

## ВИСНОВОК

спеціалізованої вченої ради Д 26.182.01 при Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України про новизну, значимість і обґрунтованість результатів дисертаційної роботи провідного наукового співробітника **Протоковілова Ігоря Вікторовича** «Електрошлаковий переплав високореакційних і прецизійних металів та сплавів з нестационарними режимами електричного живлення і електромагнітного впливу», яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів»

**1.** Дисертаційна робота І.В. Протоковілова є завершеною науково-дослідною роботою, яка в повній мірі відповідає вимогам "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 №567, щодо дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук.

Робота виконувалась впродовж 2007–2023 рр. у лабораторії №38 і відділі №20 ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України в рамках наукових програм: № 1.6.1.1.38.84.28 (4.3) "Дослідження фізико-хімічних засад структуроутворення гетерогенних високоміцних сплавів титану з інтерметалідним зміцненням при магнітокерованій електрошлаковій плавці" (2007-2011 рр., № д/р 0107U002788); № 1.6.1.1.38.3 (38/3) «Дослідити методи керування кристалізацією металів і сплавів із застосуванням енергії електромагнітних розрядів і розробити електрошлакові технології і устаткування для одержання зливків з регламентованою структурою» (2013-2015 рр., № д/р 0113U002026); № 1.6.1.1.38.33 (4/7) «Розробити наукові засади технології отримання гомогенних з подрібненою структурою зливків нікелідів титану сплавів з ефектом пам'яті форми, із застосуванням магнітокерованої електрошлакової плавки» (2012-2016 рр., № д/р 0112U000621); № 1.6.3.20.6 (20/6) "Дослідження процесів плавлення і кристалізації прецизійних сплавів при електрошлаковому переплаві з імпульсними режимами електричного живлення і магнітного впливу" (2016-2018 рр., № д/р 0115U006704); № 1.6.1.1.20.31 (20/31) "Дослідження процесів плавлення та кристалізації металу при плазово-дуговій та електрошлаковій виплавці зливків із відходів тугоплавких, високореакційних і жароміцних металів та сплавів і плазово-індукційному вирощуванні крупних профільованих монокристалів вольфраму та молібдену" (2018-2020 рр., № д/р 0118U100514); № 1.6.2.1.20.1 (20/1) "Дослідження і розробка методів впливу на структуроутворення металевих зливків при їх отриманні із застосуванням електрошлакових і плазових технологій" (2022 р. - до тепер, № д/р 0118U100514).

## **2. Найбільш вагомі результати роботи.**

2.1. Теоретично обґрунтовані і експериментально досліджені нові методи вирішення фундаментальної проблеми керування процесами

структурування металу зливків ЕШП. Вони базуються на застосуванні нестационарних режимів електричного живлення, із зменшенням об'єму металеві ванни і забезпеченням пошарового формування зливка, а також на імпульсному впливі на гідродинамічний стан розплавів шлаку і металу зовнішніми електричними і магнітними полями.

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

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

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

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

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

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

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

- температура металу на відстані  $0,5 \times d_{зл}$  від верхнього торця зливка і  $0,25 \times d_{зл}$  від бокової поверхні, після відключення напруги (°C)  $T = T_{в} + (T_{мв} - T_{в}) \cdot k_{пд} \cdot k_{тфм} \cdot e^{-k_{тп}\tau}$ , де  $T_{мв}$  – температура металеві ванни,  $T_{в}$  – температура охолоджуючої води,  $\tau$  – час охолодження (хв),  $k_{тп}$  – коефіцієнт

теплопередачі, який для зливок діаметром 85, 125 і 220 мм дорівнює 0,19, 0,056 і 0,02 відповідно.

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

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

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

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

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

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

### **3. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і результатів дисертаційної роботи.**

Достовірність основних наукових положень і висновків дисертації підтверджуються сучасними методами досліджень структури, хімічного складу та механічних властивостей отриманих високореакційних і прецизійних металів та сплавів.

Достовірність результатів, одержаних в ході виконання дисертаційної роботи, підтверджується їх успішним застосуванням при дослідно-промисловій перевірці розроблених технологічних процесів.

Обґрунтованість результатів, які отримані під час виконання дисертаційної роботи, підтверджується публікаціями у фахових виданнях та апробацією на всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях.

### **4. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи.**

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

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

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

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

електроду зі шлаком, збільшується міжелектродний проміжок і погіршується електричний контакт на поверхні поділу *електрод - шлак*.

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

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

## **5. Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих працях.**

Найбільш важливі результати і положення дисертації опубліковано в 65 наукових працях, в тому числі 35 статей у фахових журналах, з яких 4 – в виданнях іноземних держав, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science. Основні положення та результати досліджень доповідалися на 26 всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях. Отримано 3 патенти України на винахід та 1 патент України на корисну модель.

## **6. Практичне значення результатів дисертаційної роботи.**

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

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

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

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

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

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

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

### 7. Рекомендації для подальшого використання результатів роботи.

Спеціалізована вчена рада рекомендує розширити використання результатів роботи для участі у міжнародних дослідницьких проєктах, а також продовжити роботи з впровадження розроблених технологій виплавки високореакційних металів і прецизійних сплавів на вітчизняних підприємствах.

Проєкт висновку обговорений і схвалений на металургійному семінарі Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (Протокол від 25 травня 2023 року).

Голова семінару  
чл.-кор. НАН України  
д.т.н.



Віктор ШАПОВАЛОВ

Секретар семінару  
к.т.н.



Юрій НИКИТЕНКО

