


**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О. ПАТОНА**

**ПОЛІШКО ГАННА ОЛЕКСІЇВНА**



УДК 669.187.(56+28):621.74.047

**НАУКОВІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПРОЦЕСУ З РІДКИМ  
МЕТАЛОМ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ СУЦІЛЬНИХ І КОМПОЗИТНИХ  
ЗЛИТКІВ**

Спеціальність 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та  
спеціальних сплавів»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
**Стовпченко Ганна Петрівна**  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН  
України, провідний науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Пройдак Юрій Сергійович**  
Національна металургійна академія України МОН  
України, професор кафедри електрометалургії,  
проректор з наукової роботи

доктор технічних наук, професор  
**Грищенко Сергій Георгійович**  
Інститут біологічної хімії ім. Ф. Д. Овчаренка НАН  
України, в.о. завідувача лабораторії збагачення  
мінеральної сировини

доктор технічних наук, професор  
**Сігарьов Євген Миколайович**  
Дніпровський державний технічний університет  
МОН України, завідувач кафедри металургії чорних  
металів

Захист відбудеться «10» лютого 2021 р. об 11.00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.182.02 при Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 11, вул. Казимира Малевича, Київ, 03150, Україна

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 11, вул. Казимира Малевича, Київ, 03150, Україна

Автореферат розісланий «18» грудня 2020 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.182.02  
кандидат технічних наук



С. Г. Григоренко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У всьому світі електрошлаковий переплав (ЕШП) застосовують для виробництва високолегованих сталей та сплавів (в тому числі високоміцних, теплостійких і суперсплавів) для відповідальних деталей машин і механізмів, що працюють в жорстких умовах у високотехнологічних галузях промисловості – енергетиці, нафтохімії, металургії тощо. Завдяки рафінуванню складу (видалення домішок) і структури (підвищення щільності, пригнічення ліквіації, усунення пористості і таке інше) при ЕШП формуються високоякісні гомогенні злитки. На найближчий час процеси ЕШП залишаться провідними в отриманні злитків з високолегованих сталей і сплавів, попит на які буде зростати. Однак ЕШП з витратним електродом притаманні: проблеми виготовлення електродів (особливо зі складнолегованих і важкодеформованих сплавів); наявність нижньої межі швидкості плавлення електрода, вихід за яку робить неможливим формування задовільної поверхні злитка; високий перегрів електродного металу і, відповідно, велика глибина металевої ванни і протяжна двофазна зона, яка є однією з причин ліквіації. Невисока продуктивність класичного ЕШП є основою якості злитка, але і зумовлює високі витрати електроенергії і питому собівартість.

Створені останнім часом технології ЕШП у струмопідвідному кристалізаторі за двоконтурною схемою подачі струму дозволяють варіювати в широких межах продуктивністю процесу і покращити умови формування злитків для гарантованого одержання однорідної та бездефектної внутрішньої структури та гладкої поверхні одночасно.

Процес з рідким металом (ЕШП РМ), що реалізовано в промисловості для наплавлення валків (запропоновано академіком Б.І. Медоваром – одним з винахідників сучасного ЕШП), відкрив можливість формування злитка без витратного електрода. Зрозуміло, що геометрія плавильного простору, температурні режими, продуктивність і, відповідно, базові загальні закономірності процесів рафінування і твердіння при ЕШП РМ є відмінними від умов ЕШП з витратним електродом, тож наявні знання не можуть бути перенесені на пряму. Вивчення потребують фізико-хімічні процеси, які відбуваються на межі контакту шлак – метал і при проходженні струменю та крапель рідкого металу через шлакову ванну тощо. Питання впливу технологічних параметрів ЕШП РМ (перегріву та швидкості подачі рідкого металу) на формування суцільних і пошарово-композитних злитків (з мінімальною зоною з'єднання шарів відмінного хімічного складу), особливості формування їх структури при твердінні також потребують теоретичного обґрунтування та експериментальної перевірки. Тому робота, яка спрямована на розробку наукових основ та експериментальне випробування електрошлакового процесу з рідким металом для одержання суцільних та композитних злитків є актуальною, а одержані наукові і практичні результати сприятимуть розширенню сфери його застосування.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема роботи відповідає пріоритетному напрямку науки і техніки України «Новітні

технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі». Виконання роботи пов'язане з планами науково-дослідних робіт Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, у яких автор брала безпосередню участь: «Розробка нового технологічного процесу одержання гетерогенних матеріалів на базі ЕШП для виробництва композитних роторів для енергетичних турбін нового покоління» (2009 – 2011 рр., № ДР 0107U003292); «Розробка на базі ЕШП нового технологічного процесу отримання великовагових литих порожнистих заготовок для корпусів енергетичних і нафтохімічних реакторів замість ковано-зварних та штампозварних» (2009 – 2011 рр., № ДР 0109U000978); «Дослідження електрошлакового процесу виплавки суцільних та порожнистих злитків із теплостійких сталей і сплавів на супернадкритичні параметри (700...750°C)» (2012 – 2014 рр., № ДР 0112U001516); «Створення нового покоління флюсів для сучасних електрошлакових технологій виробництва конструкційних матеріалів» (2012 – 2016 рр., № ДР 0112U001502); «Дослідження карбідної неоднорідності високовуглецевих сталей при ЕШП на високих швидкостях розливки з наперед заданими властивостями» (2015 р., № ДР 0115U002611); «Розробка технології електрошлакового переплаву (ЕШП) для виробництва сучасних залізничних рейок підвищеної зварюваності» (2015 – 2017 рр., № ДР 0115U002612); «Вплив ЕШП на якість заевтектоїдних рейкових сталей та вишукування можливостей застосування їх без термічної обробки» (2015 – 2016 рр., № ДР 0115U005246); «Розробка наукового обґрунтування та створення на основі методів спеціальної електрометалургії та композитних електродів наскрізної технології виробництва сучасних високоміцних сталей для зварних конструкцій» (2017 – 2021 рр., № ДР 0117U001184); «Розробка електрошлакових технологій керування кристалізацією аустенітних жароміцних сталей і сплавів» (2018 – 2020 рр., № ДР 0117U001184).

**Мета та завдання дослідження.** Метою роботи є розробка наукових основ та експериментальне обґрунтування ефективності використання електрошлакового процесу з рідким металом у виробництві злитків суцільного перерізу та композитного хімічного складу з теплостійких та високоміцних сталей.

Відповідно до зазначеної мети в роботі поставлено наступні основні завдання дослідження:

- на основі аналізу сучасних електрошлакових технологій визначити перспективні області застосування нових технологічних схем електрошлакового процесу з рідким металом та доцільність їх використання для виробництва якісних злитків для відповідальних виробів з теплостійких та високоміцних сталей (зокрема композитного ротору для сучасних енергетичних турбін і рейок преміум якості);
- виконати порівняльний аналіз умов протікання фізико-хімічних і тепломасообмінних процесів в системі шлак-метал на основних стадіях процесу при ЕШП з витратним електродом (плівка на торці витратного електрода – крапля – шлак – поверхня металеві ванни) і з рідким металом (струмінь – поверхня металеві ванни);

- провести розрахунок параметрів руху та нагріву крапель в порівнюваних процесах класичного ЕШП та ЕШП РМ у співставних умовах за критеріями подібності;

- методами математичного та фізичного моделювання, за допомогою інженерних розрахунків та експериментальної програми з виготовлення та дослідження металу злитків виконати теоретичне обґрунтування та лабораторну перевірку технологічної схеми ЕШП РМ для виготовлення композиційних роторів з теплостійких сталей для сучасних енергетичних турбін;

- виконати розрахунково-аналітичне обґрунтування гібридного процесу, що поєднує електрошлаковий підігрів меніску металу і безперервне розливання сталі (ЕШП+БР) з метою зменшення швидкості витягування литої заготовки без порушення формування її поверхні для виробництва довгомірної продукції (заготовок залізничних рейок і вісей, важких балок та швелерів тощо) на прикладі прискореного ЕШП рейок з високоміцної сталі;

- виконати оцінку техніко-економічної ефективності застосування нової технологічної схеми ЕШП РМ у порівнянні з класичним ЕШП з витратним електродом;

- розробити практичні рекомендації щодо реалізації отриманих наукових результатів при конструюванні нових печей електрошлакового переплаву і їх впровадження в промислове виробництво.

**Об'єкт дослідження:** електрошлаковий процес з рідким металом (ЕШП РМ) та якість металу суцільних гомогенних та композитних злитків з теплостійких та високоміцних сталей.

**Предмет дослідження:** фізико-хімічні та масообмінні процеси при ЕШП і ЕШП РМ, технологічні режими виплавки злитків ЕШП та ЕШП РМ, процеси формування макро- та мікроструктури литого та деформованого металу, склад і морфологія неметалевих включень, механічні властивості металу ЕШП.

**Методи дослідження.** Відповідно до поставлених задач використовували комплексні сучасні аналітичні, розрахункові та експериментальні методи досліджень металургійних процесів, стандартні методики металографічних досліджень макро- і мікроструктури металу, стандартні методи механічних випробувань металу, професійні пакети математичного моделювання та моделі власної розробки. Термодинамічні розрахунки проводили за допомогою комп'ютерної програми HSC Chemistry.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Уперше експериментально доведено, що при класичному ЕШП плівка на торці електрода не є вирішальною стадією в процесі рафінування від сірки, оскільки у відсутності витратного електрода при ЕШП РМ досягається аналогічний ступінь видалення сірки, що є й доказом повноти взаємодії металу зі шлаком та асиміляції неметалевих включень на межі металевої та шлакової ванн.

2. Уперше розрахунковим порівнянням умов протікання фізико-хімічних і масообмінних процесів в системі шлак-метал при ЕШП з витратним

електродом і з рідким металом встановлено, що приведена до часу площа поверхонь реагування при ЕШП РМ є вдвічі меншою за таку при ЕШП (з коефіцієнтом заповнення 0,6...0,7), а температура металу, що подається до кристалізатора, є на 70...90 К нижчою. Зниження перегріву металу дозволяє збільшити продуктивність процесу ЕШП РМ порівняно з ЕШП до 15% при збереженні такої ж якості злитка.

3. Уперше розрахунковим шляхом за моделлю, яка враховує потоки в об'ємі рідкої краплі, визначено прискорення її руху і збільшення відхилення швидкості від прогнозованої за Стоксом для твердої сфери того ж діаметра, яке зростає зі збільшенням розміру крапель (при діаметрах 3...10 мм на 3...26 %, відповідно).

4. Підтверджено, що ступінь деформації рідких крапель при русі в розплаві шлаку збільшується при зростанні їх розміру (від 0,3 % для краплі діаметром 2 мм до 6 % для краплі 10 мм) і зменшує швидкість їх руху (на 25...30 % для краплі діаметром 10 мм (0,447 проти 0,641 м/с для правильної сфери).

5. Уперше, в струмопідвідному кристалізаторі (СПК) виготовлено прототип ротора – композитний злиток діаметром 180 мм, в якому протяжність перехідної зони змінного складу є меншою за 11 % діаметра злитка (15...20 мм). За прогнозом математичної моделі протяжність цієї зони в злитках діаметром 700 і 1200 мм складе 12...15 % (100...120 і 150...160 мм, відповідно).

6. Одержали подальший розвиток уявлення про можливості зменшення швидкості розливання на МБЛЗ шляхом електрошлакового підігріву меніску (процес ЕШП+БР) з метою покращення внутрішньої структури заготовок (на прикладі рейкового металу). Моделювання тверднення заготовки діаметром 500 мм з підігрівом меніску СПК прогнозує скорочення швидкості розливання в 2 рази, що зменшить глибину металевої ванни/лунки в 3 рази і протяжність двофазної зони на 35 %.

7. Проектуванням технологічного процесу ЕШП РМ виготовлення злитків суцільного перерізу діаметром 500...2500 мм показано, що при характерній для ЕШП з витратним електродом та адекватно підвищеній (до 15 % за рахунок зниженого перегріву металу) продуктивності процесу ЕШП РМ розливання металу може бути тільки порційним. Маса порції визначається властивостями металу та конструкцією розливального пристрою.

**Практичне значення отриманих результатів.** Визначені в роботі особливості перебігу тепломасообмінних процесів і формування структури при електрошлаковому процесі з витратним електродом та рідким металом створили наукове підґрунтя для покращення ефективності та економічності виробництва злитків з теплостійких й високоміцних сталей, зокрема:

- виготовлений композитний злиток з мінімізованою зоною змішування сталей є реальним прототипом ротора для сучасних енергетичних турбін з надультрасуперкритичною (НУСК) температурою пари. Результати дослідження складу і структури металу злитка-прототипу надають підстави для початку пілотного випробування в промислових умовах за режимами, які

прогнозовано для злитків реального розміру верифікованою математичною моделлю;

- науково обґрунтовано та експериментально перевірено умови організації електрошлакового підігріву меніску, які дозволяють зменшити швидкість розливання на машинах безперевного лиття заготовок (МБЛЗ), що покращує якість внутрішньої структури заготовок;

- розроблено перспективні технічні рішення і схеми ЕШП для виробництва заготовок преміум якості для магістральних колій та/або вістряків зі старих рейок, що гарантує економічну їх переробку з мінімальними втратами легуючих;

- надані рекомендації щодо удосконалення технології виплавки електрошлакового металу (керування швидкістю процесу з метою підвищення рівня якості та стабільності комплексу властивостей теплостійких та високоміцних сталей) передано ПрАТ «Дніпроспецсталь» для використання у виробничому процесі в ЕСПЦ №5;

- теоретичні положення, нові прикладні результати та методики, що розроблено в дисертаційній роботі, впроваджено в лекційному курсі та використовуються при виконанні магістерських дипломних робіт студентами Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»;

- доведено технічну та економічну доцільність застосування електрошлакового процесу з рідким металом для виробництва злитків суцільного перерізу великого діаметра (при однаковій продуктивності з ЕШП він може забезпечити економію витрат на електроенергію до 35...57 %, а при підвищеній на 15 % – до 45...63 %).

**Особистий вклад здобувача.** В роботах, виконаних у співавторстві здобувачу належить наступне: планування експерименту, аналіз технологічних режимів і результатів досліджень порівняння фізико-хімічних процесів та десульфуючої здатності під час ЕШП і ЕШП РМ, участь в оформленні результатів досліджень та висновків [1, 17, 26]; аналітичний підбір складу шлаків для ЕШП та за допомогою металографічних досліджень оцінка впливу тієї чи іншої шлакової композиції на структуру та властивості металу ЕШП [2, 4, 15, 16]; аналіз та узагальнення літературних даних, планування експериментів та підбор технологічних режимів виплавки пошарових композитних злитків, підготовка зразків та дослідження структури та неметалевих включень в металі композитних злитків ЕШП РМ, формулювання завдання для математичного моделювання [3, 13, 25, 27, 28]; аналіз можливостей та перспектив сучасних процесів ЕШП в одержанні сталей особливо високої якості [22]; проведення методами оптичної та растрової електронної мікроскопії досліджень структури металу злитків ЕШП та ЕШП РМ лабораторної виплавки. Оцінка морфології, розподілу та поведінки неметалевих включень в структурі металу на всіх етапах процесів ЕШП та ЕШП РМ. Аналіз та систематизація експериментальних даних, що отримані в результаті досліджень, спрямовані на встановлення закономірностей впливу

умов процесів ЕШП та ЕШП РМ на формування структури, властивості металу та поведінку неметалевих включень [6, 7, 8, 11, 12, 23]; постановка завдань та перевірка достовірності теоретичних розрахунків та математичного моделювання [9, 24]; апробація розробленої технології, планування експерименту та підготовка заявки на винахід [10]; аналіз та узагальнення літературних даних, підготовка зразків та проведення досліджень методами оптичної та скануючої електронної мікроскопії, вимірювання мікротвердості, підготовка зразків під контактну-стикове зварювання з оплавленням задля визначення закономірностей формування структури та властивостей високоміцної рейкової сталі та визначення перспективних технологій виробництва сучасних рейок преміум якості [5, 14, 18, 19, 20, 21, 29].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати роботи були оприлюднені та обговорено на наукових конференціях і семінарах, у тому числі: 9th Intern. Conf. on Clean Steel (8 – 10 September, 2015, Budapest, Hungary); 20th International Foragemasters Meeting – IFM2017 (11 – 15 September, 2017, Graz, Austria); 3rd Intern. Conf. Advances in Metallurgical Processes and Materials (10 – 13 June, 2018, Lviv, Ukraine); 7th International Congress on Science and Technology of Steelmaking: The Challenge of Industry 4.0 ICS 2018 (13 – 15 June 2018, Venice, Italy); 4th Young Professionals International Conference YPIC2018 (29 – 31 August 2018, Yutz, France); 3d Intern. Conf. Ingot Casting Rolling Forging ICRF -2018 (16 – 19 October, 2018, Stockholm, Sweden); 10<sup>th</sup> Intern. Conf.: Advanced Materials and Technologies. From idea to market (24 – 26 October, 2018 Ninghai, China); 5th Young Professionals International Conference YPIC2019 (4 – 6 July, 2019, Budapest, Hungary); International Congress on Welding Additive Manufacturing ICWAM 2019 (5 – 7 June 2019, Metz, France); Intern. Conf. on Joining Welding Additive Manufacturing JWAM 2020 (29 – 31 January 2020, Tel Aviv, Israel); на міжнародних конференціях «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні і споріднених технологіях (м. Одеса, Україна, 2012, 2014, 2016, 2018, 2020 pp.); конференції студентів, аспірантів і молодих науковців «Зварювання та споріднені процеси і технології», (4 – 8 вересня 2012 р., м. Миколаїв, Україна); міжнародній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» (2013, 2015, 2017 pp., м. Київ, Україна); міжнародній конференції "Зварювання та споріднені технології – сучасне і майбутнє" (2013, 2018 pp., м. Київ, Україна).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 29 наукових праць, в тому числі 16 статей надруковано у спеціалізованих виданнях, що внесені до переліку фахових видань України, 5 робіт внесені до реєстру міжнародних наукометричних баз SCOPUS/WoS і 8 тез та статей доповідей на науково-практичних конференціях.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 339 найменувань. Дисертація має загальний обсяг 300 сторінок, містить додатків на 2 сторінках, 135 ілюстрацій та 32 таблиці.



## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, надано її загальну характеристику, висвітлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані щодо апробації результатів дисертаційної роботи, публікації, що відображають її зміст. Зазначено внесок здобувача в публікаціях, підготовлених автором як особисто, так і за участю співавторів.

У **першому розділі** виконано аналіз можливостей та перспектив сучасних процесів ЕШП в одержанні сталей особливо високої якості. Показано, що сьогодні принципово існує два типи ЕШП: традиційні електрошлакові технології із застосуванням витратних електродів ЕШП (ESR) та електрошлакові процеси без витратних електродів з подачею рідкого металу (ЕШП РМ) (Electroslag Remelting by Liquid Metal (ESR LM)). Стандартною практикою сучасних технологій ЕШП сьогодні є захист плавильного простору інертним газом (найчастіше – в закритій камері), в тому числі з використанням вакууму та активної атмосфери азоту за підвищеного тиску.

Створені останнім часом технології ЕШП за двоконтурною схемою подачі струму (ЕШП ДС), електрошлакове наплавлення рідким металом (ЕШН РМ) та електрошлакові процеси формування суцільних та порожнистих злитків з рідкого металу (ЕШП РМ) дозволяють варіювати швидкістю подачі металу, що надає можливість оптимізувати умови формування злитків для гарантованого одержання однорідної та бездефектної внутрішньої структури і гладкої поверхні. Попередній досвід показав наступні переваги технологій ЕШП з подачею рідкого металу у струмопровідній кристалізатор над класичним ЕШП з витратним електродом: периферійне струмопідведення разом з подачею рідкого металу дозволяє варіювати швидкість формування злитка в широких межах; металева ванна може бути мілкою та пласкою і, навіть, мати в центрі меншу глибину, ніж по краях; ступінь розвитку ліквідаційних процесів знижується; забезпечується гнучкість технологічного процесу; зменшується собівартість процесу за рахунок відсутності витрат на виготовлення витратних електродів (40...60% вартості виробництва злитка ЕШП); стає можливим виготовлення складнолегованих та важкодеформованих сплавів, для яких виробництво витратного електрода суттєво ускладнено або неможливо; окрім суцільних і порожнистих злитків можна виготовляти композитні вироби з коаксіальними і горизонтальними шарами (ротори, прокатні вали, шестерні тощо) з мінімізованою зоною змішування (в тому числі різнорідних металів, наприклад сталь-мідь). За результатами виконаного літературного огляду сформульовано мету і задачі дослідження для вирішення обраної наукової проблеми.

У **другому розділі** виконано порівняльний аналіз умов протікання фізико-хімічних і тепломасообмінних процесів на основних поверхнях взаємодії (плівка на торці витратного електрода, крапля в шлаку, струмінь, контакт шлакової та металеві ванн) електрошлакового переплаву (ЕШП) з витратним електродом і з рідким металом (ЕШП РМ). Проведено порівняння рафінуючої

здатності ЕШП та ЕШП РМ у співставних умовах (однакова марка сталі, однакова кількість і хімічний склад шлаку) та чистоти одержуваного металу за неметалевими включеннями (НВ). При традиційному ЕШП перегріта (до 1873...2073 К) за рахунок її електричного опору шлакова ванна повільно плавить торець витратного електрода. При цьому є кілька поверхонь взаємодії: рідка плівка на торцевій поверхні електрода ( $S_1$ ); краплі рідкого металу, що падають ( $S_2$ ); поверхня контакту між шлаковою і металевою ваннами ( $S_3$ ) (рис. 1).

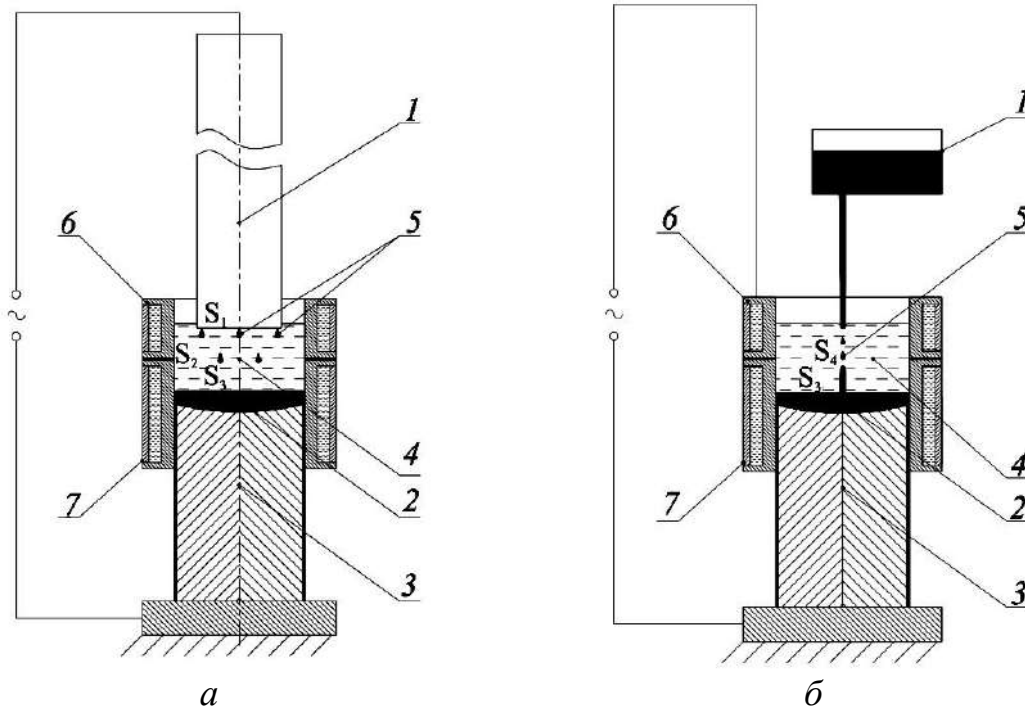


Рис.1. ЕШП з витратним електродом (а) і рідким металом (б): 1 – витратний електрод (а), пристрій для розливання металу (б); 2 – ванна рідкого металу; 3 – злиток; 4 – рідкий шлак, 5 – краплі рідкого металу з витратного електрода (а), струмінь рідкого металу (б); 6, 7 – секції кристалізатора, що охолоджуються водою.  $S_1$ – $S_4$  – поверхні взаємодії рідкого металу зі шлаком

Показано, що при ЕШП РМ температура металу, що подається в плавильний простір на 70...90 К нижча та приведена до часу поверхня взаємодії є меншою за причини відсутності плівки на торці електрода і меншої площі поверхні крапель та струменю.

В лабораторних експериментах ЕШП РМ при виливанні порції струмінь рідкого металу мав діаметр 10...15 мм і частково розбивався на краплі меншого розміру. Для розрахункової оцінки поверхонь взаємодії обрали одну і ту саму для двох процесів масову швидкість подачі 160 кг на годину, яка є характерною для стаціонарної стадії процесу переплаву злитка діаметром 180 мм. Для ЕШП РМ було прийнято, що струмінь має діаметр 10 мм, а краплі становлять 15 % маси металу з рівним розподілом кількості за розміром (6...9 мм). Порівняння площини наявних в обох процесах поверхонь взаємодії (табл.1) виразили як долю поверхні металевої ванни, яку було прийнято за одиницю.

Таблиця 1. Характеристики крапель/струменю в порівнюваних процесах ЕШП, що існують в системі протягом 1 с за однакової масової продуктивності 0,044 кг/с

Процес		Діаметр, м·10 <sup>3</sup>	Кількість крапель, шт. або довжина струменю, м	Маса, кг·10 <sup>3</sup>	Сумарна площа поверхні, м <sup>2</sup> ·10 <sup>4</sup>	Час руху крапель/струменю в шлаці, с	Загальна поверхня взаємодії з урахуванням часу руху в шлаці, м <sup>2</sup> ·10 <sup>4</sup>
ЕШП, краплі		2	140	4,1	17,58	0,841	14,79
		3	80	7,9	22,61	0,627	14,18
		4	60	14,0	30,14	0,526	15,86
		5	40	18,3	31,41	0,477	14,98
		Разом	320	44,3	101,74	-	59,81
ЕШП РМ	Струмінь 0,01 м (0,85 маси)	10	0,069	37,8	23,16	0,041	23,16
	Краплі (0,15 маси)	6	1	0,79	1,13	0,445	0,503
		7	1	1,26	1,54	0,422	0,65
		8	1	1,88	2,01	0,403	0,81
		9	1	2,67	2,54	0,388	0,99
	Разом	4	44,1	30,38	-	26,11	

Визначено, що площа поверхні крапель при ЕШП завдяки невеликому їх розміру становить 0,23 загальної поверхні взаємодії в процесі при врахуванні швидкості їх руху в шлаку, а без такого – 0,4, що не дозволяє нехтувати стадією краплі у видаленні домішок. До того ж завдяки невеликому розміру крапель шлях дифузії домішок в шлак є ще і найкоротшим порівняно з таким для інших поверхонь взаємодії (рис. 2).

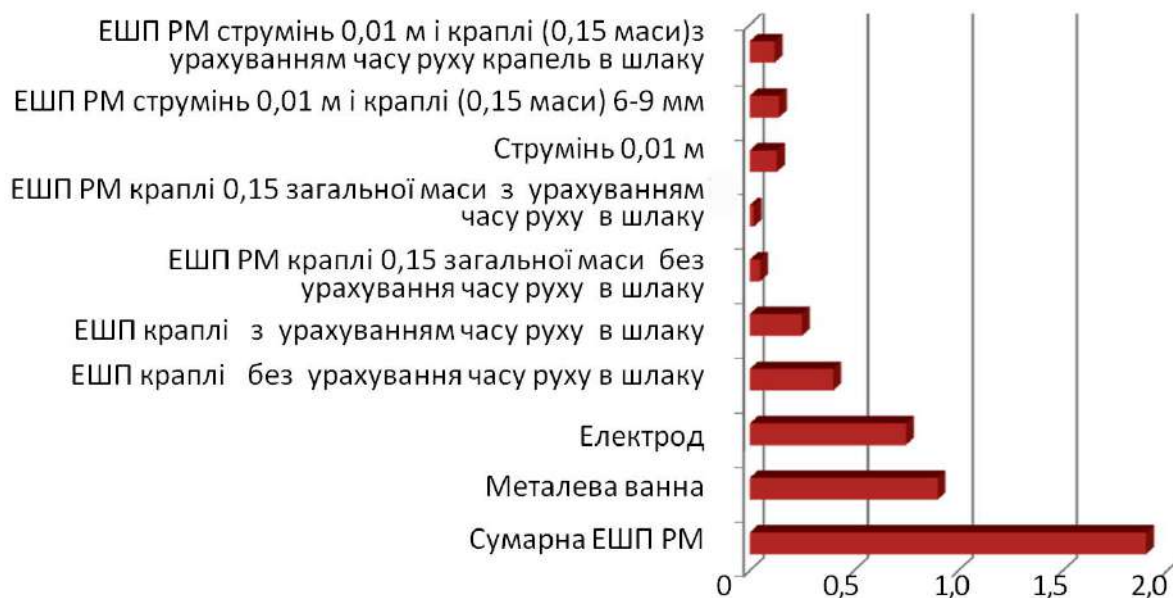


Рис. 2. Величини поверхонь взаємодії шлаку з металом при ЕШП та ЕШП РМ (в долях поверхні металеві ванни)

Прямим експериментальним порівнянням ЕШП з витратним електродом та без такого показано, що плівка на торці електрода не є вирішальною

рафінувальною стадію в процесі ЕШП. Взаємодія відбувається на всіх поверхнях контакту металу та шлаку. Експериментальне порівняння десульфуруючої здатності процесів ЕШП та ЕШП РМ у зазначених співставних умовах показало, що ступінь рафінування металу в процесі ЕШП РМ є аналогічним і не меншим за такий при класичному ЕШП: вміст сірки в металі злитків становить 0,009 мас. %, й ступінь десульфурації – 66 %. Зниження вмісту сірки і зростання супеню десульфурації в голові злитку ЕШП РМ (до 0,007 мас. % та 74 %, відповідно), спричинено додатковим рафінуванням сталі при її витримці в тигельному/розливному пристрої. Це дає принципову можливість працювати з двома шлаками: в підігрівально-розливному пристрої (ПРП) (в нашому випадку - тиглі) та кристалізаторі.

Чистота металу за НВ злитків ЕШП та ЕШП РМ є ідентичною. Виявлено три типи НВ – Mn-S, Al-O, Al-O-Mn-S-Si, які є характерними для ЕШП під шлаком АНФ-94 ( $37\text{CaF}_2/19\text{Al}_2\text{O}_3/16\text{CaO}/17\text{SiO}_2/9\text{MgO}$ ), з максимальним розміром 3...7 мкм. Аналогічність НВ є додатковим підтвердженням збіжного ступеню десульфурації та загалом свідчить про схожість рафінувальних процесів при ЕШП та ЕШП РМ.

У третьому розділі за критеріями подібності проведено розрахунок параметрів руху та нагріву крапель рідкого металу в шлаку в процесах ЕШП з витратним електродом і з рідким металом. Оцінку характеру руху краплі через шлак проводять зазвичай за Стоксом, при цьому крапля є твердою сферою, що для рідких крапель потребує уточнення. Запропоновано наступні варіанти для розрахунку, що відрізняються від класичного для твердої сфери: крапля рухається з прискоренням з урахуванням потоків в її об'ємі та деформація краплі відсутня; враховано неоднорідність руху і деформацію краплі. Для розрахунку прийняли схему руху краплі в шлаковій ванні, де  $d$  – діаметр краплі,  $F_G$  – сила тяжіння,  $F_A$  – сила Архімеда,  $F_D$  – сила опору руху краплі в шлаку (рис. 3).

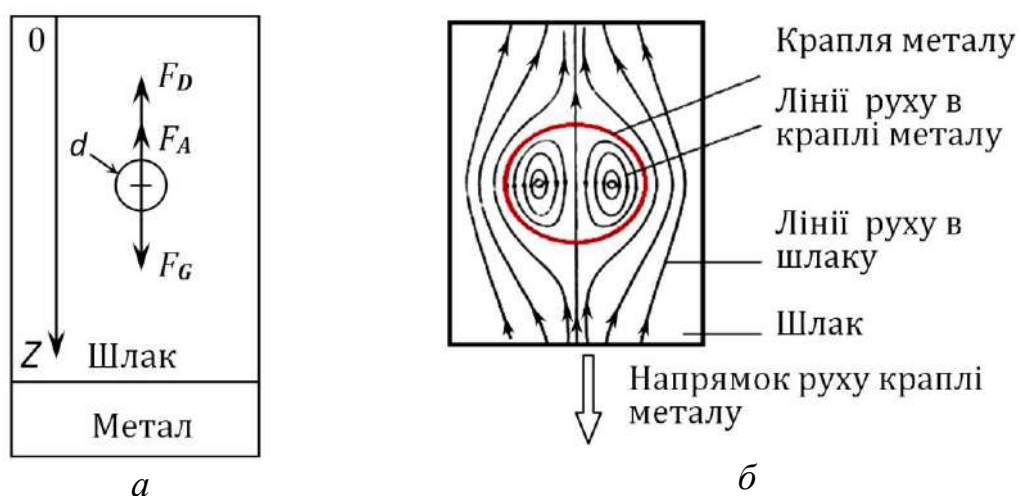


Рис. 3. Схема сил, що діють на рідку краплю металу діаметром  $d$ , яка падає з електрода (ЕШП) або виникає при подрібненні струменю (ЕШП РМ) (а) та характер руху в її об'ємі (б)

Характер руху крапель різного діаметра в розплавленому шлаку виконали використовуючи критерії подібності: Архімеда ( $Ar$ ), Рейнольдса ( $Re$ ), Нуссельта ( $Nu$ ).

Рівняння, що пов'язують сили, які діють на краплю в рідині при сталому русі в безрозмірній формі, має вигляд:

$$C_D \cdot Re^2 = \frac{4}{3} Ar \quad (1)$$

де  $C_D$  – коефіцієнт опору краплі, який залежить від режиму течії.

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} \cdot \frac{2+3\mu^*}{3+3\mu^*} & Re < 1 \\ \frac{C_{D0}(Re) + \mu^* \cdot C_{D\infty}(Re)}{1 + \mu^*} & 1 < Re < 500 \\ 0,44 & 5000 < Re \end{cases} \quad (2)$$

де  $C_{D0} = 17,325 \cdot Re^{-0,947} + 0,341$  – опір краплі (в припущенні, що крапля рухається з урахуванням потоків в її об'ємі);

$$C_{D\infty} = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}} \text{ – опір краплі (в припущенні, що вона є тверда сфера);}$$

$$\mu^* = \mu_m / \mu_s \text{ – відношення динамічних в'язкостей метала і шлаку.}$$

Другим важливим моментом є нестационарність процесу руху. Початкова швидкість краплі дорівнює нулю, а стала швидкість, що визначається за рівнянням (1) буде досягнута краплею вже при виході з шлаку. Тому для розрахунку часу руху краплі необхідно вирішити рівняння:

$$\frac{dU}{d\tau} = g \cdot \frac{(\rho_m - \rho_s)}{\rho_m} - \frac{3 \cdot \rho_s \cdot C_D(Re)}{4 \cdot d \cdot \rho_m} U^2. \quad (3)$$

Дане диференціальне рівняння не вирішується аналітично через складну залежність  $C_D$  від швидкості  $U$ . Тому для його рішення використовуємо чисельний метод. Отримане рішення має вигляд  $U = f(\tau)$ . Для отримання часу руху краплі через шар шлаку  $H$  необхідно вирішити наступне рівняння:

$$\int_0^{\tau_k} U(\tau) d\tau - H = 0. \quad (4)$$

Визначивши час руху та швидкість, можна розрахувати безрозмірну температуру  $\theta = \frac{t_s - t_{Me}}{t_s - t_{Me}^0}$ , яку набуває крапля в шлаку. При значенні  $\theta=1$  крапля не нагрілась, а при  $\theta=0$  крапля досягла температури шлаку.

Було виконано розрахунки для оцінки розбіжності в розрахунку часу проходження краплею шару шлаку за наведеною моделлю та за Стоксом. Виражену у відсотках різницю позначили  $\Delta$  (%). Розрахунки показали суттєвий вплив введеного уточнення, яке враховує ефект руху металу всередині краплі порівняно з результатами розрахунків за Стоксом.

За обраних умов і теплофізичних параметрів матеріалів, що задано в цьому розрахунку для процесів ЕШП, крапля рідкого металу, наприклад, діаметром 9 мм, рухається в рідкому шлаку на 26 % швидше ніж тверда сфера такого ж діаметра (табл. 2).

Таблиця 2. Режими руху і нагріву крапель різного діаметра/маси в шарі шлаку висотою 0,2 м

Діаметр, мм/ Маса, мг	Швидкість, м/с	Час, с	$\theta$	Re	Nu	$\Delta$ , %
2/29,3	0,246	0,841	0,003	136,3	13,2	3,6
3/98,9	0,341	0,627	0,067	282,6	18,1	6,8
4/234	0,421	0,526	0,202	464,3	22,6	10,3
5/458	0,475	0,477	0,337	656,9	26,6	13,2
6/792	0,521	0,445	0,449	863,6	30,2	15,9
7/1260	0,562	0,422	0,537	1088	33,6	18,5
8/1880	0,601	0,403	0,607	1330	36,9	21,1
9/2670	0,637	0,388	0,661	1587	40,2	26,0
10/3670	0,672	0,376	0,705	1858	43,3	26,4

Краплі рідкого металу в розплавленому шлаку в процесі їх руху зазнають деформацію і переходять у форму сплющеного сфероїда у напрямку їх руху, що впливає на ступінь їх нагрівання та швидкість. Тому однією із задач в роботі була оцінка ступеню деформації крапель розміром 2...10 мм та його вплив на їх нагрів і швидкість руху за моделлю, яка враховує неоднорідність руху і в ній передбачено, що сферична крапля переходить у форму сфероїда під час свого руху в шарі розпаленого шлаку.

Для обчислення коефіцієнта лобового опору деформованої краплі  $\bar{C}_D$  використовуємо наступну залежність:

$$\bar{C}_D = (1 - f)C_{D,sphere} + fC_{D,disc}, \quad (5)$$

де  $f = 1 - E^2$ ,  $E = \frac{b}{a} = \frac{1}{y^3}$  – відношення малої півосі сплющеного сфероїда до

великої (в граничних випадках маємо: для сфери  $E = 1$ , для безкінечно тонкого диска  $E = 0$ ):

$$C_{D,sphere} = \begin{cases} \frac{24}{\bar{Re}}, & \bar{Re} < 0,2; \\ \frac{24}{\bar{Re}} + 3,6\bar{Re}^{-0,317}, & 0,2 < \bar{Re} < 4; \\ \frac{24}{\bar{Re}} + 4\bar{Re}^{-0,333}, & 4 < \bar{Re} < 400; \\ \frac{24}{\bar{Re}} + 5,48\bar{Re}^{-0,573} + 0,36, & 400 < \bar{Re} < 10^4; \end{cases} \quad (6)$$

$$C_{D,disc} = 1,1 + \frac{64}{\pi \bar{Re}}, \quad (7)$$

де  $\bar{Re} = \frac{\rho_s u D_0 y}{\eta_s}$  – число Рейнольдса, обчислене з урахуванням зміни діаметра

міделевого перерізу краплі у формі сфероїда.

Встановлено, що для краплі кожного діаметра існують відповідні умови, при яких вона досягає своєї сталої швидкості руху та температури в залежності від часу руху та відстані від поверхні шлакової ванни. Краплі дрібного розміру

(2...4 мм) сталий режим руху досягають досить швидко за 0,1...0,3 с і на відстані 10...40 мм від поверхні. Вони встигають за час свого руху в рідкому шлаку набути його максимальної температури 2073 К. Краплі більшого розміру (10 мм) не встигають протягом свого руху в розплаві шлаку висотою 200 мм набути максимальної температури, та досягають лише температури 1973 К, що на 90...100 К нижче.

Краплі дрібного розміру (2...4 мм) мають мінімальний ступень деформації (до 0,3 %), що не впливає ані на швидкість їх руху, ані на температурні умови, на відміну від крапель більшого розміру. Краплі діаметром 10 мм деформуються з коефіцієнтом деформації 6 %, що зменшує їх швидкість руху на 25...30 % (0,447 проти 0,641 м/с для сфери).

Слід відмітити, що при ЕШП з витратним електродом розмір крапель менший і, відповідно, вони рухаються повільніше і нагріваються більше. Це корисно з точки зору рафінування (висока температура і розвинена поверхня взаємодії), але погіршує умови тверднення злитка (зайвий перегрів металу). Навпаки, порівняно великий розмір крапель, на які дробиться струмінь, або їх відсутність, створюють умови для скорочення взаємодії зі шлаком, але одночасно покращують умови формування злитка, оскільки зниження перегріву металу при ЕШП РМ порівняно з класичним ЕШП сприяє зменшенню обсягу ванни рідкого металу.

**У четвертому розділі** представлено результати застосування ЕШП РМ для отримання прототипу злитків для виготовлення композитних роторів для енергетичних турбін нового покоління з теплостійких сталей 12Х13 та 38ХНЗМФА.

ЕШП РМ в струмопідвідному кристалізаторі (СПК) придатний для послідовного пошарового формування горизонтальних шарів великовагового злитка й наплавлення другого шару на тверду заготовку (попередньо отриману будь-яким переплавним процесом) з мінімізованою зоною змішування сталей різного складу. В роботі розглянуто варіант наплавлення другого шару на готову заготовку.

В рамках виконання роботи за допомогою математичного моделювання вирішили наступні завдання:

- визначення поля електричного потенціалу в рідкій шлаковій ванні і відповідного тепловиділення;
- розрахунок температурного поля в шлаковій та металевій ваннах;
- прогнозування глибини проплавлення злитка в залежності від технологічних параметрів процесу.

Розподіл електричного потенціалу  $U(r, z, t)$  в шлаковій ванні при відповідних граничних умовах:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \sigma \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r \cdot \sigma \cdot \frac{\partial U}{\partial z} \right) = \frac{\partial U}{\partial t}. \quad (8)$$

Тепловиділення в шлаку з відомим розподілом потенціалу описано розподіленним об'ємним джерелом тепла в шлаковій ванні, що для точки  $(r, z)$  в момент часу  $t$  визначається за формулою:



$$W(r, z, t) = \sigma(T) \cdot \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

Рівняння для визначення температурних полів при відповідних умовах має наступний вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r \cdot \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + r \cdot W(r, z, t) = r \cdot c\gamma \cdot \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (10)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу в точці  $(r, z)$ ;  $c\gamma$  – об'ємна теплоємність матеріалу в точці  $(r, z)$ .

Прогнозуванням за математичною моделлю продемонстровано можливі шляхи оптимізації параметрів СПК для отримання композитних злитків діаметром до 1200 мм з гарантованою якістю перехідної зони двох сталей та мінімізованою глибиною проплавлення. Показано, що збільшення висоти розділової секції кристалізатора (з 50 до 300 мм) забезпечує рівномірне розплавлення торця вихідної заготовки великого діаметра (до 1200 мм) за всією площею поперечного перерізу ( $11,3 \cdot 10^6 \text{ мм}^2$ ) та формування металевої ванни глибиною 100...120 і 150...160 мм для злитків діаметрами 700 і 1200 мм, відповідно. Збільшення часу підігріву торця заготовки шлаком для злитків діаметром 700 мм – 143...144 хв та для злитків діаметром 1200 мм – 300...330 хв забезпечує гарантоване підплавлення вихідної заготовки. Прогнозовано зону змішування до 12...15 % від їх діаметрів (рис. 4).

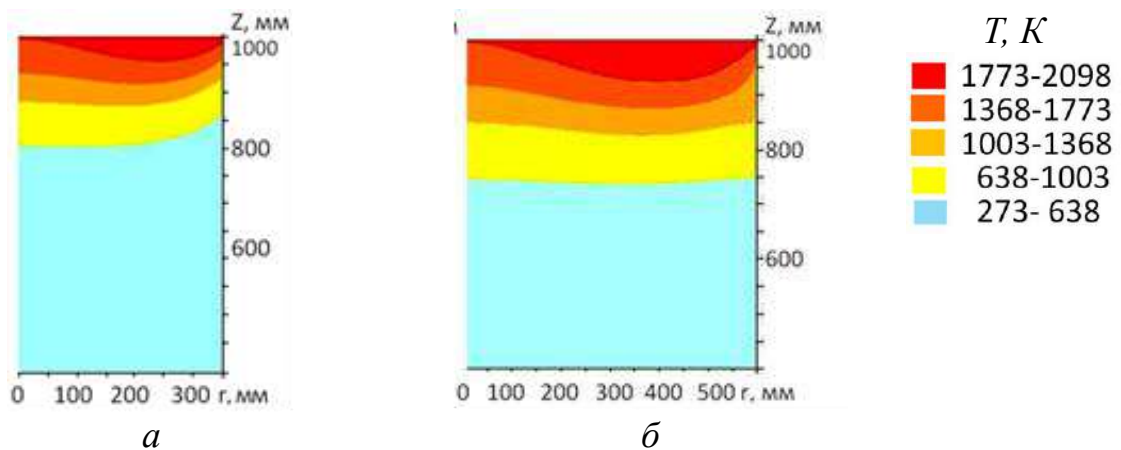


Рис. 4. Розподіл температури вихідної заготовки хімічного складу *A* перед подачею порції рідкого металу хімічного складу *B* при ЕШП РМ і в перетині злитка:  $D=700$  мм,  $H_{роз}=110$  мм,  $W=1200$  кВт, час розігріву 143 хв (*a*) та  $D=1200$  мм,  $H_{роз}=300$  мм;  $W=6240$  кВт; товщина шару шлаку 400 мм, час розігріву 330 хв (*б*)

Верифікація розробленої математичної моделі за глибиною проплавлення та розподілом хімічних елементів в лабораторних злитках ЕШП РМ показала відхилення результатів розрахунків від експериментальних даних 10...12 %, що робить її придатною для практичних розрахунків.

Виправку прототипу композитного ротора проводили в лабораторних умовах ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України у СПК діаметром 180 мм з витягуванням злитку донизу (рис. 5).



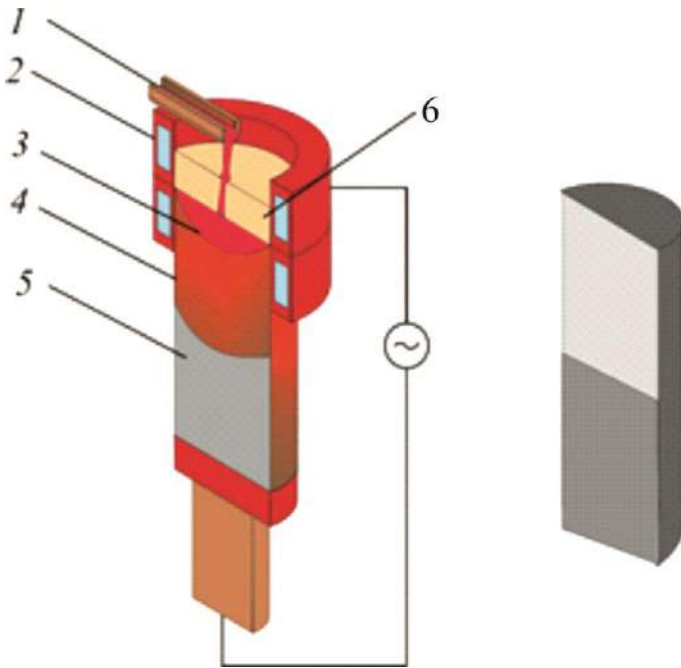


Рис.5. Схема виготовлення методом ЕШП РМ композитного злитку: 1 –пристрій для подавання рідкого металу; 2 – струмопідвідний кристалізатор; 3 – металева ванна; 4 – метал, що наплавляється, хімічного складу А (38ХНЗМФА); 5 – вихідна заготовка хімічного складу Б (12Х13); 6 – шлакова ванна

Рідкий метал одержали з витратного електрода зі сталі 38ХНЗМФАШ (що попередньо отриманий в лабораторних умовах шляхом ЕШП) в електрошлаковій тигельній печі. На попередньо підігріту в кристалізаторі шлаковим розплавом протягом 15 хв торцеву поверхню заготовки зі сталі 12Х13 здійснювали порційну подачу рідкої сталі 38ХНЗМФАШ (порції масою 2,5...3,0 кг).

Формування з'єднання двох сталей та подальшу кристалізацію частини злитка зі сталі 38ХНЗМФА проводили у СПК під шлаком АНФ-94 за наступними технологічними режимами: потужність при стаціонарному режимі 250...300 кВ·А, швидкість процесу наплавлення в середньому 10 мм/хв. Рівень металу в кристалізаторі підтримували постійним шляхом подачі порцій рідкого металу. Продуктивність процесу наплавлення – 120 кг/г. Під час проведення дослідної плавки здійснювали постійний контроль та реєстрацію технологічних параметрів процесу ЕШП РМ (рис.6,б).

З модельного злитка-прототипу композитного ротора вирізали центральний поздовжній темплет для оцінки структури та хімічного складу зони з'єднання двох сталей (рис. 6, а).

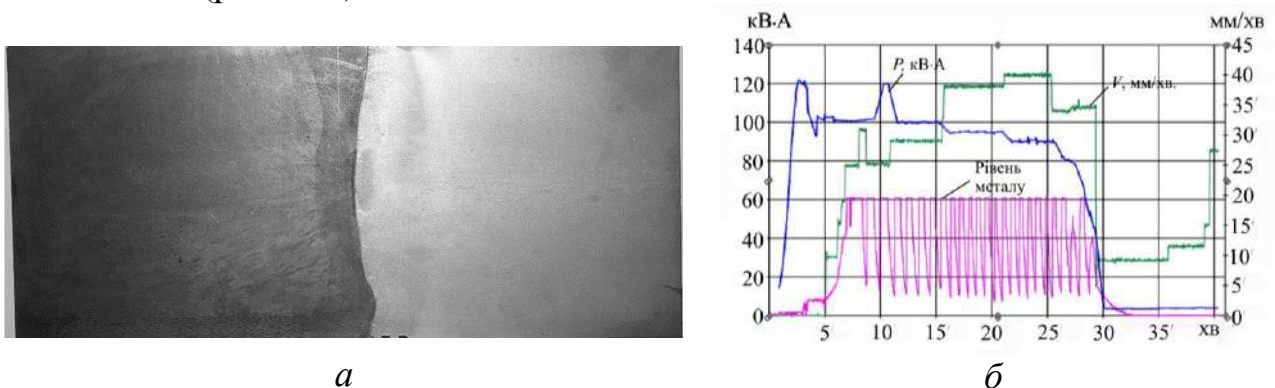


Рис. 6. Макроструктура поздовжнього темплету композитного злитка (а) та фрагмент технологічного режиму його виплавки (б)

Зона з'єднання має однорідну та щільну структуру. Пор, шлакових включень, розшарувань та тріщин не виявлено. Максимальна глибина проплавлення становить не більш 15...20 мм, що складає 8...11 % від діаметра зливка. Результати рентгеноспектрального хімічного аналізу показують, що зона змішування сталей 12Х13 і 38ХНМФА має перемінний склад. Спостерігається поступове зниження вмісту хрому (з величини характерної для сталі 12Х13) та підвищення вмісту нікелю (до вмісту, характерного для сталі 38ХНМФА) (рис. 7).

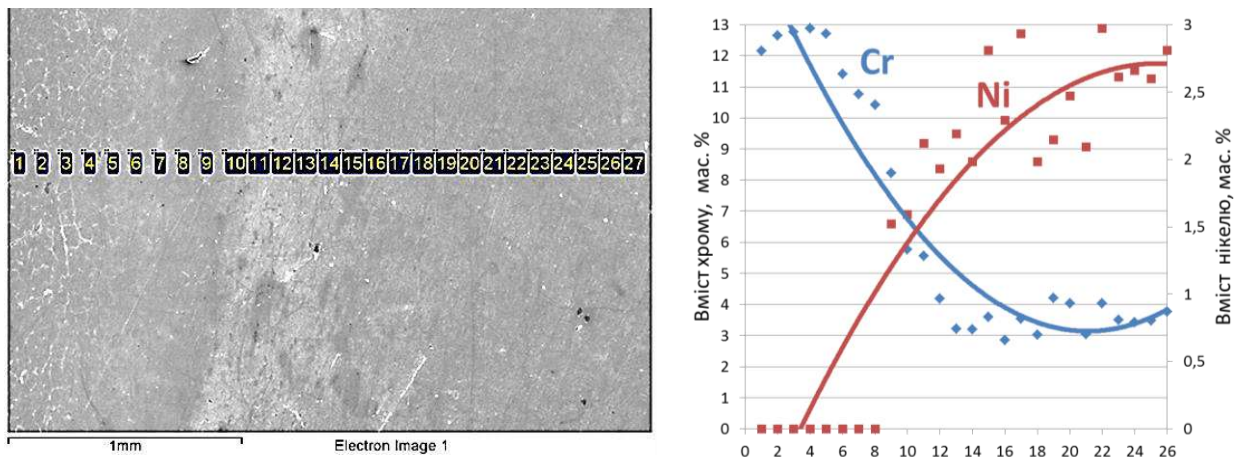


Рис. 7. Лінійний розподіл Cr та Ni по перетину композитного зливка

Аналіз отриманих термокінетичних діаграм (ТКД) термічного циклу при ЕШП РМ показує, що в зоні з'єднання сталей 12Х13 та 38ХНЗМФА можливе утворення перліту, бейніту та мартенситу. За швидкості охолодження при ЕШП РМ меншої за 0,9 °С/с забезпечується формування перлітної або перлітно-бейнітної структури з прийнятним рівнем твердості (2000...3000 МПа), що гарантуватиме відсутність ризику утворення холодних тріщин і руйнування в зоні з'єднання. Це свідчить про сприятливі умови обраних режимів для формування композитного зливка зі сталей 12Х13 та 38ХНЗМФА без утворення в зоні з'єднання критичних структур, які можуть привести до його руйнування.

Оцінка твердості за Брінелем в зоні з'єднання композитного зливка ЕШП РМ свідчить про плавний перехід однієї сталі в іншу без утворення дефектів з високою твердістю. Рівень твердості зони з'єднання композитного зливка відповідає властивостям марок сталей 38ХНЗМФА та 12Х13. Отримані значення межі міцності відповідають вимогам до матеріалів в стані після гартування і відгартування (не менше 1180 МПа для сталі 38ХНЗМФА і не менше 539 МПа для 12Х13), в тому числі для зони з'єднання в литому стані без термічної обробки.

Оскільки термічна обробка (ТО) є невід'ємною частиною технологічного процесу виготовлення композитних роторів, то обрали два режими, що є характерними для сталей 38ХНЗМФА (ТО<sub>1</sub>) і 12Х13 (ТО<sub>2</sub>). Досліди провели на зразках, що вирізали із зони з'єднання зливка з поздовжнього темплету.

На основі термодинамічного аналізу (розрахунки рівноваги газ-шлак-метал та діаграм фазової стабільності для підсистеми Fe-C-Cr) встановлено, що більш

сприятливим режимом термічної обробки з точки зору уникнення формування критичних дефектів в структурі металу зони з'єднання композитного злитку зі сталей 38ХНЗМФА та 12Х13 є гартування при температурі 1323 К та відгартування при 923 К, що відповідає режиму для сталі 12Х13.

Металографічні дослідження мікроструктури зони з'єднання зразків композитного злитка після  $ТО_1$  та  $ТО_2$  показали, що в обох випадках зона має структуру дрібнопластинчастого відпущеного мартенситу з більш однорідним розміром первинного зерна ніж без таких (рис.8, табл.3).

Розміри первинного зерна зони з'єднання композитного злитка наведені в табл. 3.

Таблиця 3. Розмір зерна зони сплавлення композитного злитка

Тип зразка	Розмір зерна, мкм		
	12Х13	Лінія з'єднання	38ХНЗМФА
Без $ТО$	79,64	51,18	91,25
Після $ТО_1$	23,04	18,78	27,58
Після $ТО_2$	18,99	15,09	18,17

*Примітка:*  $ТО_1$  - режим для сталі 38ХНЗМФА: гартування  $T_g=1123$  К (масло),  $\tau = 60$  хв; відгартування  $T_g=873$  К,  $\tau=150$ хв.  $ТО_2$  – режим для сталі 12Х13: гартування  $T_g=1323$  К (масло),  $\tau=42...56$  хв; відгартування  $T_g=873...973$  К,  $\tau=140$  хв

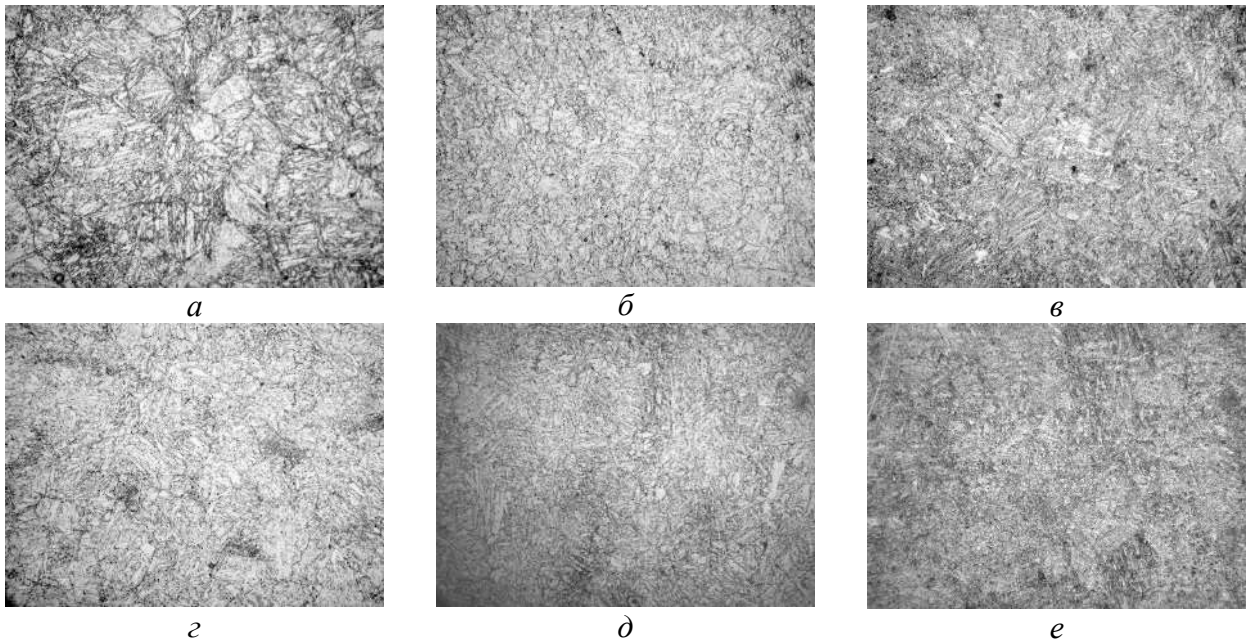


Рис.8. Мікроструктура ( $\times 500$ ) зони з'єднання зразка після  $ТО_1$  (a-в) та  $ТО_2$  (г-е): a,г – сталь 12Х13, б,д – зона сплавлення, в,е – сталь 38ХНЗМФА

У зоні з'єднання сталей, внаслідок їх різного хімічного складу, хром зі сталі 12Х13 і вуглець з 38ХНЗМФА дифундують назустріч один одному. Значення мікротвердості зони з'єднання металу композитного злитка ЕШП після  $ТО_2$  нижче ніж після  $ТО_1$  на 27 % і становить  $2,21 \pm 05$  та  $3,03 \pm 05$  ГПа, відповідно. Суттєвих випадів за значеннями не спостерігається, що свідчить про більш однорідний її розподіл. Також спостерігаємо менший розмір зерна 15,09 проти

18,78 мкм, що додатково показує на більш сприятливий режим термічної обробки  $\text{TO}_2$  для сталі 12X13.

Результати досліджень щодо чистоти металу за НВ зони з'єднання металу композитного злитка показали, що в зоні виявлено включення сульфиду марганцю ( $\text{MnS}$ ) та оксиду алюмінію ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) розміром до 3 мкм і двофазні включення ( $\text{Al-O-Mn-S}$ ) з максимальним розміром 6,5 мкм. Ці включення є типовими для металу ЕШП під використаним шлаком (АНФ-94).

ЕШП РМ дає змогу формувати композитні злитки змінного хімічного складу з мінімальною перехідною зоною без формування небезпечних (з точки зору ініціювання руйнування) структур. При ЕШП РМ максимальна глибина проплавлення прототипу композитного ротора зі сталей 12X13 та 38ХНЗМФА становить не більш як 15...20 мм, що складає 8...11 % від діаметра злитка і за прогнозами математичної моделі може досягати 12...15% (100...120 і 150...160 мм для діаметрів злитків 700 і 1200 мм, відповідно) на відміну від класичного ЕШП з електродами, коли утворюється перехідна зона в композитному злитку до 40 % від його діаметра. Проведені дослідження показали принципову можливість застосування ЕШП РМ для формування композитних злитків з гарантованою зоною з'єднання відповідної якості.

**У п'ятому розділі** виконано розрахунково-аналітичне та експериментальне обґрунтування гібридного процесу, що поєднує електрошлаковий підігрів меніску металу і безперервне розливання сталі (ЕШП+БР) з метою зменшення швидкості витягування заготовки без порушення формування її поверхні для виробництва довгомірної продукції (заготовок залізничних рейок і вісей, важких балок та швелерів тощо) на прикладі заготовок рейок з високоміцної сталі.

Перспектива застосування ЕШП для виробництва рейок найвищого гатунку базується на кількох чинниках:

- обмеженість традиційних металургійних методів підвищення їх якості;
- нагальна потреба України в рейках високої якості;
- складність створення сучасного виробництва залізничних рейок в короткий термін;
- попередній позитивний досвід підвищення якості рейок завдяки ЕШП.

Побудовано математичні моделі для різних варіантів організації процесів в кристалізаторі ЕШП при одержанні заготовок МБЛЗ та злитків ЕШП для рейок за різними швидкостями розливання/переплаву.

Математичне моделювання твердіння безперервнолитих злитків діаметром 500 мм в залежності від швидкості проводилося відповідно до наступних умов.

Диференційне рівняння теплопровідності для круглого безперервнолитого злитка в циліндричній системі координат записували рівнянням:

$$C(T)\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda(T)r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T_i}{\partial z} \right), \quad (11)$$

де  $C$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$  – теплоємність, щільність і теплопровідність відповідно, які були складені наступним чином:

- теплоємність злитка з урахуванням прихованої теплоти твердіння визначили за такою залежністю:

$$C = \begin{cases} C_L & T < T_L \\ fC_s + (1-f)C_L & T_s \leq T \leq T_L \\ C_s & T < T_s \end{cases} + \frac{L}{T_L - T_s} T_s \leq T \leq T_L, \quad (12)$$

де  $C_s, C_L$  - теплоємність металу в твердому і рідкому стані;  $L$  – теплота фазового переходу;  $f = (T - T_s)/(T_s - T_L)$  – частка твердої фази в двофазній зоні.

• теплопровідність злитка визначили у відповідності до наступних формулювань:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_L \lambda_c & T > T_L \\ \lambda_L [1 + (\lambda_c - 1)f^2] & T_s \leq T \leq T_L \\ \lambda_s & T < T_s \end{cases}. \quad (13)$$

Результати розрахунків для злитка діаметром 500 мм і різних швидкостей розливання наведено на рис.9.

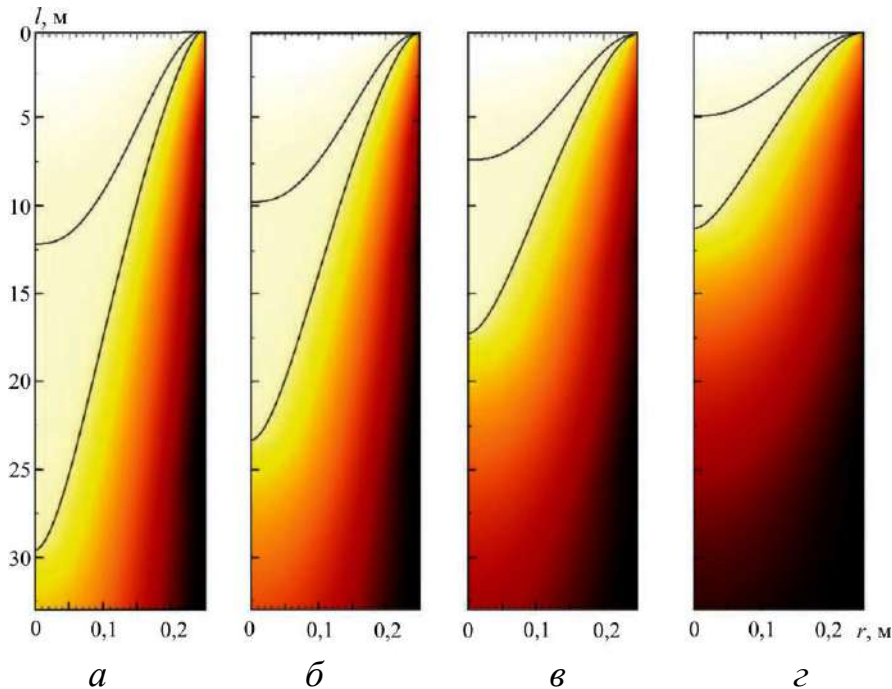


Рис. 9. Температурне поле безперервнолитих злитків діаметром 500 мм в залежності від швидкості розливання, м/хв:  $a$  — 0,5;  $b$  — 0,4;  $c$  — 0,3;  $d$  — 0,2

Зберігається практично прямолінійна залежність зменшення глибини металеві ванни (лунки) та двофазної зони від зменшення швидкості розливання, незважаючи на те, що при розрахунках було враховано ефекти впливу чотирьох зон вторинного охолодження, які відрізняються ефективністю тепловідведення.

Розрахункове зменшення глибини ванни з 29 до 11 м дозволяє вважати, що запропонований комбінований метод безперервного розливання в поєднанні з електрошлаковим підігрівом може дати друге життя напівбезперервній розливці ковальських злитків великого перерізу на вертикальних машинах.



Проведено комп'ютерне моделювання одержання заготовок на машині безперервного розливання Дніпровського меткомбінату ДМКД (м. Кам'янське) із застосуванням програмного продукту THERCAST® (Transvalor, Франція) та програми ProCAST (ESI Group, США). Розрахунок виконали для теплофізичних властивостей рейкової сталі R350HT (закордонний аналог сталі K76). Довжина кристалізатора складала 850 мм. Враховували розміщення та конфігурацію системи вторинного охолодження, напрямних і тягнучих роликів (рис.10).

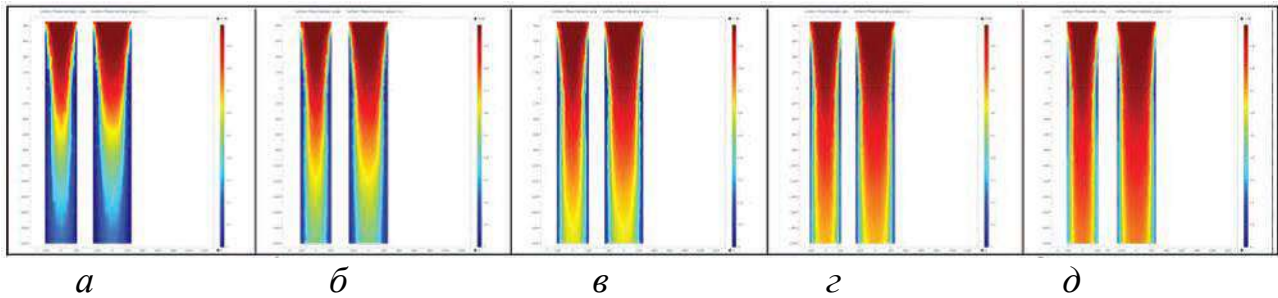


Рис. 10. Змінення глибини металевої ванни (лунки) при розливанні МБЛЗ + ЕШП заготовки рельсової сталі зі зміною швидкості, мм/хв: 200 (а), 300 (б), 400 (в), 500 (г), 600 (д)

За результатами моделювання встановлено, що зі зменшенням швидкості від стандартної 600 до бажаної 200 мм/хв спостерігається істотне зменшення частки рідкого металу, що знаходиться в двофазній зоні. На відстані 1000 мм від нижньої частини кристалізатора вона зменшується з 55 до 20 %, що дозволяє прогнозувати зменшення осьової неоднорідності. Визначено, що процес ЕШП з витягуванням злитка і, особливо, ЕШП РМ, досить близькі за своєю суттю до безперервного розливання. Однак для об'єднання переваг цих досить схожих процесів необхідно вирішити ряд завдань як конструктивного, так і технологічного характеру.

Традиційна суміш для МБЛЗ містить у своєму складі багато вільного вуглецю і, природньо, при її розплавленні утворюється шлак з високим вмістом карбідів, який має дуже високу температуру плавлення і в'язкість. Крім того, електропровідність такого шлаку не відповідає умовам ефективного ведення процесу шлакового нагріву. Тому виконали випробування можливості використання шлаку ЕШП у кристалізаторі МБЛЗ за існуючих швидкостей розливання.

Підбір складу шлаку виконали на основі термодинамічних розрахунків рівноважного стану системи газ-шлак-метал для умов переплаву високоміцної рейкової сталі з вмістом вуглецю 0,82 мас. %. Найбільш придатним з розглянутих (АНФ-28, АН-29, АН-67А, АН-295) є шлак АНФ-28 з додаванням оксиду магнію (АНФ-28М, мас. %:  $\text{CaF}_2$  – 47,  $\text{CaO}$  – 21,  $\text{SiO}_2$  – 18,  $\text{MgO}$  – 11,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 3). Розрахунками показано, що він забезпечує збереження хімічного складу металу і вміст алюмінію в металі рейкової сталі до 0,004 %. Шлак АНФ-28М випробували на МБЛЗ № 2 Дніпровського металургійного комбінату при розливанні високовуглецевої сталі в кристалізатор з поперечним перерізом 335×400 мм. Будь-яких поверхневих дефектів або істотних

відмінностей у зовнішньому вигляді заготовок МБЛЗ (тріщин, плівок, надривів, пухирів, плям тощо), сформованих зі стандартною сумішшю та шлаком АНФ-28М, виявлено не було. Всі заготовки пройшли приймальні випробування і були відвантажені споживачам (рис.11).

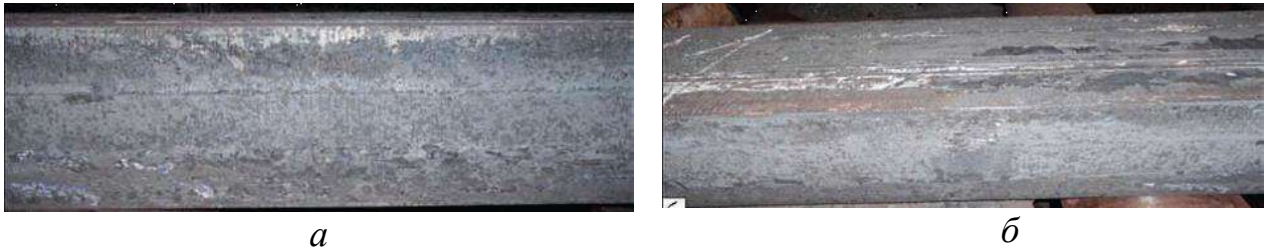


Рис. 11. Зовнішній вигляд поверхні заготовки МБЛЗ, отриманих із застосуванням стандартної розливної суміші (а) і дослідного шлаку ЕШП (б)

Отримані результати показують принципову придатність випробуваного шлаку ЕШП (АНФ-28М) для використання його на дзеркалі металу в кристалізаторі при безперервному розливанні довгомірної продукції на прикладі заготовок з високоміцної рейкової сталі.

З метою моделювання безперервного розливання на низьких швидкостях виконали дослідне випробування виготовлення злитків діаметром 180 мм рейкової сталі К76 шляхом ЕШП в СПК за нормальною та підвищеною швидкостями витягування. Після виходу на стаціонарний режим при формуванні злитка за нормальної швидкості ЕШП продуктивність процесу становила  $\sim 170\dots 200$  кг/год, швидкість витягування злитка  $\sim 20$  мм/хв. При цьому електрична потужність складала біля 240 кВ·А. За підвищеною швидкістю  $\sim 40$  мм/хв потужність становила  $\sim 300\dots 320$  кВ·А й продуктивність  $\sim 300\dots 350$  кг/г (рис. 12).

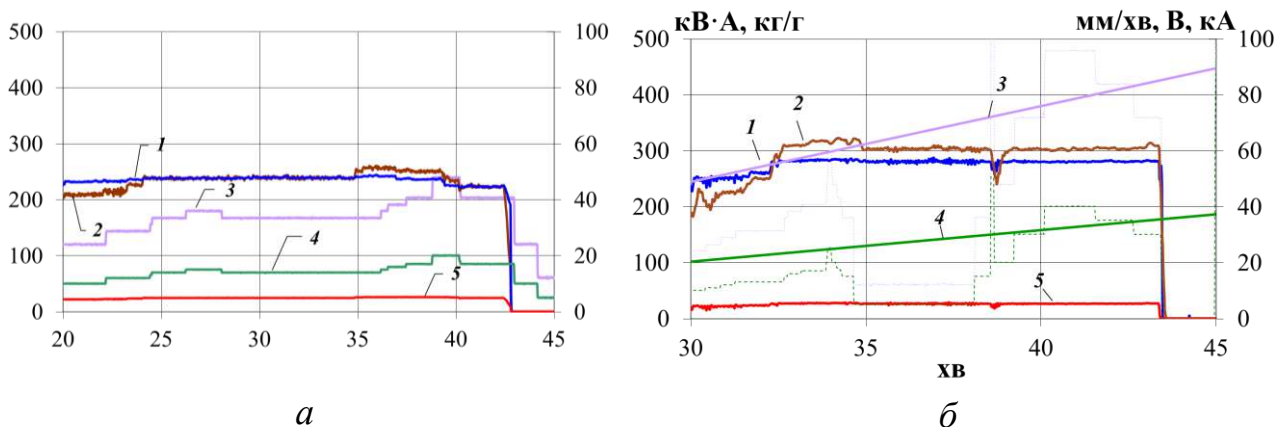


Рис. 12. Фрагмент стаціонарного режиму переплава за нормальною 20 (а) та підвищеною 40 мм/хв швидкостями (б): 1 – напруга  $U$ , В; 2 – потужність  $P$  кВ·А; 3 – продуктивність процесу, кг/год, 4 – швидкість витягування  $V$ , мм/хв; 5 – струм  $I$ , кА

Макроструктура поздовжніх темплетів обох злитків однорідна та щільна, без пор, шлакових включень, розшарувань, тріщин і несучільностей. Відбитки за

Бауманом виявилися практично чистими через низький загальний вміст сірки в металі після ЕШП і відсутність в злитках її сегрегації та скупчень сульфідних включень.

Мікроструктура представлена пластинчастим перлітом та є ділянки глобулярного перліту, на яких зустрічаються виділення глобулярної цементитної фази. Їх утворення імовірно пов'язано з нерівномірністю розподілу елементів і довготривалим перебуванням металу в температурному інтервалі перлітного перетворення (923...823 К). Дендритної сегрегації та виділень надлишкових фаз по межах зерен не виявлено (рис. 13).

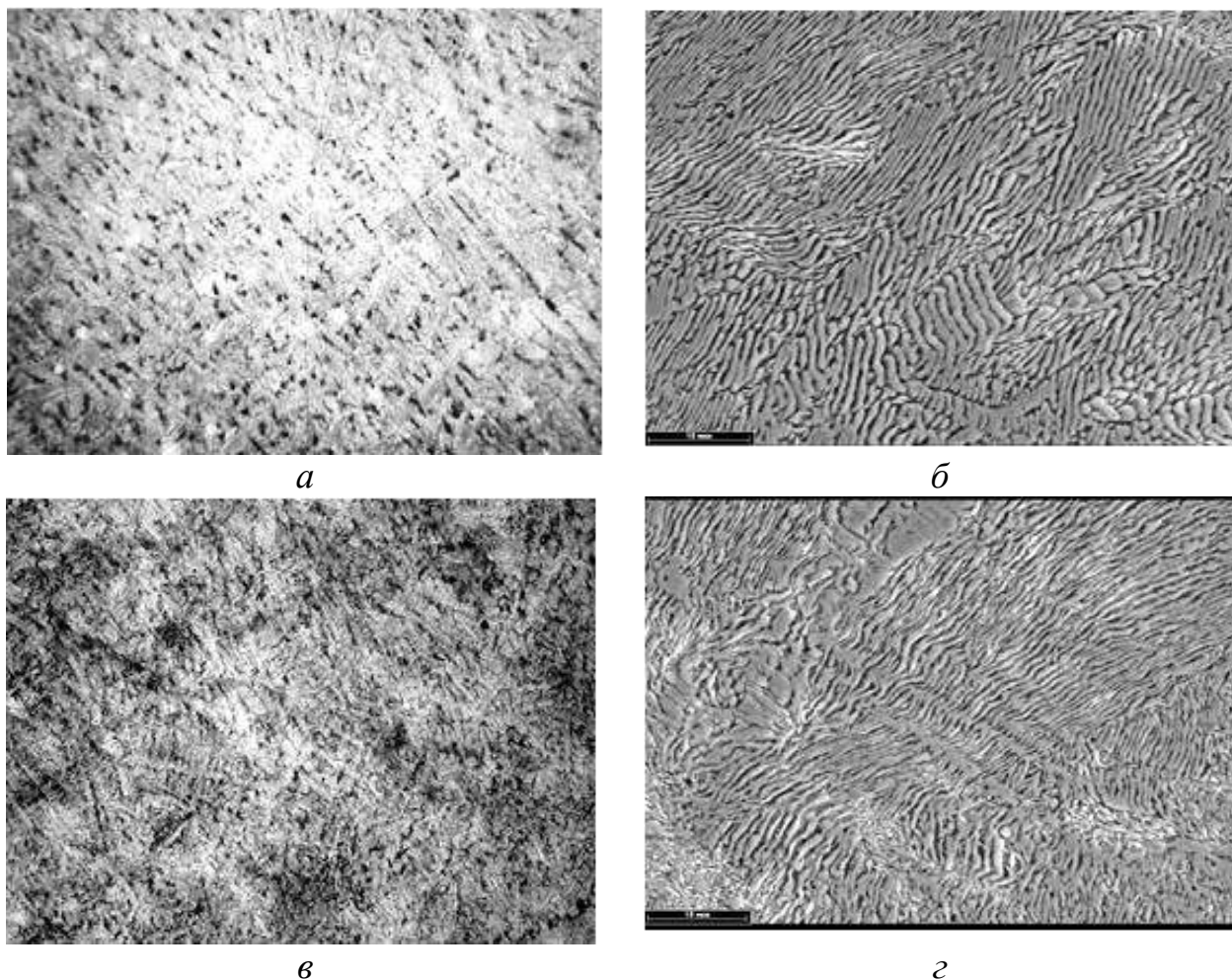


Рис.13. Оптичне (а, в) ( $\times 25$ ) і SEM (б, г) зображення мікроструктури зразка металу рейкової сталі злитка ЕШП діаметром 180 мм, отриманого за швидкостями витягування 20 (а, б) і 40 мм/хв (в, г)

Відстань між первинними і вторинними гілками дендритів для злитків за швидкостями 20 та 40 мм/хв відрізняються практично в два рази (мкм): між первинними – 248 проти 162, для вторинних – 82 проти 43, відповідно. Розміри перлітних зерен та субзерен за підвищеною швидкістю в 2 рази (40 проти 20 мм/хв) зменшуються практично вдвічі (табл.4).



Таблиця 4. Розмір структурних складових в злитках ЕШП діаметром 180 мм з рейкової сталі

Швидкість, мм/хв	Відстань між первинними гілками, мкм	Відстань між вторинними гілками, мкм	Міжпластинчаста відстань в перліті, мкм	Розмір перлітних зерен, мкм	Розмір субзерен, мкм
20	248	82	0,74	100...120	20...30
40	162	43	0,56	60...100	10...15

Оцінка міжпластинчастої відстані в перліті показала, що для злитка за швидкістю 40 мм/хв вона на 24 % вища в порівнянні з металом злитка, що отримано за швидкістю 20 мм/хв і складає 0,56 і 0,74 мкм, відповідно. Природно, в порівнянні з міжпластинчастою відстанню в зразках рейкової сталі преміум класу після деформації та термічної обробки відстань є більшою (0,07...0,20 мкм), але наші досліди були зроблені на литому металі без деформації і термічної обробки (які зазвичай підвищують дисперсність перліту). В металі, виготовленому за обома варіантами технології, спостерігали рівномірний розподіл НВ дрібного розміру (до 3 мкм) правильної глобулярної форми. У розглянутих полях зору будь-яких скупчень чи колоній НВ не знайдено ані в литому, ані в деформованому металі злитків.

Більшість включень у всіх зразках представлено сульфідом марганцю MnS або комплексними включеннями системи Al-O-Ca-Si. У вихідному деформованому металі витратного електрода (рейка К76) включення MnS переважно мають форму рядків довжиною до 20 мкм. Діаметр включень Al-O-Ca-Si глобулярної форми досягає 10 мкм. Нагрівання металу електрода (зона передплавлення на торці електрода) призводить до зміни розміру і морфології включень в порівнянні з вихідним деформованим металом. В краплі, зафіксованій на торці електрода, розмір і форма включень змінюються. Вони дрібніші (до 2 мкм) і переважно мають глобулярну форму незалежно від хімічного складу. Це свідчить про високу швидкість дифузійних і хімічних процесів, що забезпечують ефективне рафінування металу при переплаві. Спостерігається подрібнення витягнутих включень Mn-S та їх сфероїдизація. В металі злитків ЕШП після переплаву НВ представлено двома типами Mn-S та Al-O, складні включення типу Al-O-Ca-Si не виявлено. Після переплаву НВ рівномірно розташовані за перетином злитків і мають схожі морфологічні ознаки та хімічний склад. Їх розмір для обох злитків не перевищує 3 мкм, що зберігається і після прокату.

Побудовано термодинамічні діаграми, згідно яких за умов охолодження в процесі ЕШП структура металу рейкової сталі К76 буде чисто перлітна, що є важливим для одержання якісного металу без виділення вторинного цементиту по межах зерен.

Установлено, що рейкова сталь електрошлакового переплаву в литому та слабдеформованому стані (коефіцієнт деформації 1:4) задовільно з'єднується контактено-стиківим зварюванням з оплавленням. Міцність зварних з'єднань з

металу в литому стані нижче, ніж деформованого (871...887 проти 954...959 МПа), що може бути обумовлено крупнішим зерном литого металу (87 проти 54 мкм). Проте, в обох випадках міцність знаходиться в діапазоні вимог, що висуваються до сталі К76 (780...1080 МПа). Подрібнення ж зерен литого металу ЕШП може бути проведено з застосуванням відповідної термічної обробки.

У шостому розділі виконано проектування технологічного процесу ЕШП РМ для виготовлення злитків суцільного перерізу діаметром 500...2500 мм та розроблено відповідні технологічні рекомендації. Проведено розрахунково-аналітичне та експериментальне обґрунтування гібридного процесу, що поєднує електрошлаковий підігрів меніску металу і безперервне розливання сталі (ЕШП+БР) з метою зменшення швидкості витягування литої заготовки без порушення формування її поверхні для виробництва довгомірної продукції (заготовок залізничних рейок і вісей, важких балок та швелерів тощо) на прикладі рейок з високоміцної сталі. Здійснено порівняльний розрахунок техніко-економічних показників ЕШП та ЕШП РМ.

Проектуванням технологічного процесу ЕШП РМ для виготовлення злитків суцільного перерізу діаметром 500...2500 мм показано, що при додержанні продуктивності процесу формування злитка, характерної для ЕШП з витратним електродом, а також за адекватно підвищеної (на 15 % за рахунок зниженого перегріву металу) забезпечити безперервне розливання металу неможливо.

За заданої продуктивності процесу ЕШП РМ доцільно проводити порційне заливання із розрахованою циклічністю, тому необхідно спеціальне розливне обладнання, що підігрівається, яке придатне для зберігання і дозування металу. В якості підігрівного розливного пристрою (ПРП) при ЕШП РМ може бути використаний проміжний розливний індукційний ківш: магнітодинамічний міксер-дозатор (МДН, як на установці наплавлення, збудованій на Новокраматорському машинобудівному заводі, м. Новокраматорськ, Україна або чайникового типу).

Сформульовано рекомендації щодо використання одержаних наукових результатів при конструюванні нових печей ЕШП.

Також розроблено основи технології гібридного процесу (ЕШП+БР) сучасних рейкових сталей та рекомендації щодо впровадження наукових результатів роботи у виробництво.

Технологічний ланцюг виготовлення злитків ЕШП та ЕШП РМ представлено на рис.14.

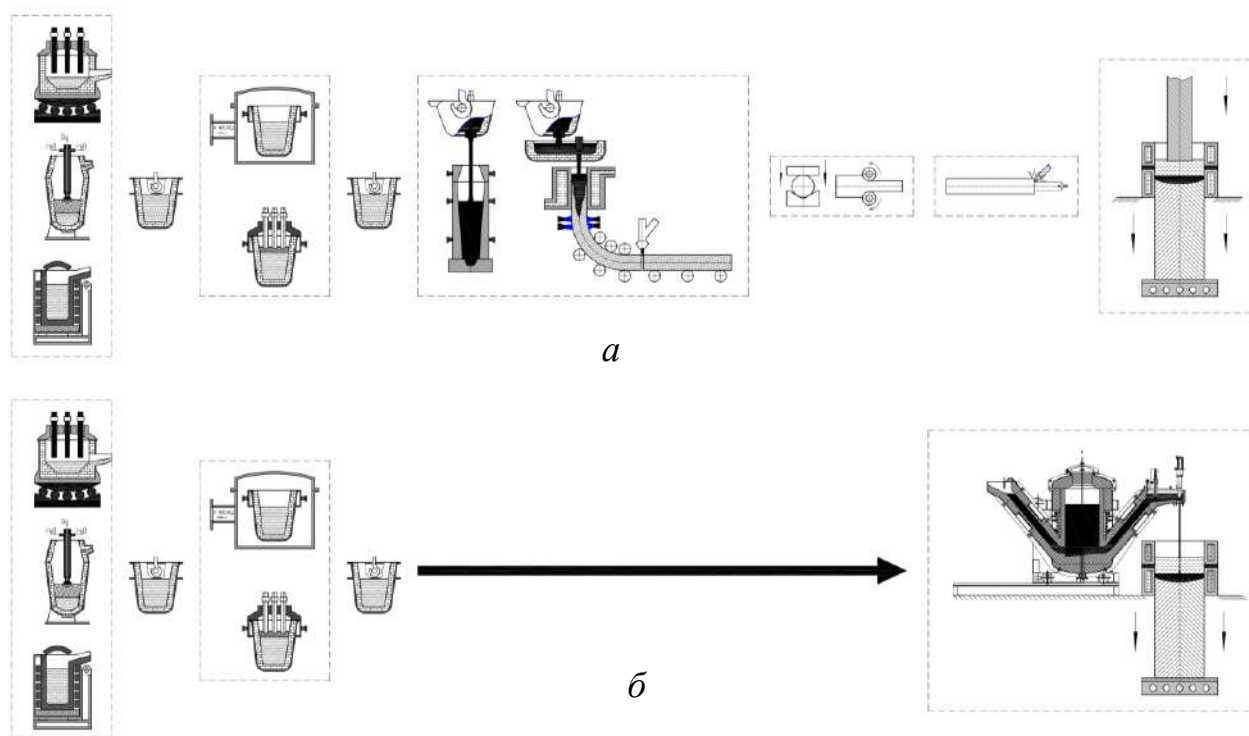


Рис. 14. Технологічний ланцюг виготовлення злитків ЕШП (а) та ЕШП РМ (б)

Для шести типорозмірів злитків 500...2500 мм визначено циклічність і розмір порцій для забезпечення обох продуктивностей процесу, що гарантуватимуть ЕШП-якість злитків (табл. 5).

Таблиця 5. Розрахунок порцій металу при заливці за нормальною і підвищеною продуктивністю процесу ЕШП РМ

Діаметр злитка, мм (маса, т)	500 (9)		700 (18)		1000 (36)		1200 (53)		1700 (100)		2500 (300)													
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2												
Продуктивність	кг /г	500	575	700	805	800	920	1000	1150	1400	1610	2000	2300											
	кг/хв	8,3	9,6	11,7	13,4	13,3	15,3	16,7	19,2	23,3	26,8	33,3	38,3											
Швидкість витягування злитка, мм/хв	5,4		6,2		3,9		4,4		2,2		2,5		1,9		2,1		1,3		1,5		0,9		1,0	
Маса злитка висотою (розмір порцій*), кг	А	30		60		123		180		360		760												
	Б	46		91		185		270		540		1140												
Циклічність заливання, хв	А	4	3	5	4	9	8	11	9	15	13	23	20											
	Б	6	5	8	7	14	12	16	14	23	20	34	30											

Примітка: 1 – нормальна продуктивність, 2 – підвищена продуктивність на 15 %. А – висотою злитка 20 мм; Б – висотою злитка 30 мм. \* - обрано на основі практичного досвіду

Головним питанням реалізації гібридного процесу ЕШП+БР може стати логістика процесу розливання «плавка на плавку» при використанні машин безперервного лиття, які зазвичай мають дві – шість ліній витягування

(струмені). Розрахунок для діючої МБЛЗ МК «Азовсталь» з середньою вагою плавки 350 тон показує, що для гібридного процесу можна, наприклад, задіяти один струмінь, оскільки інакше значне зниження продуктивності не дасть змогу повністю розлити плавку протягом визначеного часу. З огляду на те, що потреба в рейках найвищого гатунку в Україні сягає біля 10 % (10000...15000 т) від загальної потреби в магістральних рейках на рік цього може бути достатньо.

Запропоновано технологічну лінію процесу ЕШП+БР. Технічні рішення, що покладено в основу цієї технології, було випробувано на промисловій МБЛЗ в частині можливості використання шлаку ЕШП для розливання сталі. Гібридний процес ЕШП+БР може бути реалізовано і на одному струмені діючої МБЛЗ і, вочевидь, на новому агрегаті, конструкцію якого може бути реалізовано в різних варіантах. Електрошлаковий обігрів поверхні меніску кристалізатора може бути організовано невитратними електродами плоскими (I) або циліндричними (II) з їх симетричним розташуванням в перерізі кристалізатора, а також з використанням струмопідвідної надставки на кристалізаторі (III), що дозволить зменшити швидкість розливання та підвищити внутрішню якість заготовки без зниження якості її поверхні (рис. 15).

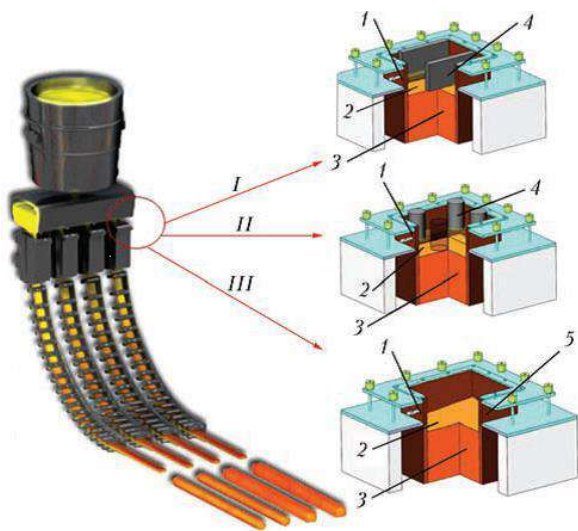


Рис.15. Схема гібридного процесу розливання ЕШП+БР на агрегаті МБЛЗ з різними варіантами електрошлакового підігріву меніску: I – кристалізатор МБЛЗ; 2 – шлак; 3 – заготовка МБЛЗ; 4 – електрод; 5 – струмопідвідна секція

Для забезпечення адекватного часу розливання у випадку переведення всієї машини на зменшення швидкості в 5 разів можна запропонувати наступні операції: скоротити об'єм металу, що випускається з дугової печі в ківш; поділити плавки на дві частини з їх послідовною подачею на агрегат ківш-піч та вакуумування; забезпечити додатковий підігрів металу в ківші або промківші, та, наприклад, одночасно збільшити переріз заготовки, що розливається. Проте, принципова сумісність поєднання різних швидкостей розливання на багатоструменевій МБЛЗ або загального зниження її продуктивності є зрозумілою вже зараз.

Узагальнені результати техніко-економічних розрахунків ЕШП та ЕШП РМ представлено в таблиці 6.

Таблиця 6. Техніко-економічні показники ЕШП та ЕШП РМ

Технологічна операція	Витрати електроенергії, кВт·г/т		Доля втрат металу		Стаття втрат
	ЕШП	ЕШП РМ	ЕШП	ЕШП РМ	
Проміжний розливальний ківш	50...60	200...300	0,015	0,01	В розливальному промковші/ПРП
МБЛЗ/злиток	50...60	-	0,05...0,1 МБЛЗ 0,15...0,25 злиток	-	Обріз заготовки/втрати металу при розливці
Нагрів перед деформацією	400...600	-	0,02...0,03	-	Втрати на окалину
Прокатка/ковка	30...60/ 20...50	-	0,05...0,3	-	Обріз при ковці/прокатці
Кріплення (приварювання) електрода**	0,028...0,03	-	0,013... 0,014	-	Витрати при зварюванні
Переплав, кВт·г/т	1000...2000	800...900	0,05...0,15		Обріз злитка
			0,0027... 0,0045	-	Втрати металу на огарок *,
Всього, кВт·г/т	1550...2800	1000...1200	1,2...1,76	1,06... 1,16	-
За підвищеною продуктивністю на 15 %, кВт·г/т	-	850...1020	-	-	-
Економія*, кВт·г/т	-	550...1600	-	0,14... 0,60	-
За підвищеною продуктивністю на 15 % кВт·г/т	-	700...1780	-	-	-

*Примітки:* Розрахунок наведено за цінами жовтня 2020 року: електроенергія для промислових підприємств – 1,68 кВт·год; середня ціна теплостійкої сталі - 250 тис.грн/т; рейкової сталі – 42 тис.грн/т

\* Без урахування зниження витрат електроенергії при підвищенні продуктивності процесу ЕШП РМ

\*\*Розрахунок для злитка 100 т, діаметром 1700 мм, що виплавлено з одного електрода з коефіцієнтом заповнення 0,7.

Розрахунок техніко-економічних показників показав, що витрати електроенергії для отримання однієї тони злитка ЕШП класичного технологічного процесу шляхом переплаву деформованого витратного електрода становить 1550...2800 кВт·г/т. Витрати електроенергії при отриманні однієї тони злитка ЕШП РМ є суттєво меншими – 1000...1200 кВт·г/т. Слід зазначити, що в технологічному ланцюгу виробництва якісних злитків ЕШП РМ метал після позапічної обробки і передачі його в проміжний розливний ківш надходить безпосередньо в кристалізатор для формування злитка, тим самим оминаючи операції виготовлення витратного електрода.

Застосування ЕШП РМ дозволяє заощадити електроенергію на кожній тоні сталі до 550...1600 кВт·г і на величину від 14 до 60 % знизити втрати металу,

що в грошовому еквіваленті становить 0,9...2,7 тис. грн (27...80 Євро) економії на електроенергії, а за втратами металу – для теплостійких сталей 35...150 тис. грн (1060...4500 Євро) і для рейкових 5...25 тис. грн (150...750 Євро) на тону сталі.

За умов підвищення продуктивності процесу ЕШП РМ на 15 % економія електроенергії ще збільшується до 700...1780 кВт·г на тонні сталі, що в грошовому еквіваленті становить 1,8...5 тис. грн/т. (54...152 Євро), що практично в 2 рази більше ніж при ЕШП.

Таким чином доведено, що застосування ЕШП РМ замість класичного ЕШП у виробництві теплостійких та рейкових сталей може забезпечити суттєву економію витрат на електроенергію: 35...57 % за нормальної продуктивності і на 45...63 % за підвищеної продуктивності. Втрати металу скорочуються на 14...60 % (загальна економія на тонні теплостійкої сталі – 36...153 тис. грн (1100...4580 Євро), рейкової – 6...28 тис. грн (180...830 Євро) за нормальної продуктивності та 37...155 тис. грн (1121...4697 Євро) і 7...30 тис. грн (212...909 Євро) за підвищеної продуктивності, відповідно (у цінах 2020 р.).

### **ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ**

В дисертації розвинуто теоретичні уявлення щодо фізико-хімічних й тепломасообмінних процесів при ЕШП та випробувано нові практичні підходи до їх вдосконалення використанням рідкого металу. Сукупність досліджень, які представлені в дисертації, може бути кваліфіковано як вирішення важливої науково-технічної проблеми підвищення економічності ЕШП, якості та стабільності комплексу властивостей теплостійких та високоміцних сталей за рахунок створення сприятливих умов формування злитків.

1. Аналіз сучасних технологій електрошлакового переплаву показав, що ЕШП сьогодні є одним із основних і перспективних процесів одержання металу особливо високої якості за рахунок високого ступеню рафінування складу й структури (підвищення щільності, зменшення ліквації тощо). Тому сьогодні у всьому світі ЕШП використовують для виготовлення найбільш відповідальних деталей машин і механізмів з легованих сталей (в тому числі високоміцних і теплостійких) та різних сплавів (в тому числі суперсплавів), які працюють в жорстких умовах в основних галузях промисловості – енергетиці, нафтохімії, металургії тощо.

2. Суттєвим кроком уперед стало створення в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України струмопідвідного кристалізатора (СПК), використання якого дозволяє варіювати в широких межах продуктивністю процесу ЕШП, надаючи можливість гарантованого одержання однорідної та бездефектної внутрішньої структури і гладкої поверхні злитків. Дослідження автора є розвитком електрошлакових технологій з рідким металом: наплавки валків (ЕШН РМ) і укрупнення злитків (ЕШН(У) РМ).

3. Порівняльний аналіз умов протікання фізико-хімічних і тепломасообмінних процесів в системі шлак-метал на основних стадіях переплаву при ЕШП з витратним електродом (плівка на торці витратного електрода – крапля – шлак – поверхня металевої ванни) і з рідким металом

(струмінь – поверхня металевої ванни) показав, що при ЕШП РМ: температура металу, що подається в кристалізатор, є нижчою на 70...90 К; поверхня взаємодії є вдвічі меншою (2,03 проти 1,12 – тут і далі – в долях поверхні металевої ванни), оскільки відсутня плівка на торці електрода (0,79) і поверхня струменю, який частково дробиться на краплі, є меншою (діаметр крапель, що було виміряно ЕШП на торці електрода (з коефіцієнтом заповнення 0,6...0,7) становив 2...6 мм (при врахуванні швидкості їх руху в шлаку 0,23, а без такого – 0,4); для ЕШП РМ обґрунтовано прийнято, що струмінь має діаметр 10 мм і 15 % його дробиться на краплі діаметром 6...9 мм.

4. Уперше, прямим порівнянням умов ЕШП з витратним електродом та без такого (з рідким металом) показано, що в процесі ЕШП плівка на торці електрода не є вирішальною рафінувальною стадією. Взаємодія відбувається на всіх поверхнях контакту металу та шлаку. Експериментальне порівняння десульфуруючої здатності процесів ЕШП та ЕШП РМ в співставних умовах (однакова марка сталі, однакова кількість і хімічний склад шлаку) показало, що здатність до рафінування процесу ЕШП РМ не менша, ніж класичного ЕШП і вміст сірки/ступінь десульфурації в металі злитків становить 0,009/66% та 0,013/51%, відповідно. Одержані результати свідчать про те, що при температурах ЕШП швидкості хімічних реакцій і фізичної адсорбції є настільки великими, що зменшення температури на величину менше ніж 100 К та менший розмір поверхні струменю і крапель при ЕШП РМ практично не впливає на ступінь видалення сірки. Таке зниження, однак, значно покращує умови тверднення металу в кристалізаторі та сприяє кращій якості злитка та надає можливість підвищення продуктивності процесу ЕШП РМ порівняно з класичним.

5. Розрахунок параметрів руху та нагріву крапель металу в процесах ЕШП з витратним електродом і з рідким металом за критеріями подібності (Архімеда (Ar), Рейнольдса (Re), Нуссельта (Nu), Прандтля (Pr)) за моделлю, яка враховує потоки в об'ємі рідкої краплі, показав, що зі збільшенням розміру відхилення швидкості її руху від прогнозованої за Стоксом для твердої сфери того ж діаметра зростає (для крапель розміром 3...10 мм на 3...26 %, відповідно). Чим більше розмір краплі, тим швидкість її руху та відхилення від Стоксівської є більшими.

6. Ступінь деформації рідких крапель при русі в розплаві шлаку є несуттєвим при дрібному розмірі (0,3 % для краплі діаметром 2...4 мм) і не впливає на швидкість їх падіння та нагрів, а при збільшенні розміру скорочує швидкість їх руху: 6 % деформації краплі діаметром 10 мм зменшує її швидкість на 25...30 % (0,447 проти 0,641 м/с для правильної сфери).

7. Теоретично обґрунтовано та експериментально досліджено технологію ЕШП РМ для отримання композиційних злитків з теплостійких сталей 12Х13 та 38ХНЗМФА з зоною з'єднання гарантованої якості для роторів турбін нового покоління. Чисельним прогнозуванням за побудованою моделлю продемонстровано шляхи оптимізації геометрії кристалізатора для отримання композитних злитків з зоною з'єднання гарантованої якості і мінімізованою глибиною проплавлення. Верифікація розробленої математичної моделі за

глибиною проплавлення та розподілом хімічних елементів в лабораторних злитках ЕШП РМ показала відхилення результатів розрахунків від експериментальних даних 10...12 %, що робить її придатною для практичних розрахунків.

8. В зливку-прототипу композитного ротора, одержаного ЕШП РМ наплавленням на твердий злиток в СПК діаметром 180 мм (потужність на кристалізаторі 250...300 кВ·А, швидкість витягування 10 мм/хв, масова продуктивність процесу 120 кг/г), максимальна глибина проплавлення становила не більш як 15...20 мм, що складає 8...11 % від діаметру злитка, що є значно меншим порівняно з ЕШП зі зміною електродів, де металева ванна (перехідна зона) в 3,5...5,0 раз більша за таку в композитному злитку ЕШП РМ. Чисельним експериментом за верифікованою моделлю прогнозовано зону змішування 12...15 % від діаметра злитка (100...120 і 150...160 мм для 700 і 1200 мм, відповідно).

9. Придатність технологічних режимів ЕШП РМ для формування злитків композитного ротора доведено металографічними дослідженнями металу злитка-прототипу, на підставі яких побудовано термокінетичні діаграми для сталей складу перехідної зони, що дозволило обрати режим їх термічної обробки. Показано відсутність ризику утворення в зоні з'єднання двох сталей крихких структур. Чистота металу зони з'єднання композитного злитка за вмістом і розміром неметалевих включень відповідає вимогам до металу ЕШП, що виплавляється за класичною схемою. Виявлено включення сульфідів марганцю ( $MnS$ ) та оксиду алюмінію ( $Al_2O_3$ ) розміром до 3 мкм і двофазні включення ( $Al-O-Mn-S$ ) з максимальним розміром 6,5 мкм. Дослідження доводять перспективність технології ЕШП РМ для виробництва композитних злитків з зоною з'єднання шарів малої протяжності.

10. Виконано розрахунково-аналітичне та експериментальне обґрунтування гібридного процесу, що поєднує електрошлаковий підігрів меніску металу і безперервне розливання сталі (ЕШП+БР) з метою зменшення швидкості витягування литої заготовки без порушення формування її поверхні для виробництва довгомірної продукції (заготовок залізничних рейок і вісей, важких балок та швелерів тощо) на прикладі рейок з високоміцної сталі. Встановлено, що для безперервнолитих злитків діаметром 500 мм зменшення швидкості розливання з 0,5 до 0,2 м/хв веде до зменшення глибини металевої ванни (лунки) з 29 до 11 м. При цьому доля рідкого металу, що перебуває в двофазній зоні, зменшується з 55 до 20 %, що є передумовою зниження осьової пористості та ліквації в литих заготовках.

11. Комплекс досліджень злитків лабораторної ЕШП виплавки під шлаком АНФ-28М показав, що збільшення швидкості витягування вдвічі з 40 до 20 мм/хв (використано як моделювання зниження швидкості розливання на МБЛЗ) не погіршує макро- та мікроструктуру металу рейкової сталі, не змінює розподіл сірки, дисперсність перліту, морфологію і розмір неметалевих включень. Контактно-стикове зварювання з оплавленням рейкового металу ЕШП для обох швидкостей витягування в литому й деформованому стані показало, що метал задовільно зварюється.



12. Розроблено схеми реалізації ЕШП РМ в складі гібридного процесу для МБЛЗ з використанням струмопідвідного кристалізатора. Застосування ЕШП РМ у виробництві рейок дозволяє знизити швидкості витягування заготовки майже втричі за рахунок підігріву меніску і, тим самим, покращити внутрішню структуру, щільність та однорідність металу заготовки зі збереженням якості її поверхні. Запропоновано новітні перспективні схеми виробництва рейок електрошлаковим переплавом на спеціалізованому мікро-заводі (умовно – мікро-завод «Укрзалізниці»).

13. Проектуванням технологічного процесу ЕШП РМ для виготовлення злитків суцільного перерізу діаметром 500...2500 мм показано, що при додержанні продуктивності процесу формування злитка, характерної для ЕШП з витратним електродом, а також за адекватно підвищеної (на 15 % за рахунок зниженого перегріву металу) забезпечити безперервне розливання металу неможливо. Для шести типорозмірів злитків визначено циклічність подачі і розмір порцій для забезпечення обох продуктивностей процесу, що гарантуватимуть ЕШП-якість злитків. Сформульовано рекомендації з використання одержаних наукових результатів при конструюванні нових печей ЕШП.

14. Техніко-економічним розрахунком доведено технічну та економічну доцільність застосування електрошлакового процесу з рідким металом для виробництва злитків суцільного перерізу великого діаметра (при однаковій продуктивності з ЕШП він може забезпечити економію витрат на електроенергію до 35...57 %, а при підвищеній на 15 % – до 45...63 %), що відкриває перспективу широкого впровадження такої технології та обладнання в промисловості.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Ganna Polishko**. Physico chemical comparison of electroslag remelting with consumable electrode and electroslag refining with liquid metal / **G. Polishko**, G. Stovpchenko, L. Medovar, L. Kamkina // *Ironmaking and Steelmaking*. 2019. Vol. 46, No. 8, 789–793 DOI:10.1080/03019233.2018.1428419 [Scopus].

2. G. Stovpchenko. Self-disintegrating slag for the electroslag remelting of hollow ingot / G. Stovpchenko, L. Medovar, **G. Polishko**, I. Goncharov, L. Lisova // *Ironmaking and Steelmaking. Processes, Products and Applications*. Published online 15.02.18. DOI:10.1080/03019233.2018.1428418 [Scopus].

3. L. Medovar. Electroslag Refining with Liquid Metal for Composite Rotor Manufacturing / L. Medovar, **G. Polishko**, G. Stovpchenko, V. Kostin, A. Tunik, A. Sybir // *Archives of Materials Science and Engineering*. Vol. 91(2). 2018. Pages 49-55. DOI:10.5604/01.3001.0012.5489 [Scopus].

4. G. Stovpchenko. Electroslag remelting for low oxygen metal manufacturing / Stovpchenko G., Lisova, L., Medovar, L., **Polishko G.**, Brun N, Bourson P., Strelchuk. V., Nasieka. I // (ICS-2018) 7th International Congress on Science and Technology of Steelmaking: The Challenge of Industry 4.0 [Scopus].

5. Л.Б. Медовар. Інноваційні рішення проблеми організації виробництва рейок найвищого гатунку в Україні. Л.Б. Медовар, Г.П. Стовпченко, **Г.О.**

**Полишко**, А.В. Сибір, Д.В. Коломієць, Ю.В. Костецький. Наука та інновації. ISSN 1815-2066. Naukainnov., 2019, 15(6), 37—48. DOI:10.15407/scin15.06.037. [WOS].

6. **А.А. Полишко**. Оценка распределения неметаллических включений в литом металле стали типа 316 после последовательного кольцевого электрошлакового наплавления жидким металлом / **А.А. Полишко**, Л.Б. Медовар, В.Я. Саенко, А.Ю. Туник, С.Н. Степанюк // Современная электрометаллургия. 2012. № 1. С. 20-24.

7. **А.А. Полишко**. Формирование структуры и свойств стали типа 316 при последовательной кольцевой электрошлаковой наплавке жидким металлом / **А.А. Полишко**, Л.Б. Медовар, В.Я. Саенко, С.Н. Степанюк, А.Ю. Туник, И.Н. Клочков, И.В. Березин // Автоматическая сварка. 2012. №2. С.29-32.

8. **А.А. Полишко**. Свойства зоны соединения слоев высоколегированной стали типа 316 (AISI) модельного слитка после кольцевого электрошлакового наплавления / **Полишко А.А.** // Вісник НУК імені адмірала Макарова. Миколаїв: НУК, 2012. № 2. С.70-74.

9. В.И. Махненко. Моделирование процесса изготовления крупных полых слитков из высоколегированных сталей и сплавов способом ЭШН ЖМ / Махненко В.И., Медовар Л.Б., Саенко В.Я., **Полишко А.А.**, Б.Б. Федоровский, С.Г. Григоренко, В.А. Зайцев // Современная электрометаллургия. 2013. №3. С.3-7.

10. Л.Б. Медовар Пат. 80780 Україна, МПК51 (2013.01)H05B 7/00 F27B 3/00. Подовий модульний електрод сталеплавильної печі постійного струму. Медовар Л.Б., Саенко В.Я., Федоровський Б.Б., Зайцев В.А., Ярош В.М., **Полишко Г.О.**, Лебідь В.А., Коломієць Д.В., Рябінін В.А. – №u201214728 ; заявл. 21.12.2012., опубл.10.06.2013., Бюл. № 11.

11. **А.А. Полишко**. Анализ неметаллических включений в литой высоколегированной стали, полученной путем электрошлакового переплава и электрошлакового переплава с применением жидкого металла / **А.А. Полишко**, В.Я. Саенко, С.Н. Степанюк, И.Н. Клочков // Вісник НУК імені адмірала Макарова. Миколаїв: НУК, Електронне видання. ISSN 2312-9441. 2013. № 4.

12. **А.А. Полишко**. Поведение неметаллических включений в структуре литой электрошлаковой нержавеющей стали AISI типа 316 / **А.А. Полишко**, В.Я. Саенко, С.Н. Степанюк, А.Ю. Туник, И.Н. Клочков // Современная электрометаллургия. 2014. №1. С.10-18.

13. В. А. Зайцев. Исследование удельного электрического сопротивления сталемедной зоны биметаллического электрошлакового слитка-заготовки анода ДСП постоянного тока / Зайцев В. А., Романко Л. А., **Полишко А.А.** // Современная электрометаллургия. 2014. №3. С.16-21.

14. Л.Б. Медовар Новый подход к улучшению качества заготовки для производства высокопрочных рельсов / Медовар Л.Б., Стовпченко А.П., Кайда П.Н., **Полишко А.А.**, Мощный В.В., Гладилин С.Ю // Современная электрометаллургия. 2016. №1. С.7-15.

15. Г. П. Стовпченко. Розробка шлаку електрошлакового переплаву, схильного до саморозпаду / Г. П. Стовпченко, Л. О. Лісова, Л. Б. Медовар, І. О.

Гончаров, **Г.О. Полішко**, В. С. Судацова // Современная электрометаллургия. 2016. №3. С.3-8.

16. Д. Н. Тогобицкая. Прогнозирование физико-химических свойств шлаков ЭШП на основе модели межатомного взаимодействия / Д. Н. Тогобицкая, А. П. Стовпченко, Л. А. Лисова, **А. А. Полишко**, Д. А. Степаненко // Современная электрометаллургия. 2016. № 4. С. 16-21.

17. **А. А. Полишко**. Физико-химическое сравнение электрошлаковых процессов с расходуемым электродом и жидким металлом / **Полишко А. А.**, Стовпченко А. П., Медовар Л. Б., Камкина Л. В. // Теплотехника, энергетика та екологія в металургії : колективна монографія. У двох книгах. – Книга перша / Під загальною редакцією д.т.н., проф. Ю.С. Пройдака. – Дніпро : Нова ідеологія, 2017. – 284 с. , 241-246 с. ISBN 978-617-7068-42-5.

18. Л. Б. Медовар. Моделирование непрерывной разливки комбинированным процессом МНЛЗ + ЭШП / Л. Б. Медовар, А. П. Стовпченко, А. В. Сибирь, Е. А. Волченков, **А. А. Полишко**, Е. А. Педченко, В. А. Лебедь // Современная электрометаллургия. 2017. № 4. С. 3-7.

19. Л.Б. Медовар. Сучасні рейкові сталі і можливості ЕШП (огляд) повідомлення 1. Сучасні умови експлуатації рейок і дефекти, що зменшують строк їх служби / Л.Б. Медовар, Г.П. Стовпченко, **Г.О. Полішко**, Є.О. Педченко, В.А. Зайцев // Современная электрометаллургия. 2018. № 1. С. 3-7.

20. Л.Б. Медовар. Сучасні рейкові сталі і можливості ЕШП (Огляд) Повідомлення 2. Вимоги стандартів до хімічного складу сталі для залізних колій /Л.Б. Медовар, Г.П. Стовпченко, **Г.О. Полішко**, Коломієць Д.А., Є.О. Педченко, В.А. Зайцев // Современная электрометаллургия. 2018. № 2. С. 28-21.

21. **А.А. Полишко**. Свариваемость высокоуглеродистой стали электрошлакового переплава при контактнойстыковой сварке / **А.А. Полишко**, Л.Б. Медовар, А.П. Стовпченко, Е.В. Антипин, А.В. Дидковский, А.Ю. Туник // Автоматическая сварка. 2019. № 3. С. 29-37.

22. Л.Б. Медовар. Сучасні електрошлакові технології переплаву електроду та переробка рідкого металу (огляд) / Медовар Л.Б., **Полішко Г.О.**, Петренко В.Л., Стовпченко Г.П. // Теорія і практика металургії. №2. 2020. С. 17-25.

23. **А.А. Полишко** Трансформация неметаллических включений в процессе электрошлакового переплава и электрошлакового наплавления жидким металлом высоколегированной стали AISI типа 316 (10X17H14M2) / **А.А. Полишко**, В.Я. Саенко, С.Н. Степанюк, А.Ю. Туник, И.Н. Клочков // Сборник тезисов стендовых докладов Международной конференции "Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее» (25-26 ноября 2013г., г. Киев, Украина). – С.194.

24. А.С. Миленин. Математическое моделирование технологического процесса ЭШН ЖМ разнородных по высоте стальных слитков крупного сечения. Миленин А.С., Саенко В.Я., **Полишко А.А.**, Козлитина С.С., Дзюбак Л.И. Сборник тезисов докладов VI Международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (15-19 сентября 2014г., Одесса, Украина). – С.25.

25. L. Medovar. Advanced ESR LM for two-layer composite ingot manufacturing for heavy weight rotors / L. Medovar, **G. Polishko**, G. Stovpchenko, A. Tunik, V. Kostin // Proceedings 3rd International Conference Advances in Metallurgical Processes and Materials, 10-13 June 2018, Lviv, Ukraine.

26. **G. Polishko**. Theoretical and experimental evaluation of physicochemical processes of ESR with consumable electrode and liquid metal. **G. Polishko**, G. Stovpchenko, L. Medovar. Proceedings 9th International conference of young scientists on welding and related technologies, 23–26 May 2017, Kyiv, Ukraine, 280-287 pp.

27. L. Medovar ESR process as additive manufacturing technique for heavy ingots and metamaterials: experience and prospects / L. Medovar, G. Stovpchenko, **G. Polishko**. Proceedings 20th International Forgemasters Meeting – IFM2017, 11-15 September, 2017, Graz, Austria, 345-352 pp.

28. G. Stovpchenko. Electroslag remelting – additive technology for large part building / G. Stovpchenko, L. Medovar, **G. Polishko**, A. Sybir // Full Proceedings Book 3d International Conference ICRF -2018, 16-19 October, 2018, Stockholm, Sweden, 206-214 pp.

29. P. Kayda. ESR Possibilities To Improve Railroad Rail Steel Performance / P. Kayda, L. Medovar, **G. Polishko**, G. Stovpchenko // Proc. of 9th Intern. Conf. on CLEAN STEEL, 8 - 10 September 2015, Budapest, Hungary.

### АНОТАЦІЯ

**Полішко Г.О.** Наукові основи електрошлакового процесу з рідким металом для одержання суцільних і композитних злитків. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів» (013 – Механічна інженерія). Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, 2020.

Робота присвячена проблемі підвищення економічності ЕШП, якості та стабільності комплексу властивостей сталей і сплавів за рахунок створення сприятливих умов формування злитків. В дисертації розвинуто теоретичні уявлення щодо фізико-хімічних і тепломасообмінних процесів при ЕШП та випробувано нові практичні підходи до їх вдосконалення використанням рідкого металу замість витратного електрода. Запропоновано застосування нових технологічних схем електрошлакового процесу з рідким металом та обґрунтовано доцільність їх використання для виробництва великовагових злитків для відповідальних виробів (зокрема, композитного ротору для сучасних енергетичних турбін і рейок преміум якості).

Аналізом умов протікання фізико-хімічних і масообмінних процесів в системі шлак-метал при електрошлаковому переплаві з витратним електродом і з рідким металом встановлена вдвічі менша поверхня реагування при ЕШП РМ порівняно з класичним ЕШП (з коефіцієнтом заповнення 0,6...0,7). Показана можливість подання металу до кристалізатора за 70...90 К нижчу температуру, що дозволяє збільшити продуктивність процесу ЕШП РМ порівняно з класичним ЕШП до 15% при збереженні такої ж якості злитка. Встановлено, що

плівка на торці електрода не є вирішальною стадією в процесі рафінування при класичному ЕШП, оскільки при ЕШП РМ у відсутності витратного електрода було досягнуто однаковий ступінь видалення сірки та близький розподіл і хімічний склад неметалевих включень. Досліджено рух і нагрів та оцінено вплив ступеню деформації крапель рідкого металу в розплавленому шарі шлаку з урахуванням потоків металу в їх об'ємі.

Теоретично доказано та експериментально досліджено технологію ЕШП РМ для отримання композитних злитків з теплостійких сталей 12Х13 та 38ХНЗМФА з зоною з'єднання гарантованої якості для роторів турбін нового покоління.

Виконано розрахунково-аналітичне та експериментальне обґрунтування гібридного процесу, що поєднує електрошлаковий підігрів меніску металу і безперервне розливання сталі (ЕШП+БР) з метою зменшення швидкості витягування литої заготовки без порушення формування її поверхні для виробництва довгомірної продукції (заготовки для залізничних рейок і вісей, важких балок, швелерів тощо) на прикладі сучасних рейок з високоміцної сталі.

На основі узагальнених результатів теоретичних і експериментальних досліджень, в тому числі математичного моделювання, розроблено технологічні рекомендації щодо проєктування технологічного процесу ЕШП РМ для виготовлення злитків діаметром 500-2500 мм, проведено їх апробацію та впровадження. Проведено техніко-економічні розрахунки показників застосування процесу ЕШП РМ замість класичного ЕШП у виробництві теплостійких та рейкових сталей та доведена економічна ефективність його застосування.

Ключові слова: електрошлаковий перепплав (ЕШП), витратний електрод, електрошлаковий процес з рідким металом (ЕШП РМ), струмопідвідний кристалізатор (СПК), гібридний процес безперервного розливання з електрошлаковим підігрівом (ЕШП+БР), крапля, струмінь, десульфурація, макро- та мікроструктура, неметалеві включення (НВ), композитний злиток, ротор, теплостійкі та високоміцні сталі.

## ABSTRACT

**Polishko G.O. – Scientific foundations of electroslag process with liquid metal for solid and composite ingots manufacturing.** Manuscript.

The thesis for the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty – 05.16.02 “Metallurgy of ferrous and nonferrous metals and special alloys” (013 – Mechanical Engineering). – E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

This work is devoted to increasing the efficiency of electroslag remelting and both quality and stability of the steels and alloys properties due to creating favorable conditions for ingot formation. The dissertation develops theoretical grounds of physicochemical and heat and mass transfer processes at the ESR. It checks the new practical approaches to their implementation using liquid metal instead of the consumable electrode. It offers the application of new technological schemes of Electroslag Remelting with Liquid Metal and the practicality of their use for the

production of heavy ingots for critical parts (i.e. composite rotor for modern power turbines and premium quality rails). Practical recommendations for the use of scientific results of this thesis in the industrial production of ESR-quality metal and at the design of electroslag remelting furnaces have been developed.

Recently developed the ESR technologies in the current-supplying mould allow for varying the productivity of the process in a wide range, providing an opportunity to improve the conditions of ingot formation to ensure both the homogeneous and defect-free internal structure and smooth surface simultaneously. The process with liquid metal (ESR LM) has been implemented in the industry for rolls surfacing (under the leadership of Academician B.I. Medovar), opened the possibility of the ESR-quality ingot forming without a consumable electrode. It is clear that the geometry of the melting space, temperature regimes, processes productivity and the basic general laws of refining and solidification under the conditions of classical ESR are different and cannot be transferred as-it-is to the ESR LM conditions.

Comparison analysis of the physicochemical and mass transfer processes at the ESR (with a consumable electrode with a fill factor 0.6...0.7) and the ESR LM has shown that in the last case the total surface of interaction is twice less, and overheat of metal coming into the mould is 70...90 K lower. Reducing the metal overheat allows increasing the ESR LM process productivity compare to the classic ESR up to 15% while maintaining the same quality of the ingot.

It was stated, that the film on the tip of an electrode at classical ESR is not the critical stage in the process of refining from sulfur, because at the ESR LM at no consumable electrode the same degree of sulfur removal was reached.

Both the motion and heating in a liquid slag of liquid metal droplets taking into account the flows in their volume were studied using the similarity criteria.

The technology of ESR LM for composite two-layers ingot manufacturing (heat-resistant steels 12Cr13 and 35NiCrMoV12-5) with the guaranteed quality of transition/fusion zone for heavy-weight rotors for steam turbines were theoretically substantiated and experimentally investigated. Numerical experiments based on the constructed model allows determining the ways to optimize the mould geometry to produce such composite ingots with a minimized depth of solid first layer penetration. The suitability of the ESR LM technological modes for the ingots formation for the composite rotor was proved by metallographic studies of the prototype ingot (180 mm in dia, melting penetration – 15...20 mm (8...11% of ingot diameter). According to the thermokinetic diagrams built for the steels of the transition zone, the heat treatment regimes for the composite rotor were chosen, which guarantees no risk of brittle structures formation in the area of two steels joining. Numerical experiment under verified model predicts the mixing zone extent equals to 12...15% of the ingot diameter (100...120 mm and 150...160 mm for 700 mm and 1200 mm, respectively). The transition zone is significantly smaller than in ESR ingot remelted by the change of electrodes, which makes ESR LM technology promising for the composite ingots production having short length zone of layers connection.

Computational-analytical and experimental substantiation of the hybrid process combining electroslag heating of the metal meniscus and continuous casting of steel

(ESR+CC) to reduce the rate of the casting (withdrawing) without disturbing its surface formation was made. It is expedient for long products (railway rails and axles, heavy beams and channels, etc.) as was checked on the example of rails made of high-strength steel. Industrial tests have shown the possibility of ESR slag ANF-28M (40/15/25/15/5) using on the caster (CC) meniscus. The use of the ESR way for the meniscus heating allows reducing the withdrawing speed of a billet by almost three times, thus, to improve the internal structure, density and homogeneity of the billet metal while maintaining the quality of its surface. Schemes for the ESR LM implementation as part of a hybrid process for CC using a current-supplying mould and the electroslag remelting way for rails production at a micro-mill were developed.

Technological recommendations for the design of the ESR LM technological process for the manufacturing of solid cross-sections ingots of 500...2500 mm in diameter have been developed. It was shown, that at the characteristic for the ESR with consumable electrode productivity and at adequately increased one (up to 15% due to reduced metal overheat) the liquid metal can be fed to mould by portions only. The frequency of feeding and portion size for pouring were determined. Both technical and economic feasibility of using Electroslag Process with Liquid Metal for large diameter solid ingots manufacturing was calculated: at the same productivity as the ESR the new ESR LM process can save energy costs up to 35...57%, and at the increased by 15% productivity up to 45...63%, which opens the prospects of widespread implementation of this technology and equipment at heavy machinery.

Key words: Electroslag Remelting (ESR), consumable electrode, Electroslag Remelting with Liquid Metal (ESR LM), Current-Supplying Mould (CSM), hybrid process combining continuous casting and electroslag heating (ESR+CC), metal droplets, metal flow, desulfurization, macro- and microstructure, non-metallic inclusions (NMI), solid ingot, composite ingot, heavy composite rotor, heat resistant and high-strength steels.



Підп. до друку 07.12.2020. Формат 60x84/16. Бум. офс. №1. Офс. друк Ум.  
друк. арк.1,7. ум. фарбо-відб. 1,8. Тираж 150 прим. Зам. № 367 ПОД ІЕЗ  
ім. Є. О. Патона. 69, вул. Антоновича, Київ, 03150, Україна