

25 09 23 684

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
ПРОТЮКОВІЛОВА ІГОРЯ ВІКТОРОВИЧА

на тему «Електрошлаковий переплав високореакційних і прецизійних металів та сплавів з нестаціонарними режимами електричного живлення і електромагнітного впливу»,
яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів

1. Оцінка актуальності теми дисертації

Дисертаційна робота Протоковілова І.В. присвячена розробці нових методів керування процесами структуроутворення металу зливків при електрошлаковому переплаві (ЕШП). Ця проблема була і залишається однією з пріоритетних в сучасній електрометалургії. Особливо гостро вона стоїть при виплавці складнолегованих сплавів, для яких показники хімічної і структурної однорідності є найважливішими показниками якості литого металу. В зв'язку з цим, вибір автора в якості об'єкту досліджень прецизійних сплавів, титанових сплавів, нікеліду титану, до яких ставляться підвищені вимоги щодо однорідності металу, є логічним.

На сьогоднішній день застосування традиційних схем ЕШП не завжди забезпечує необхідну металургійну якість зливків таких сплавів. Великий об'єм металевої ванни, характер тепловідведення, малоінтенсивна конвекція рідкого металу сприяють формуванню крупнозернистої структури литого металу з можливістю утворення ліквіційних дефектів.

Тому розробка нових методів керування теплофізичними, гідродинамічними і металургійними процесами, які визначають формування структури зливка ЕШП, безсумнівно, є актуальним та своєчасним завданням.

Додатковим підтвердженням актуальності теми дисертації є її зв'язок з науково-дослідними програмами, які виконувались в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України впродовж 2007-2023 рр., у яких автор приймав участь як відповідальний виконавець та керівник.

2. Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Протоковілова І.В. виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Робота складається зі вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 279

найменувань та 4 додатків. Дисертація має загальний обсяг 338 сторінок, містить 143 рисунки і 32 таблиці.

Тема і зміст роботи у повній мірі відповідають паспорту спеціальності 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, вказано її зв'язок із науковими програмами, сформульовано мету та завдання дослідження, представлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено данні про апробацію та публікацію основних результатів досліджень.

У першому розділі розглянуто сучасний стан і тенденції розвитку електрошлакових технологій. Проаналізовано технологічні особливості і проблеми виплавки високореакційних і прецизійних сплавів в печах ЕШП. Показано, що через жорсткі вимоги щодо хімічного складу і однорідності таких сплавів, їх виробництво потребує застосування додаткових заходів, спрямованих на отримання литого металу з дрібнозернистою, гомогенною структурою. Для цього автором запропоновано використовувати нестационарні режими електричного живлення і зовнішнього електромагнітного впливу.

У другому розділі проаналізовані процеси плавлення витратного електроду і формування кристалічної будови зливок ЕШП. Експериментальним шляхом визначено вплив параметрів процесу на особливості плавлення витратного електроду з прецизійного сплаву 29НК. Із застосуванням фізичної моделі встановлено вплив зовнішнього поздовжнього магнітного поля на особливості крапельного перенесення електродного металу.

На основі проведених досліджень було запропоновано два підходи щодо керування структуроутворенням металу при ЕШП, а саме – зменшення об'єму металеві ванни шляхом ведення електрошлакового процесу в періодичному режимі і вплив на її гідродинамічний стан з використанням електричних і магнітних полів.

У третьому розділі представлені результати досліджень процесу ЕШП з нестационарними режимами електричного живлення. Розглянути варіанти нестационарного живлення з тривалістю пауз значно менше ніж постійні часу витратного електроду, металеві і шлакової ванн. Встановлено, що в цьому випадку нестационарне живлення не призводить до періодичності процесів плавлення витратного електроду і кристалізації металу зливка. В той же час, періодична зміна теплового і гідродинамічного стану металургійної ванни сприяє подрібненню і гомогенізації структури литого металу при зменшенні

витрат електроенергії у порівнянні традиційним ЕШП.

Четвертий розділ присвячено дослідженню процесу ЕШП з пошаровим формуванням зливка. Показано, що для реалізації пошарового формування зливка періоди подачі і плавлення витратного електроду повинні чергуватись з паузами, при яких в шлаковій ванні підтримується електричний струм і заданий тепловий режим. Експериментально, на зливках діаметром до 220 мм, доведена можливість суттєвого збільшення дисперсності структури литого металу, у порівнянні металом традиційного ЕШП. На основі проведених досліджень розроблені рекомендації щодо застосування процесу пошарового формування для виплавки злиwkів діаметром до 220 мм.

У п'ятому розділі досліджено можливості використання розрядів конденсаторів з метою оптимізації процесів кристалізації злиwkів ЕШП. Показано, що механізми їх впливу на формування структури металу засновані на магнітогідродинамічних ефектах у розплавах шлакової та металевий ванн під дією імпульсних електричних і магнітних полів. Встановлено, що найбільш дієвим є застосування одночасних електричних розрядів на соленоїд кристалізатора і металургійну ванну. В цьому випадку збільшуються електромагнітна сила, яка діє на розплав, що дозволяє повністю усунути формування стовбчастої структури металу, забезпечуючи її подрібнення і гомогенізацію.

Шостий розділ присвячено дослідженню процесу ЕШП у вакуумі. Показано, рівень пониженого тиску при ЕШП обмежується закипанням шлакової ванни, що призводить до порушення стабільності електрошлакового процесу. При цьому встановлено, що тиск закипання флюсу залежить як від його складу, так і від електричних режимів переплаву. Експериментально визначено допустимий рівень вакууму для сольових та оксидних флюсів. Встановлена можливість зменшення на 20...35 % вмісту водню у титанових сплавах, шляхом ведення процесу ЕШП в умовах вакууму (20...25 кПа).

У сьомому розділі, виходячи з результатів проведених досліджень, розроблено технологічні процеси і обладнання для камерного ЕШП високореакційних і прецизійних металів та сплавів з використанням нестационарних режимів живлення і електромагнітного впливу. Отримані дослідні зразки і промислові партії злиwkів титанових сплавів, нікеліду титану, прецизійних сплавів типу 29НК, 50Н, 46Н, 49КФ, хрому, метал яких характеризується високою хімічною і структурною однорідністю.

Загальні висновки відображають основні результати досліджень.

У додатках містяться документи, які підтверджують практичне

застосування результатів роботи, а також список опублікованих праць.

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

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій дисертації підтверджується ґрунтовним аналізом сучасних літературних джерел, чітким формулюванням мети і завдань дослідження та шляхів їх реалізації. Достовірність наукових положень дисертації підтверджується значним обсягом експериментальних даних, отриманих з використанням фізичного моделювання, експериментів при натурному електрошлаковому переплаві і сучасних методів металофізичних досліджень. Отримані результати апробовані на авторитетних вітчизняних та міжнародних конференціях, а також успішно застосовані в розроблених технологічних процесах.

4. Оцінка наукової новизни отриманих результатів

Основним науковим здобутком роботи можна вважати те, що були теоретично обґрунтовані і експериментально досліджені нові методи вирішення фундаментальної проблеми керування процесами структуроутворення металу зливків ЕШП. Зокрема:

- уперше теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено можливість керування структурою металу зливків при ЕШП шляхом застосування нестационарних режимів електричного живлення, що дає можливість збільшувати 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 з пошаровим формуванням 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 конденсаторів 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, що забезпечує подрібнення і

гомогенізацію литої структури зливка, наближаючи її до структури деформованого металу.

5. Оцінка практичного значення результатів роботи

Практичне значення результатів роботи полягає в тому, що на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень були розроблені технологічні процеси і обладнання для електрошлакової виплавки зливок високореакційних і прецизійних металів та сплавів. Були отримані дослідні і промислові партії зливок титанових і прецизійних сплавів, які постачаються вітчизняним підприємствам.

Розроблені технології створюють передумови для вирішення важливої народногосподарської проблеми організації в Україні конкурентоспроможного виробництва вказаних сплавів та імпортозаміщення відповідних виробів.

Результати проведених досліджень застосовуються у навчальному процесі в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ при викладанні дисципліни "Методи підвищення ефективності металургійного виробництва".

6. Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи в опублікованих працях

Основні результати дисертаційного дослідження опубліковано в 65 наукових працях, з них 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 публікацій у збірниках праць наукових конференцій.

Кількість публікації і їх тематика дають підстави вважати, що вони повною мірою висвітлюють основні наукові положення і висновки дисертації і відповідають вимогам МОН України, що висуваються до докторських дисертацій.

Зміст реферату ідентичний з основним положеннями дисертації й відображає наукові та практичні результати роботи.

7. Зауваження до дисертаційної роботи, аналізуючи результати досліджень, вважаю доцільним зазначити наступне!

1. Для оцінки адекватності фізичного моделювання у рамках виконаного дослідження бажано навести відповідність для процесу ЕШП чисел

електродинамічного, гідродинамічного і теплового подібностей моделі і діючого процесу.

2. Наведений багатий фактографічний матеріал досліджень цілком логічно було б викласти з обробкою засобами математичної статистики у вигляді кореляційних співвідношень.

3. За результатами досліджень встановлено ефект впливу електромагнітного поля, зокрема електродинаміки, на гідродинамічні умови кристалізації металу. В той же час, при збільшенні перетину зливків більше 120 мм вплив режимів переплаву з нестационарним живленням малоефективний для подрібнення макроструктури зливка. Автор трактує це явище через зменшення сили струму i , як наслідок, зменшення електродинамічних сил. Разом з тим збільшення перетину зливка нерозривно пов'язано зі збільшенням маси шлакової ванни і її тепловою інерцією. З метою поглиблення змісту цього фрагменту роботи бажано було б виконати чисельні розрахунки ізотерм і екіпотенціальних поверхонь шлакової ванни з позицій існування векторного поля.

4. Зважаючи на зміст і обсяг виконаних досліджень в напрямку розробки технології пошарового формування зливка ЕШП з керованою макроструктурою металу наукова обґрунтованість цього фрагменту дисертаційної роботи суттєво підвищилась би за умовою урахування впливу теплової генерації шлакової ванни та її теплової інерції на теплофізику кристалізації металу.

5. Зважаючи на те, що подрібнення структури впродовж кристалізації металу здійснюється під впливом електродинамічної сили, що генерується у просторовому 4-х вимірному континуумі (координати, час) бажано було б посилити науковий потенціал роботи числовими оцінками цієї сили. Для реалізації цього питання доцільно використати результати математичного моделювання науковців ІЕЗ ім. Є.О.Патона.

6. Результати досліджень процесу ЕШП в умовах вакууму, викладені в шостому розділі дисертаційної роботи, свідчать про розвиток масообмінних процесів в системі «метал-шлак» впродовж переплаву, зумовлених випаровуванням компонентів шлаку і десорбцією розчинених газів, зокрема водню. Встановлені залежності перебігу цих процесів від енерготехнологічних параметрів процесу: електричний режим, глибина вакууму. Доцільним елементом досліджень, викладених в цьому розділі роботи могли бути результати мас-спектроскопії складу газових виділень впродовж плавки, що дозволило би цілеспрямовано коригувати склад оксидно-фторидних і сольових шлакових систем.

7. Вважаю доцільним щодо оцінки ефективності ЕШП високореакційних і прецизійних металів і сплавів у змінному фізичному полі навести порівняльні характеристики якості і техніко-економічних показників переплаву традиційними методами, зокрема титанових сплавів у вакуум-дуговому переплаві, залізонікелевих (50Н) та залізо кобальотових з ванадієм (49КФ) сплавів у вакуум-індукційній печі.

Вищенаведені зауваження ні в якому разі не принижують важливість підсумків наукових досліджень і практичну націленість роботи, але й можуть бути орієнтиром у розвитку подальших досліджень автора.

8. Загальна оцінка дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Протоковілова І.В. «Електрошлаковий переплав високореакційних і прецизійних металів та сплавів з нестаціонарними режимами електричного живлення і електромагнітного впливу» є завершеною науковою роботою, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати стосовно закономірностей структуроутворення металу при електрошлаковому переплаві із застосуванням нестаціонарних режимів електричного живлення і електромагнітного впливу і яка розв'язує важливу науково-технічну проблему керування процесами структуроутворення металу злиwkів ЕШП.

Робота відповідає паспорту спеціальності 05.16.02 – металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів, не містить академічного плагіату, та задовольняє чинні вимоги Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №1197 від 17 листопада 2021 р.

Таким чином вважаю, що Протоковілов Ігор Вікторович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.

Офіційний опонент,
проректор з наукової роботи
Українського державного університету
науки і технологій,
доктор технічних наук, професор

