



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН

України

академік НАН України

Ігор КРІВЦУН

29 05 2023 р.

ВИТЯГ

з протоколу №1 від 25 травня 2023 р.

засідання металургійного семінару ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

ПРИСУТНІ:

академік НАН України, д.т.н. Лобанов Л.М., чл.-кор. НАН України, д.т.н. Шаповалов В.О., д.т.н. Кусков Ю.М., д.т.н. Березос В.О., д.т.н. Полішко Г.О., д.т.н. Біктагіров Ф.К., д.т.н. Могилатенко В.Г., д.т.н. Костецький Ю.В., к.т.н. Клочков І.М., к.т.н. Никитенко Ю.О., к.т.н. Бурнашов В.Р., к.т.н. Ігнатов А.П., к.т.н. Гнатушенко В.О., к.т.н. Порохонько В.Б., к.т.н. Якуша В.В., к.т.н. Гніздило О.М., к.т.н. Зайцев В.А., к.т.н. Петренко В.Л., к.т.н. Корнієнко О.М., к.т.н. Білоус В. Ю., к.т.н. Козулін С.М., м.н.с. Петров Д.А., н.с. Педченко С.А., н.с. Козін Р.В, інж. Барабаш В.В. та інші — всього 32 особи.

СЛУХАЛИ:

1. Доповідь провідного наукового співробітника Протоковілова І.В. за матеріалами докторської дисертації на тему "Електрошлаковий переплав високореакційних і прецизійних металів та сплавів з нестационарними режимами електричного живлення і електромагнітного впливу".

Тема дисертаційної роботи була затверджена на засіданні Вченої ради ІЕЗ ім. Є.О. Патона 04.11.2008 р. (витяг з протоколу № 2), скорегована на засіданні Вченої ради ІЕЗ ім. Є.О. Патона 30.03.2023 р. (витяг з протоколу № 9).

2. Запитання до здобувача.

Запитання по темі дисертації ставили:

чл.-кор. НАН України Шаповалов В.О.; акад. НАН України Лобанов Л.М.; д.т.н. Костецький Ю.В.; д.т.н. Біктагіров Ф.К.; д.т.н. Березос В.О.; д.т.н. Кусков Ю.М.; к.т.н. Петренко В.Л.; к.т.н. Білоус В. Ю.; н.с. Педченко С.А..

3. Виступи за обговореною роботою.

В обговоренні дисертації взяли участь:

д.т.н. Кусков Ю.М.; д.т.н. Полішко Г.О.; д.т.н. Березос В.О.; д.т.н. Біктагіров Ф.К.; д.т.н. Костецький Ю.В.; чл.-кор. НАН України Шаповалов В.О.; к.т.н. Корнієнко О.М.

УХВАЛИЛИ:

ПРИЙНЯТИ такий висновок за дисертаційною роботою:

1. Дисертаційна робота І.В. Протоковілова є завершеною науково-дослідною роботою, яка в повній мірі відповідає вимогам "Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук", затвердженого постановою Кабінету Міністрів

України від 17.11.2021 № 1197, 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 перепаві 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 вагомні результати роботи.

2.1. Теоретично обґрунтовані і експериментально досліджені нові методи вирішення фундаментальної проблеми керування процесами структуроутворення 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/мм².

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 зливок 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 τ – 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 ($^{\circ}\text{C}$)

$T = T_{в} + (T_{мв} - T_{в}) \cdot k_{пд} \cdot k_{тфм} \cdot e^{-k_{тп}\tau}$, де $T_{мв}$ – температура металеві ванни, $T_{в}$ – температура охолоджуючої води, τ – 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/мм² 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/мм², 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 шарового 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 емнісних 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.

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 металеві 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.

1) **Igor Protokovilov**, Victor Shapovalov, Vitaly Porokhonko. (2021). Effect of layer-by-layer formation of ingot during electroslag remelting on the quality of its surface and solidification structure. *Ironmaking & Steelmaking*. Vol. 48, No. 1, 62–68. <https://doi.org/10.1080/03019233.2020.1731255>

2) **I. Protokovilov**, V. Shapovalov, V. Porokhonko, T. Beinerts (2021). Effect of the longitudinal magnetic field on the droplets evolution during electroslag remelting process. *Magnetohydrodynamics* Vol. 57, No. 4, pp. 559–568. <https://doi.org/10.22364/mhd.57.4.10>.

3) V. Shapovalov, **I. Protokovilov**, V. Porokhonko. (2022). Structure and mechanical properties of thick-walled joints of Ti-6-4 titanium alloy made by electroslag welding. *Procedia Structural Integrity*, 36, 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.033>

4) Ya. Kompan, **I. Protokovilov**, Y. Fautrelle, Yu. Gelfgat, A. Bojarevics. (2010). Magnetically Controlled Electroslag Melting of Titanium Alloys // *Magnetohydrodynamics* Vol. 46, No. 3, pp. 317–324.

5) Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протоковилів І.В.** К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов. *Современная электрометаллургия*. 2007. №4. С.3-7.

6) **Протоковилів І.В.** Электрошлаковая выплавка галогенидных бескислородных флюсов. *Современная электрометаллургия*. 2008. №2. С.13-16.

7) Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протоковилів І.В.** Мелкозернистые слитки многокомпонентных титановых сплавов. *Теория и практика металлургии*. 2008. №2. С.35-40.

8) Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., Петров Д.А., Белов А.М., **Протоковилів І.В.** Интерметаллидное жароупрочнение сплавов титана, получаемых способом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. *Современная электрометаллургия*. 2009. №1. С.1-11.

9) **Протоковилів І.В.** Измельчение кристаллической структуры полых титановых слитков при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке. *Современная электрометаллургия*. 2011. №4. С.3–5.

10) **Протоковилів І.В.** МГД-технологии в металлургии (Обзор). *Современная электрометаллургия*. 2011. №4. С.32–41.

11) **Протоковилів І.В.**, Петров Д. А. Получение сплавов системы Ti-Ni с эффектом памяти формы методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. *Титан*. 2011. №4(34). С.40-44.

12) **Протоковилів І.В.** Дегазация электрода спрессованного из губчатого титана в процессе вакуумирования камерной печи ЭШП. *Современная электрометаллургия*. 2012. №1. С.12–15.

13) **Протоковилів І.В.**, Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Петров Д. А. Возможности использования импульсных электромагнитных воздействий в электрошлаковых

процессах. Современная электрометаллургия. 2012. №2. С.8–13.

14) **Протокилов И.В.**, Скиба И. А., Петров Д. А. Технологические аспекты магнитоуправляемой электрошлаковой плавки и термомеханической обработки никелида титана. Современная электрометаллургия. 2012. №2. С.17–20.

15) **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Петров Д.А. Особенности электрошлаковой сварки титана с использованием электромагнитных методов воздействия. Вісник НУК імені адмірала Макарова. 2012. №5. С.170-176 (електронне видання).

16) Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О., **Протокилов И.В.** Физическое моделирование электровихревых течений при ЭШП. Современная электрометаллургия. 2013. №1. С.3–7.

17) **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б., Бабич Л.М. Изготовление расходоуемых электродов для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки титана. Современная электрометаллургия. 2013. №3. С.8–11.

18) **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Порохонько В.Б. и др. Особенности создания импульсных магнитных полей для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Современная электрометаллургия. 2013. №4. С.21–26.

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

20) **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Порохонько В.Б. и др. Электрошлаковая выплавка титановых слитков с импульсным электропитанием. Современная электрометаллургия. 2014. №2. С.10–14.

21) **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б. Способы управления кристаллизацией металла слитков при ЭШП. Современная электрометаллургия. 2014. №3. С.7–15.

22) **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б. Физическое моделирование процесса плавления расходоуемого электрода при ЭШП в условиях внешнего электромагнитного воздействия. Современная электрометаллургия. 2015. №1. С.8–12.

23) **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Гончаров И.А., Мищенко Д.Д. Исследование физических и технологических свойств солевых флюсов для ЭШП титана. Современная электрометаллургия. 2015. №3. С.7–12.

24) **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Порохонько В.Б., Петров Д.А. Использование разрядов конденсаторов для управления кристаллизацией металла при ЭШП. Современная электрометаллургия. 2015. №4. С.3–8.

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

26) **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Электрошлаковая выплавка и термомеханическая обработка высокопрочного титанового псевдо β -сплава ТС6. Современная электрометаллургия. 2016. №3. С.16–20.

27) **Протокилов И.В.**, Петров Д.А. Структура и свойства высокопрочного титанового сплава Ti-10-2-3 электрошлакового переплава. Современная электрометаллургия. 2017. №1. С.9–14.

28) **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б. Физическое моделирование капельного переноса электродного металла при ЭШП с наложением импульсных магнитных полей. Современная электрометаллургия. 2017. №3. С.9–14.

29) **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Петров Д.А. и др. Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа. Современная электрометаллургия. 2018. №2. С.45–51.

30) **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Петров Д.А. и др. Особенности структурообразования прецизионного сплава 29НК при ЭШП с порционным формированием слитка. Современная электрометаллургия. 2019. №1. С.11–16.

- 31) **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Получение титанового сплава OT4, легированного марганцем, в электрошлаковой печи камерного типа. Современная электрометаллургия. 2019. №2. С.3–6.
- 32) **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Биктагиров Ф.К. та ін. Физическое моделирование кристаллизации слитков в изложнице в условиях электрошлакового обогрева и подпитки. Современная электрометаллургия. 2019. №3. С.3–9.
- 33) **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Влияние технологических параметров ЭШП на особенности плавления расходоуемого электрода из прецизионного сплава 29НК. Сучасна електрометалургія. 2019. № 4. С.4–8.
- 34) **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Исследование технологических особенностей и допустимых давлений процесса ЭШП в вакууме. Сучасна електрометалургія. 2020. № 2. С.3–9.
- 35) **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Петров Д.А. Вплив зовнішнього поздовжнього магнітного поля на електричні режими ЕШП. Сучасна електрометалургія. 2021. № 3. С.5–8.
- 36) Белов А.М, Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протокилов И.В.** Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка (МЭП) титановых сплавов в продольном магнитном поле. Материалы IV всеук. н-тех. конф. молодых ученых “Сварка и смежные технологии”, 23-25 мая 2007г. С.97.
- 37) Компан Я.Ю., **Протокилов И.В.** Технологические аспекты получения однородных мелкозернистых слитков титановых сплавов. Материалы междунар. конф. HighMatTech “Материалы и покрытия в экстремальных условиях”, 15-19 октября 2007 г., Киев, С. 152.
- 38) Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протокилов И.В.** Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка титановых сплавов с дискретными воздействиями магнитных полей. Материалы междунар. конф. “Ti-2008 в СНГ”, 18-21 мая 2008 г. С.96-99.
- 39) Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протокилов И.В.** и др. Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка в импульсных магнитных полях. Сборник тезисов междунар. конф. “Сварка и родственные технологии – в третье тысячелетие”, 24-26 ноября 2008, Киев. С.212-213.
- 40) Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протокилов И.В.** и др. Возможность получения γ -алюминидов титана методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП). Материалы V Всеукр. науч. тех. конф. молодых ученых и спец. “Сварка и смежн. технологии”, 27-29 мая 2009 г. Киев. С.130.
- 41) Ya. Kompan, **I. Protokovilov**, Yu. Gelfgat. Magnetically-Controlled Electroslag Melting (MEM) of Titanium Alloys. Proceedings of the 6th Int. Conf. on Electromagnetic processing of materials EMP 2009, Oct. 19-23, 2009, Germany. P.615.
- 42) Компан Я.Ю., **Протокилов И.В.** Электрошлаковые технологии плавки и сварки титановых сплавов с управляемыми гидродинамическими процессами. Материалы междунар. конф. “Ti-2010 в СНГ”, 16-19 мая 2010 г, Е-бург. С. 154–157.
- 43) Ya. Kompan, **I. Protokovilov**, Y. Fautrelle, Yu. Gelfgat, A. Vojarevics. Magnetically Controlled Electroslag Melting of Titanium Alloys. Proceedings of the 6th Int. Scientific Colloquium Modelling for Material Processing, Riga, Sep. 16-17, 2010. P.85-90.
- 44) **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Белов А.М. Технологические аспекты получения сплавов с эффектом памяти формы системы Ti-Ni методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Матер. XI меж. конф. “Эффективность реализации науч., ресурсного и пром. потенц. в соврем. услов.”, 10-14 фев. 2011г, п. Плавыя, С. 68-70.
- 45) **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Белов А.М. Получение слитков никелида титана методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Материалы VI Научно-техн. конф. молодых ученых и специалистов “Сварка и смежные технологии”, 25-27 мая 2011г. Киев. С.125.

- 46) **Протокилов И.В.**, Петров Д.А. Получение сплавов системы Ti-Ni с эффектом памяти формы методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Матер. междунар. конф. “Ti-2011 в СНГ”, 25-28 апреля 2011 г, Львов. С. 144–147.
- 47) Порохонько В.Б., **Протокилов И.В.**, Петров Д.А. Особливості електрошлакового зварювання титану з використанням електромагнітних методів впливу. Матеріали II всеукр. науково-практичної конф. “Зварювання та споріднені процеси і технології”, 4-8 вересня 2012 р, Миколаїв. С. 19.
- 48) Порохонько В.Б., **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Бабич Л.М. Технологические особенности использования электромагнитных методов воздействия на процесс ЭШС титана. Тез. докл. науч.-техн. конф. «Современные проблемы металлургии, технологии сварки и наплавки сталей и цветных металлов», Киев: Междунар. ассоциация «Сварка», 2012. С. 49.
- 49) Петров Д.А., **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Бабич Л.М. Дослідження технологічних особливостей виплавки γ -TiAl методом МЕР. Матеріали VII науч. техн. конф. молодых ученых и специалистов “Сварка и смежные технологии”, 22-24 мая 2013 г, Киев. С.145.
- 50) **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Назарчук А.Т., Бабич Л.М. Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка никелида титана. Сборник тезисов междунар. конф. “Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее”, 25-26 ноября 2013, ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, Киев. С.195.
- 51) Ivochkin Y., Terlyakov I., Guseva A., Vinogradov D., Tokarev Y., **Protokovilov I.** Influence of the swirled electrovortex flow on the melting of the eutectic alloy IN-GA-SN. Proc. of the 9th Int. Conf. on Fundamental and Applied MHD. Riga, Latvia, June 16-20, 2014, Volume 1, P. 105-109.
- 52) Порохонько В.Б., **Протокилов И.В.** Фізичне моделювання плавлення витратного електроду при ЕШП в умовах дії зовнішнього магнітного поля. Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій: матер. Всеукр. наук.-техн. конф. - Миколаїв: НУК, 2014. С. 94-96.
- 53) Петров Д.А., **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Бабич Л.М. Электрошлаковый переплав отходов прецизионных сплавов. Матеріали VIII міжнар. конф. молодых ученых та спеціалістів “Зварювання та споріднені технології”, 20-22 травня 2015 р, Київ. С.150.
- 54) Порохонько В.Б., **Протокилов И.В.** Фізичне моделювання процесу ЕШП в умовах дії зовнішніх електромагнітних полів. Матеріали VIII міжнар. конф. молодых ученых та спеціалістів “Зварювання та споріднені технології”, 20-22 травня 2015 р, Київ. С.152.
- 55) **Igor Protokovilov.** Magnetically-Controlled Electroslag Melting of Titanium Alloys. The 34-th ISTC-Korea workshop on titanium materials and their manufacturing technology. Pusan, Korea, November 26-27, 2015. P. 171-183.
- 56) **I. Protokovilov**, A. Nazarchuk, V. Porokhonko. ESR of titanium with electromagnetic effect on metal solidification. Proceedings of the Medovar memorial symposium. Kyiv, Ukraine, June 7-10, 2016, P. 110-115.
- 57) **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка интерметаллидных сплавов на основе титана. Тези доповідей IV Міжнар. конф. “Титан 2016: виробництво та використання в авіабудуванні”. “МоторСіч”. Запоріжжя, 2016 р. С. 32-36.
- 58) **I. Protokovilov**, V. Porokhonko, A. Nazarchuk. Control of metal solidification during ESR using the energy of the electric discharges. Proceed. of the 9-th Int. conf. of young scientists on welding and related technologies. Kyiv, May 23-26, 2017, P. 44-49.
- 59) V. Porokhonko., **I. Protokovilov.** Physical modelling of the drop metal transfer in ESR under effect of longitudinal magnetic field. Proceedings of the Int. conf. "Welding and related technologies - present and future". 5-6 Dec., 2018, Kyiv, Ukraine. P. 128.
- 60) **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Петров Д.А., Порохонько В.Б.

Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа. Титан 2018. Производство и применение в Украине. Сб. докл. межд. конф. Под. ред. проф. С.В. Ахонина. Киев, 2018. С. 128-133 с.

61) **I. Protokovilov**, V. Shapovalov, V. Porokhonko. Control of the crystallization of the ESR ingots using non-stationary power supply modes. Proceedings of the All-Ukrainian scientific and technical conference «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ». Dnipro, Ukraine, November 22-24, 2022, P. 39-40.

62) Патент України на винахід № 119931. Спосіб електрошлакового переплаву. **Протоковілов І.В.**, Порохонько В.Б., Шаповалов В.О., Назарчук О.Т. Опубл. 27.08.2019, бюл. № 16.

63) Патент України на корисну модель № 123715. Спосіб магнітокерованої електрошлакової плавки. **Протоковілов І.В.**, Порохонько В.Б. Опубл. 12.03.2018, бюл. №5.

64) Патент України на винахід № 110591 С2. Флюс для електрошлакового переплаву титанових сплавів. **Протоковілов І.В.**, Порохонько В.Б. Опубл. 12.01.2016, бюл. №1.

65) Патент України на винахід № 97778. Спосіб магнітокерованої електрошлакової плавки титанових сплавів. Компан Я. Ю., Назарчук О. Т., **Протоковілов І.В.** Опубл. 12.03.2012, бюл. №5.

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.

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

ВВАЖАТИ, що дисертаційна робота Протоковілова І.В. "Електрошлаковий переплав високореакційних і прецизійних металів та сплавів з нестаціонарними режимами електричного живлення і електромагнітного впливу", що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, є закінченою науково-дослідною роботою, яка за своїм науковим рівнем та практичною цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає вимогам пп. 7-9 "Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197 та паспорту спеціальності 05.16.02 «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів».

РЕКОМЕНДУВАТИ спеціалізованій вченій раді Д 26.182.01 при ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України прийняти дисертацію Протоковілова І.В. "Електрошлаковий переплав високореакційних і прецизійних металів та сплавів з нестаціонарними режимами електричного живлення і електромагнітного впливу" до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів».

Головуючий на засіданні,
заступник директора з наукової роботи
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України,
чл.- кор. НАН України,
доктор технічних наук, проф.



Віктор ШАПОВАЛОВ

Рецензенти:
провідний науковий співробітник
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України,
доктор технічних наук, с.н.с.



Юрій КУСКОВ

провідний науковий співробітник
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України,
доктор технічних наук, с.н.с.



Володимир БЕРЕЗОС

завідувач відділу
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України,
доктор технічних наук, с.н.с.



Ганна ПОЛІШКО