

офіційного опонента доктора технічних наук, професора О. І. Балицького на дисертаційну роботу В.Л. Петренка «Розробка нових принципів управління технологічним процесом і побудова системи автоматичного керування ЕШП», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів».

Актуальність роботи. Дисертаційна робота В.Л. Петренка присвячена розвитку і застосуванню наукових принципів управління технологічним процесом і побудова системи автоматичного керування ЕШП. Можна вважати, що в цілому ця задача повстала у зв'язку з інтенсивним розвитком цифрових технологій та впровадженням «кіберфізичних систем», автоматизованих машини, виробничих комплексів, створення раціональних автономних режимів виробництва. До переваг використання комп'ютерних систем автоматичного управління слід віднести їх здатність вимірювати, порівнювати, документувати і сертифікувати параметри технологічних процесів згідно технічних завдань без прийняття рішень оператором у тому числі і в таких складних агрегатах як печі ЕШП, де реалізуються процеси плавлення електроду і кристалізації злитка в одному кристалізаторі, причому ці процеси відбуваються одночасно й розділені в просторі шаром розплаву шлаку, обидві границі якого є рухомими і для одержання якісного злитка необхідно контролювати заглиблення електроду, яке впливає на продуктивність процесу, глибину та форму рідкометалевої ванни, рівень на якому вона знаходиться. Розробка наукових принципів управління технологічним процесом і побудова системи автоматичного керування ЕШП є актуальною, важливою, як з теоретичної, так і з практичної точки зору.

Дисертаційна робота присвячена розвитку і застосуванню нових наукових принципів управління технологічним процесом і побудові системи автоматичного керування електрошлакового переплаву. Складність процесів, які виникають при цьому, обумовлює необхідність нового концептуального підходу до створення і застосування ефективних методів та алгоритмів для розв'язування комплексних наукоємних задач.

Практичне та теоретичне значення зазначеної наукової задачі визначають актуальність поданої дисертаційної роботи та обраної теми дослідження для розвитку визначених аспектів сучасної електрометалургії.

Наукова новизна одержаних результатів.

Наукову новизну результатів дисертаційного дослідження складають:

1. Вперше розроблено і випробовано систему автоматичного управління ЕШП за двоконтурною схемою живлення, яка дозволяє змінювати співвідношення потужності струму за обома контурами в межах від 0 до 100% загальної.
2. Вперше розрахунково-аналітичним шляхом визначені обмеження керованості процесом ЕШП, які накладаються опором силових ланцюгів струму, й показано,

що межею керованості є співвідношення активного опору шлакової ванни до загального опору силових ланцюгів струму на рівні 0,35-0,4, що веде до відсутності зворотного зв'язку на подальше заглиблення витратного електроду в шлакову ванну, і може привести до короткого замикання.

3. Вперше у вітчизняній практиці в системі управління печей ЕШП реалізовано програмно-апаратний комплекс контрольованого заглиблення витратного електроду (свінг-контроль), який дозволяє вести процес ЕШП зі зануренням електроду в шлак не більше як 3-5% висоти шлакової ванни, що забезпечує, при постійних електричних параметрах переплаву, найменшу можливу глибину металевої ванни.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Визначені на промислових печах 60 т та 30 т особливості перерозподілу електричного опору між складовими короткої мережі печі ЕШП в процесі переплаву дозволяють запобігти втраті контролю за зануренням електроду в шлакову ванну і мають бути враховані вже при проектуванні.

2. Розроблено та випробувано в промисловості ефективність використання свінг-контролю при модернізації печей ЕШП з застарілою системою управління тільки за електричним опором шлакової ванни.

3. Розроблений алгоритм автоматичного управління «свінг-контролю» забезпечує стабільний контроль продуктивності процесу і мінімальне занурення електроду в шлакову ванну, що гарантує зменшення витрат шлаку і електроенергії та формування металевої ванни мінімально можливої глибини для забезпечення гомогенної структури злитка.

Зв'язок дисертаційного дослідження з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційне дослідження є складовою частиною держбюджетних тем: «Розробка нового технологічного процесу одержання гетерогенних матеріалів на базі ЕШП для виробництва композитних роторів для енергетичних турбін нового покоління», 2009-2011рр. № 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», 2012-2014рр. № ДР 0109U000978; «Дослідження електрошлакового процесу виплавки суцільних та порожнистих злитків із теплостійких сталей і сплавів на супернадкритичні параметри (700-750°C)», 2012-2016рр. № ДР 0112U001516; «Створення нового покоління флюсів для сучасних електрошлакових технологій виробництва конструкційних матеріалів», 2015-2017рр. № ДР 0112U001502; «Розробка технології електрошлакового переплаву (ЕШП) для виробництва сучасних залізничних рейок підвищеної зварюваності», 2017-2021 рр. № ДР 0115U002612; «Розробка наукового обґрунтування та створення на основі методів спеціальної електрометалургії та композитних електродів наскрізної технології виробництва сучасних високоміцних сталей для зварних конструкцій», 2018-2020 рр. № ДР 0117U001184; «Розробка електрошлакових технологій керування кристалізацією

аустенітних жароміцних сталей і сплавів», 2015р. № ДР 0117U001184.

Структура дисертації.

Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 124 найменувань. Дисертація має загальний обсяг 167 сторінок, додатків на 15 сторінках, містить 68 ілюстрацій, з них 7 на окремих сторінках та 8 таблиць.

У **вступі** сформульована актуальність наукової проблеми, визначено мету, основні задачі, новизну, теоретичне значення і практичну цінність роботи.

Перший розділ “Сучасні технології та обладнання ЕШП. Системи автоматичного управління технологією та обладнанням” присвячено аналітичному огляду досліджень та публікацій за напрямком дисертації. На основі їх аналізу сформульовано основні напрями досліджень дисертації.

У **другому розділі** “Методика дослідження. Лабораторне устаткування” розглянуті і обґрунтовані методи досліджень та описане лабораторне устаткування, які були використані для досягнення поставлених в роботі цілей.

У **третьому розділі** “Дослідження впливу технологічних параметрів (прямого вимірювання й розрахункових) ЕШП на формування злитка ЕШП” представлено результати встановлення кореляційних залежностей за групами характеристик (big data), що дає змогу впроваджувати ефективні системи управління для здійснення та оптимізації перебігу технологічних процесів. Розділ присвячено лабораторним й промисловим експериментам з аналізом впливу технологічних параметрів процесу ЕШП на глибину металевої ванни і структуру злитків. Вплив технологічних параметрів в цілому на якість металу ЕШП відомий, але окремі деталі цього впливу залишаються не визначеними й потребують додаткових досліджень. Умовно ці параметри розділяються на три групи – тобто ті параметри, що підлягають прямому вимірюванню, простому обчисленню або за допомогою своєрідного віртуального програмного датчика (soft sensor) для постійних розрахунків, наприклад, занурення витратного електроду в шлак.

На основі результатів більш як 100 експериментальних плавок виконаних за різних схем подачі струму тощо встановлено, що метод визначення заглиблення електроду шляхом порівняння розрахункової зміни величини струму на однаковій ступені трансформатора через зменшення довжини витратного електроду в процесі переплаву дають похибку, яка перевищує дійсне занурення в шлак щонайменше на 15%.

Тому, запропоновано новий метод визначення положення торця витратного електроду в шлаковій ванні, який базується на періодичному збудженні зміни електричних параметрів переплаву примусовим переміщенням витратного електрода до поверхні шлакової ванни до наближення умов процесу до переходу від шлакового в дуговий режим.

У **четвертому розділі** «Випробування САУ ЕШП в лабораторних та промислових умовах» описане лабораторне доопрацювання свінг-контролю й промислове використання на печі типу ЕШП-10Г при проведенні серійних промислових плавок та представлено результати їх оптимізації. З огляду на

промислові умови й застарілу конструкцію цих печей (без захисної атмосфери) було вирішено випробувати свінг-контроль на короткому відрізку однієї плавки не більше години в головній частині зливка при використанні наддуву аргону для запобігання насиченню металу киснем та/або азотом. Плавки вели з підтриманням постійної продуктивності/швидкості переплаву, або й з підтриманням постійної потужності, що стало кроком вперед в порівнянні з веденням переплаву по опору шлакової ванни. На основі цих робіт було розроблено детальні пропозиції щодо вдосконалення систем управління печей ОКБ-1065 ПрАТ «Дніпроспецсталь».

У п'ятому розділі «Оновлення систем управління для печей ОКБ-1065» наведено матеріали практичного застосування запропонованої САУ для оновлення печей ОКБ-1065 цеху спеціальної електрометалургії. Автором розроблено пропозиції щодо реконструкції відділення сортових печей ЕШП, що включає декілька груп по чотири п'ятитонні печі ЕШП типу ОКБ-1065 в кожній. Печі ОКБ-1065 мають в своєму складі систему автоматичного управління, що працює на основі розрахунку за електричними параметрами плавки опору шлакової ванни. Оскільки в сортаменті цеху є багато різноманітних високолегованих сталей та сплавів, що схильні до різних ліквідаційних проявів, необхідність ЕШП із мінімальним заглибленням електроду в шлак є нагальною і вимагає оптимізації. Всі параметри проведених плавок задокументовано і зберігаються на робочій станції. Передбачено зв'язок Ethernet з мережею цеху для передачі і подальшої інтеграції інформації щодо плавок.

Наукова цінність роботи полягає в підвищенні ефективності виконання науково-дослідної роботи та її конкурентної спроможності за рахунок зменшення часу і витрат на розробку і впровадження нових вітчизняних технологій для підприємств України.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації забезпечується використанням та коректним узгодженням основних фундаментальних положень металургії із застосуванням розрахунково-аналітичних методів та методів комп'ютерного моделювання технологічних процесів, а також зіставленням одержаних автором розрахункових результатів з даними експериментів, отриманих стандартними методами експериментальних досліджень.

Наукові положення дисертації, основні результати досліджень, висновки і рекомендації автора достатньо обґрунтовані та відображають особистий внесок здобувача в досягнення мети дослідження.

Практичні результати роботи.

Теоретичне значення роботи полягає у можливості узагальнення механізмів впливу системи автоматичного управління ЕШП за двоконтурною схемою живлення на зміни співвідношення потужності струму за обома контурами в межах від 0 до 100% загальної.

Практична цінність дисертаційної роботи полягає у вирішенні широкого кола задач і створення алгоритмів автоматичного управління «свінг-контролю», які забезпечують стабільний контроль продуктивності процесу і мінімальне занурення електроду в шлакову ванну. Це гарантує зменшення витрат шлаку і електроенергії та формування металевої ванни мінімально можливої глибини для забезпечення гомогенної структури злитка.

Одержані автором наукові результати є важливими для практики при впровадженні в промисловість як нових сталей і сплавів, так і удосконалених складів існуючих промислових марок.

Практична цінність отриманих результатів підтверджена наведеними у додатку документами про впровадження результатів дисертації на підприємствах України. Результати роботи можуть бути рекомендовані для більш широкого використання у науково-дослідних закладах і проектних організаціях галузі.

Публікації за темою дисертації. Основні результати досліджень і сформульовані у дисертації наукові положення, висновки та рекомендації у повному обсязі викладено у 20 наукових праць, в тому числі 7 статей надруковано у спеціалізованих виданнях, що внесені до переліку фахових видань України, 5 статті внесені до реєстру міжнародних наукометричних баз SCOPUS/WoS й 5 доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях, а також отримано 3 патенти України.

Відповідність автореферату основним положенням дисертації. Автореферат ґрунтовно відображає зміст, основні положення та результати дисертаційної роботи, а висновки автореферату і дисертації повністю ідентичні.

Зауваження до дисертації. Розгляд дисертаційної роботи виявив ряд недоліків:

1. На початку загальних висновків до дисертаційної роботи в узагальнюючому реченні слід було б більш чітко сформулювати внесок здобувача у вирішенні технологічних завдань роботи та підвищенні якості, продуктивності технологічного процесу ЕШП та алгоритму для оптимізації складу високолегованих сталей.

2. Показано, що в результаті математичної обробки розрахункових і експериментальних даних та побудови схеми прямого визначення технологічних параметрів електрошлакового переплаву досягнуто оптимізації хімічного складу високолегованих сталей з різноманітними системами легування, але не приведено основних груп властивостей, які впливають на управління їх якістю, не достатньо висвітлено, як визначалися примусові параметри переплаву.

3. Робота зосереджена на дослідженні основних етапів технологічного процесу створення високолегованих сталей та сплавів у виробках різного функціонального призначення (роторів, дисків і т.п.), що визначають тривалість їх експлуатації, забезпеченні працездатного стану за допомогою вивчення зміни структури і складу.

Дані приведені у табл. 3.13 (стор.86), але немає необхідності у деяких з них такого (350 мм) діаметру виливки і нема прив'язки до інформативних у цих випадках оціночних параметрів експлуатаційних властивостей.

4. Є стилістичні помилки, зокрема на стор.101 згадано шість видів даних а приведено лише два (швидкість плавлення, ...), вжито термін двошвидкісний (замість двошвидкісний) редуктор (стор.106), а також повтори та використання деяких слів у невластивій формі - розрахунок шляху пройденого нижнім візком (стор. 113), ходу технологічних процесів (перебігу технологічних процесів), датчика (давача), помічено ряд інших несуттєвих описок.

5. Результати досліджень наведені дисертації в достатній мірі опубліковані у фахових виданнях та виданнях, що внесені до реєстру деяких міжнародних наукометричних баз даних, проте в майбутньому, маючи такі вагомні наукові результати, слід було б опублікувати їх у виданнях бази Scopus з більш високим імпаکت-фактором.

Однак, ці зауваження не мають принципового характеру та не знижують загальної позитивної оцінки роботи.

Висновки щодо відповідності дисертації встановленим вимогам МОН України.

В цілому подана дисертація виконана на високому науковому рівні і є цілісною завершеною кваліфікаційною науковою працею, в якій одержано нові наукові результати, що у сукупності є вагомим внеском у розвиток наукових принципів формування механізмів впливу системи автоматичного управління ЕШП, легування сталей і сплавів, які гарантовано забезпечують комплекс заданих властивостей.

Загальні висновки дисертаційної роботи повністю відповідають меті та поставленим завданням.

Автореферат у повній мірі відображає основний зміст, результати та висновки дисертаційної роботи і є ідентичним положенням дисертації.

Наведені в авторефераті та дисертації публікації повністю висвітлюють основні наукові результати дисертаційного дослідження.

Оформлення дисертації і автореферату відповідають вимогам МОН України.

Тема, зміст та результати дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.16.02 «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів» (технічні науки).

Вважаю, що за актуальністю теми, високим науковим рівнем виконаних досліджень, новизною, науковим та прикладним значенням одержаних результатів дисертаційна робота В.Л. Петренка «Розробка нових принципів управління технологічним процесом і побудова системи автоматичного

керування ЕШП», відповідає сучасним вимогам МОН України до кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
провідний науковий співробітник відділу міцності
матеріалів і конструкцій у водневовмісних
середовищах Фізико-механічного інституту
ім. Г.В. Карпенка НАН України



Балицький О.І.

