

145
28 01 2021

ВІДГУК

офіційного опонента д.т.н. проф. Пройдака Юрія Сергійовича
на дисертаційну роботу Полішко Ганни Олексіївни
**«НАУКОВІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПРОЦЕСУ З РІДКИМ
МЕТАЛОМ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ СУЦІЛЬНИХ І КОМПОЗИТИЧНИХ ЗЛИТКІВ»**,
яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за
спеціальністю 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та
спеціальних сплавів.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 339 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 300 сторінок машинописного тексту, включаючи 135 рисунків, 32 таблиці, список літератури на 39 сторінках та містить додатків на 2 сторінках .

Актуальність обраної теми дисертації. 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, нафтогазій, металургії тощо. Завдяки рафінуванню складу (видалення домішок) і структури (підвищення щільності, пригнічення ліквациї, усунення пористості і таке інше) при ЕШП формуються високоякісні гомогенні злитки. На найближчий час процеси ЕШП залишаються 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 ліквациї. Невисока продуктивність класичного ЕШП є основою якості злитка, але і зумовлює високі витрати електроенергії і питому собівартість.

Процес з рідким металом (ЕШП РМ), що реалізовано в промисловості для наплавлення валків, відкрив можливості формування злитка без витратного електрода. Зрозуміло, що геометрія плавильного простору, температурні режими, продуктивність і, відповідно, базові загальні закономірності процесів рафінування і твердиння при ЕШП РМ є відмінними від умов ЕШП з витратним електродом, тож наявні знання не можуть бути перенесені напряму. 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 твердинні 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.

Про актуальність теми роботи свідчить також її зв'язок з темами фундаментальних та прикладних досліджень, що виконані в Інституті електрозварювання ім. Е.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 літих 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 тепlostійких 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 заєвтектоїдних 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 високоміцьких сталей для зварювання конструкцій» (2017 – 2021 рр., № ДР 0117U001184); «Розробка електрошлакових технологій керування кристалізацією аустенітних жароміцьких сталей і сплавів» (2018 – 2020 рр., № ДР 0117U001184).

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 тепlostійких та високоміцьких сталей.

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** досить повно проаналізовано науково-технічну літературу за темою дисертації, виконано аналіз можливостей та перспектив сучасних процесів ЕШП в одержанні сталей особливо високої якості. Показано,

що електрошлаковий процес з подачею рідкого металу у струмопровідний кристалізатор має наступні переваги 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 ліквацийних 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 різномірних 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 металевої 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. 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 площині поверхні крапель та струменю. 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.

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 тверда сферу, 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. Було виконано розрахунки для оцінки розбіжності в розрахунку часу проходження краплею шару шлаку за наведеною моделлю та за Стоксом. Виражену у відсотках різницю позначили Δ (%). Розрахунки показали суттєвий вплив

введеного уточнення, яке враховує ефект руху металу всередині краплі порівняно з результатами розрахунків за Стоксом. Встановлено, що 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. Ступінь деформації рідких крапель при русі в розплаві шлаку є несуттєвим при дрібному розмірі (0,3% для краплі діаметром 2-4 мм) й не впливає на швидкість їх падіння та нагрів, а при збільшенні розміру скорочує швидкість їх руху: 6% деформація краплі діаметром 10 мм зменшує її швидкість на 25-30% (0,447 проти 0,641 м/с для правильної сфери).

У четвертому розділі представлено результати застосування ЕШП РМ для отримання прототипу злитків для виготовлення композитних роторів для енергетичних турбін нового покоління з тепlostійких сталей 12Х13 та 38ХН3МФА. Теоретично обґрунтовано та експериментально досліджено технологію ЕШП РМ для отримання композиційних злитків з тепlostійких сталей 12Х13 та 38ХН3МФА 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.

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. 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.

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.

Слід додати, що при наведеному вище огляді змісту розділів дисертації коротко відзначені ті результати, які є найбільш вагомими.

Ступінь обґрутованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Зміст дисертаційної роботи дозволяє в цілому оцінювати її як комплексну, з науковими та технологічними компонентами та органічністю поданого матеріалу. Аналіз дисертації та автореферату Полішко Г.О. показав, що наукові положення, висновки і рекомендації, що викладені в роботі, цілком обґрутовані на підставі глибокого вивчення здобувачем іноземних і вітчизняних літературних джерел, патентної літератури, результатів власних теоретичних і практичних досліджень та розрахунків.

Науковий компонент включає, окрім різноманітних інструментальних досліджень, також пряме порівняння умов ЕШП з витратним електродом та без такого (з рідким металом). Зокрема встановлено, що в процесі ЕШП плівка на торці електрода не є вирішальною рафінуванальною 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.

Шляхом розрахунку 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, показано, 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. 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).

Теоретично обґрунтовано та експериментально досліджено технологію ЕШП РМ для отримання композиційних злитків з тепlostійких сталей 12Х13 та 38ХН3МФА 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.

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 переходної 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 сульфіду 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.

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 літої 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

ванні (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 ліквациї в литих заготовках.

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.

За результатами розрахункових та експериментальних досліджень науково обґрунтовані та 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»).

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.

Отримані автором теоретичні закономірності підтверджено дослідженнями реальних злитків. Вони не мають протиріч з існуючими теоретичними уявленнями та накопиченим досвідом. Наукові положення, висновки і рекомендації узгоджуються з існуючими концепціями. Їх достатня обґрунтованість підтверджуються визнанням на відомих міжнародних конференціях з матеріалознавства та металургії.

Достовірність одержаних результатів.

Достовірність результатів дисертаційних досліджень забезпечена: коректною постановкою завдань теоретичних та експериментальних досліджень; науково-технологічною новизною отриманих результатів з одержаними експериментальними даними та встановленими закономірностями; системним аналізом досліджуваних процесів; застосуванням сучасних методів визначення технологічних параметрів процесів і виготовлення зразків; системним підходом до досліджуваної проблеми через аналіз не тільки технологічних, але й економічних показників; наявністю довідок щодо

використання результатів дисертаційної роботи у виробництві та в навчальному процесі; а також значним переліком публікацій за темою дисертації, в тому числі, які внесені до реєстру міжнародних наукометричних баз SCOPUS/WoS.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в теоретичному узагальненні та розширенні теоретичних уявлень щодо фізико-хімічних й тепломасообмінних процесів при ЕШП. В роботі випробувано нові практичні підходи до вдосконалення використання рідкого металу при ЕШП. Сукупність досліджень, які представлені в дисертації, може бути кваліфіковано як вирішення важливої науково-технічної проблеми підвищення економічності ЕШП, якості та стабільності комплексу властивостей тепlostійких та високоміцних сталей за рахунок створення сприятливих умов формування злитків.

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 доказом повноти взаємодії металу зі шлаком та асиміляції неметалевих включень на межі металової 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 переходної 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 уявлених 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 підвищений (до 15 % за рахунок зниженого перегріву металу) продуктивності процесу ЕШП РМ розливання металлу може бути тільки порційним. Маса порції визначається властивостями металу та конструкцією розливального пристрою.

Наукову новизну сформульовано чітко та зрозуміло, з розкриттям суті.

Практичне значення роботи.

Визначені автором 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 тепlostійких й високоміцних сталей.

Виготовлено 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 перевіreno умови організації електрошлакового підігріву меніску, які дозволяють зменшити швидкість розливання на машинах безперевного ліття заготовок (МБЛЗ), що покращує якість внутрішньої структури заготовок

В практичній площині велику користь мають рекомендації щодо удосконалення технології виплавки електрошлакового металу (керування швидкістю процесу з метою підвищення рівня якості та стабільності комплексу властивостей тепlostійких та високоміцних сталей), які передано ПрАТ «Дніпроспецсталь» для використання у виробничому процесі в СПЦ №5

На основі отриманих результатів 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.

На основі теоретичних та експериментальних досліджень 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 підвищенні на 15 % – до 45...63 %).

Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи в наукових публікаціях

Основні положення і результати дисертації доповідалися на 22

міжнародних науково-практических конференціях.

Результати дисертації викладено в 29 наукових працях, в тому числі 16 статей надруковано у спеціалізованих виданнях, що внесені до переліку фахових видань України, 5 робіт внесені до реєстру міжнародних наукометрических баз SCOPUS/WoS, зокрема «Современная электрометаллургия», «Автоматическая сварка», «Ironmaking and Steelmaking», «Archives of Materials Science and Engineering» та ін.

Апробація наукових результатів була представлена на 22 міжнародній конференції.

Аналіз публікацій дає підставу вважати, що наукові положення, висновки та рекомендації, які отримані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені в наукових працях.

Автореферат ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації й достатньо повно відображає основні наукові результати, отримані здобувачем.

Результати досліджень, одержані при виконанні кандидатської дисертації «Особливості укрупнення зливків послідовним кільцевим електрошлаковим наплавленням» (2011 р.) в представленій докторській дисертації не використовуються.

Висновки дисертації відображають найважливіші наукові та практичні результати дисертації, в якій наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення актуальної науково-технічної проблеми, що полягає у підвищенні технічних можливостей та економічності електрошлакового процесу з рідким металом, якості та стабільності комплексу властивостей злитків за рахунок створення сприятливих умов їх рафінування та формування. Висновки сформульовано конкретно та логічно, відповідно до змісту дисертації.

Зміст дисертації і автореферату ідентичний. Автореферат дисертації достатньо повно висвітлює результати, наведені в самій дисертації.

Дисертація та автореферат мають наступні зауваження:

1. В авторефераті з таблиці 6. стор. 29 не ясно, який саме розливальний пристрій було використано для подачі рідкого металу при ЕШП РМ.
2. В анотації до дисертації на стор. 5 сформульовано, що скорочення втрат металу на 14-60 % покращує собівартість електрошлакових заготовок високолегованих сталей більш коректною є формулювання – зниження або збільшення собівартості.
3. В дисертації розглянуто вплив перегріву металу на хід процесу з рідким металом. Доцільно було б розглянути вплив переохолодження металу та розробити математичну модель, яка описує тверднення злитка ЕШП РМ і провести порівняння з процесами кристалізації злитків стандартного ЕШП .

4. В дисертації відсутнє пряме порівняння макро- і мікроструктури, розподілу і складу неметалевих включень та властивостей металу ЕШП та ЕШП РМ від зливків однієї марки сталі, одного розміру, які виплавлені під шлаком однакового хімічного складу із однаковою продуктивністю.

Представлені в роботі фотографії мікроструктур перехідної зони та сталей 12Х13 та 8 ХНЗМФА, на жаль, не достатньо інформативні, тобто чітко на них не ідентифікуються ні структурні складові, ні окремі фази (Рис.4.10, 4.20).

5. Не розглянуто також вплив сплавлення (різних його швидкостей) на формування структури в зоні, так званого, термічного впливу, сталі 12Х13, що знаходилась спочатку в деформованому стані. Мікроструктуру цієї сталі у вихідному стані також не наведено. Однак в таблиці 4.3, де показано розподіл твердості зони з'єднання композитного злитка, добре видно що значення механічних властивостей ділянки, що відповідає сталі 12Х13 значно нижчі, за інші ділянки, а порівняння їх з вихідними значеннями не наведено.
6. Цікаві аналітичні дослідження проведено в розділі 4.4, але їх результати мають скоріше методично-розрахунковий інтерес, а не науково-практичний. Вибір термічної обробки для експериментальних сталей тільки підтверджив такі, що добре відомі і широко застосовуються для ферито – мартенситних сталей таких як 12Х13.
7. Досліди з отримання композитних злитків - заготовок роторів варто було б спробувати провести в промислових умовах на більших діаметрах. Наведені результати лабораторної виплавки не відображають в повній мірі реальні процеси, що відбуваються з металом в промислових умовах.
8. Також доцільно було б провести додаткові дослідження (наприклад, математичне моделювання) впливу ЕШП РМ на якість сучасних колісних сталей, які працюють в умовах високошвидкісних залізничних магістралях, оскільки з попередніх досліджень відомо позитивний вплив стандартного ЕШП на якість залізничних колес
9. В розділі ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ пункт 9 написано: «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. В той же час в розділі 4, де саме розглядаються ці дослідження вказується, що для оцінки впливу термічного циклу ЕШП нагріву на формування зони з'єднання різномірних сталей та оцінці фазових перетворень в них використовували метод CALPHAD. Цей метод використовує термодинамічні властивості кожної фази, що мають вигляд математичної моделі. Параметри моделі обчислюються шляхом

мінімізації різниці між величиною, що описується та її експериментальним значенням, враховуючи всі співіснуючі фази. Але яким чином отримані саме експериментальні данні стосовно всіх фаз в роботі не показано, тобто з тексту роботи не розуміло яким чином побудовані термокінетичні діаграми.

Тут же в п.11 приведено: «...збільшення швидкості витягування вдвічі ...», а наведені цифри «..з 40 до 20 мм/хв...» говорять про зменшення.

Висновки щодо відповідності дисертації вимогам Міністерства освіти та науки України

Вказані зауваження не знижують загальної позитивної оцінки та високого рівня дисертації.

Дисертація відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України. Назва та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів, як за формулою спеціальності, так і за напрямками досліджень.

Загальний висновок. Розглянуті вище результати дають підстави вважати, що дисертація Полішко Г.О. «Наукові основи електрошлакового процесу з рідким металом для одержання суцільних і композитних злитків» є завершеним науковим дослідженням, яке розв'язує важливу науково-технологічну проблему у підвищенні технічних можливостей та економічності електрошлакового процесу з рідким металом, якості та стабільності комплексу властивостей злитків за рахунок створення сприятливих умов їх рафінування та формування.

Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, щодо докторських дисертацій, а її автор, Полішко Ганна Олексіївна, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.

Офіційний опонент

проректор з наукової роботи

Національна металургійна академія України МОН України

доктор технічних наук, професор

Д.С. Пройдак

