеріалів доцільно використовувати той чи інший метод і від чого залежить цей вибір.

5. Автор багато уваги приділяє структурним факторам при формуванні зливків. В той же час не наведено порівнянні дані зміни структурних факторів в залежності від кількості домішок (перш за все домішок впровадження) у вихідному електроді і в зливках, що ускладнює інтерпретацію отриманих результатів.

6. В роботі не наведено електронно-мікроскопічні знімки структури одержаних зливків сплавів, в яких після плавки можуть утворюватись оксиди та інші дисперсні фази, що впливають на їх фізико-механічні властивості.

7. При циклічному формуванні зливків на межі кристалізації порцій сплаву можуть формуватися зони з підвищенням вмістом домішок. Автор не навів результати розподілу елементів в зоні сплавлення порцій металу, що суттєво може впливати на фізико-механічні властивості сплавів.

8. У роботі не наведено результати відтворюваності фізико-механічних характеристик партій сплавів при їх промисловому виготовленні.

8. Загальний висновок

Дисертаційна робота Протоковілова І.В. «Електрошлаковий переплав високореакційних і прецизійних металів та сплавів з нестационарними режимами електричного живлення і електромагнітного впливу» є завершеною науковою працею, яка за актуальністю, науковою новизною, обсягом проведених експериментальних досліджень, їхньою науковою та практичною цінністю задовольняє вимогам, які висуваються до робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Робота відповідає паспорту спеціальності 05.16.02 – металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів, не містить академічного плагіату, реферат об'єктивно і достатньо повно відображає зміст дисертації.

Таким чином вважаю, що дисертаційна робота відповідає вимогам Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою №1197 Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р, і її автор – Протоковілов Ігор Вікторович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.

Офіційний опонент –

провідний науковий співробітник відділу зносостійких та корозійностійких порошкових конструкційних матеріалів

Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, доктор технічних наук,

старший науковий співробітник

М.І. Гречанюк

Підпис д.т.н. Гречанюка М.І. засвідчую.

В.О. ученого секретаря ІПМ ім. І.М. Францевича

к.ф-м.н.



Д.В. Миронюк