

829
30 04 2021

До спеціалізованої вченої ради
Д 26.182.02 при Інституті
електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України
м. Київ, вул. К. Малевича, 11

ВІДГУК

офіційного опонента
кандидата технічних наук, доцента Жаданоса Олександра Володимировича
на дисертаційну роботу
Петренка Володимира Леонідовича

**“Розробка нових принципів управління технологічним процесом і
побудова системи автоматичного керування ЕШП”**,
представлену на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за
спеціальністю 05.16.02 “Металургія чорних і кольорових металів та
спеціальних сплавів”

1. Актуальність теми дисертаційної роботи.

Розвиток енергетичного і важкого машинобудування вимагає укрупнення агрегатів, їх окремих вузлів і деталей. Тому зростає потреба у великих високолегованих злитках. З підвищенням маси злитка збільшується зональна і дендритна ліквіація, укрупнюються неметалеві включення, погіршується макроструктура, що призводить до погіршення якості продукції. Одним з найбільш ефективних методів отримання якісних великотоннажних злитків є розроблений в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона під керівництвом академіка Б.І. Медовара технологічний процес електрошлакового наплавлення рідким металом.

Печі електрошлакового переплаву є складним агрегатом, в якому одночасно реалізується процес плавлення електроду і кристалізація злитка в кристалізаторі на основі розділення електроду та розплавленого металу шаром розплаву шлаку, границі якого є рухомими. Особливістю процесу є те, що для отримання злитка належної якості необхідно контролювати низку технологічних параметрів, значення яких може бути визначене за допомогою комбінації прямих і непрямих вимірів. Для забезпечення контролю і управління складними металургійними процесами з метою забезпечення кількісних і якісних показників необхідні мультидисциплінарні підходи, які базуються як на

знаннях теорії металургійних процесів, так і на знаннях в галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Поява нових технологій, тісно пов'язаних з концепцією Індустрія 4.0, таких як, аналіз великих даних (big data analysis), хмари (clouds), інтернет речей (IoT – internet of things), є одним з найголовніших рушіїв сучасних АСУТП і дозволяє успішно вирішити існуючі проблеми управління електрошлаковим переплавом.

У зв'язку з цим актуальність дисертаційної роботи Петренка В.Л., направленої на розробку нових принципів управління процесом електрошлакового переплаву і їх доведення до практичної реалізації в системі АСУТП не викликає сумніву. Додатковим тому підтвердженням є зв'язок роботи з тематичними планами наукових досліджень Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України і галузевими програмами.

2. Наукова новизна отриманих результатів

Проблемами підвищення кількісних та якісних показників процесів електрошлакового переплаву займалася досить велика кількість дослідників до і одночасно з дисертантом. Його заслугою і новим внеском в рішення вказаних задач є системний підхід до аналізу технологічних параметрів, які впливають на якість злитків та підвищення техніко-економічних показників ЕШП (електричні параметри, ступінь заглиблення електроду в шлак та ін.), реалізація сучасних методів математичного моделювання, використання SCADA-систем, сучасних засобів автоматизації (на основі технологій Індустрія 4.0) із залученням даних промислового експерименту, що дозволило вийти на практичну апробацію теоретичних напрацювань і в результаті запропонувати новий рівень рішення задачі оперативного управління процесом. До наукової новизни слід віднести наступні результати:

1. На основі аналізу енергетичних параметрів та діапазонів керованості печей ЕШП за даними промислових плавок вперше ідентифіковані три зони контрольованості процесу ЕШП в залежності від величини міжелектродного проміжку (відстань між електродом та металевою ванною): зона контрольованого режиму, зона енергетично не вигідної роботи, зона неконтрольованого режиму.

2. Вперше встановлено, що для кожної печі ЕШП існують діапазони співвідношення між активним опором шлакової ванни й опором електричних ланцюгів короткої мережі, при якому втрачається зворотній відклик руху

електроду, що може призводити до переходу шлакового режиму в дуговий або в коротке замикання.

3. На основі експериментальних досліджень вперше доведено, що дуже важливим для забезпечення якісної структури злитка і раціональних техніко-економічних показників є ведення переплаву не тільки з постійною потужністю, але й з мінімальним заглибленням витратного електроду в шлак. Встановлено, що для забезпечення найменшої можливої глибини металевої ванни і, відповідно, мінімального розвитку ліквідаційних процесів, заглиблення електроду в шлак не повинно перевищувати 3-5% висоти шлакової ванни.

4. Вперше для використання у системах управління вітчизняних печей ЕШП запропонований та реалізований програмно-апаратний комплекс контрольованого заглиблення витратного електроду (swing-control), що дозволяє максимально ефективно вести електрошлаковий переплав.

3. Практична цінність отриманих результатів

Значення для науки розробок і висновків автора полягає в комплексності і системності опрацювання питання інформаційно-математичного забезпечення технології електрошлакового переплаву:

1. З використанням експериментального обладнання побудовано принципову схему непрямого визначення низки технологічних параметрів переплаву, значення яких складно отримати прямим вимірюванням.

2. Запропоновано новий метод контролю заглиблення електроду в шлак на основі провокування переходу з шлакового процесу до перехідного в дуговий режим за рахунок періодичного руху електроду до поверхні і навпаки вглиб шлакової ванни (swing-control). На підставі чого розроблено алгоритм ведення плавки з мінімальним заглибленням електроду в шлак.

3. Розроблено та запропоновано до впровадження в умовах ПАТ «Дніпрспецсталь» модернізовану трирівневу АСУТП ЕШП, основними апаратними елементами якої є програмований мікропроцесорний контролер Simatic S7-1500 з центральним процесором CPU-1517-3, модульні станції розподіленого вводу-виводу на основі мережі PROFIBUS (SIMATIC ET 200M-1). Інструментом людино-машинного інтерфейсу і необхідних розрахунків слугує сенсорна панель TP 1500 Comfort зі SCADA-системою WinCC. Позитивною рисою системи, що пропонується є можливість інтеграції в глобальну АСУ підприємства за допомогою технологій «інтернету речей» (IoT – internet of things) і хмарних технологій (clouds)

4. Матеріали дисертації можна використовувати для викладання дисциплін пов'язаних з теорією, технологію та автоматизацією процесів спеціальної металургії для магістрів і бакалаврів у закладах вищої освіти.

4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень.

Наявність достатньої кількості накопиченої в базах початкової інформації дозволила зробити достатньо обґрунтовані висновки.

Основними методами досліджень, використаних дисертантом при дослідженнях є розрахункові та експериментальні дослідження енергетичної ефективності процесу електрошлакового переплаву з використанням сертифікованих вимірювальних приладів, математичне моделювання тепломасобмінних процесів, металографічні дослідження макроструктури металу. Прийняті при побудові математичних моделей допущення не вносять істотних похибок в остаточні результати і висновки.

Для дослідження і синтезу систем управління автор використовує SCADA-системи Labview і TIA Portal відомих виробників та апаратну частину систем управління на основі елементарних баз фірм Siemens, Advantech та ін.

Методика проведення досліджень сумнівів не викликає, а одержані основні наукові результати і висновки слід вважати достовірними, оскільки вони забезпечені використанням сучасних положень теорії і технології електрошлакового переплаву, розвитку систем автоматизації металургійних агрегатів, узгодженням результатів, одержаних різними методами досліджень, перевіркою їх у виробничих умовах.

5. Повнота викладення наукових результатів, що отримані у дисертаційній роботі в опублікованих працях

Основні положення дисертації опубліковані в 20 наукових працях, з яких 5 статей входять до наукометричних баз SCOPUS/WOS (Scopus Author ID 8684949800, ORCID ID 0000-0003-2440-190, Індекс Гірша 2, 15 цитувань), 7 статей, що внесені до переліку фахових видань України, 5 наукових праць міжнародних науково-технічних конференцій, 4 патенти України.

Автореферат і опубліковані праці достатньо повно відображають основний зміст роботи.

6. Оцінка змісту дисертаційної роботи та її завершеності.

Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків і додатків, що демонструють результати дослідно-промислових випробувань і працездатність запропонованих моделей і алгоритмів.

Робота має загальний обсяг 167 сторінок і 6 додатків на 10 сторінках, містить 58 рисунків (з них 7 на окремих сторінках), 8 таблиць, список використаної вітчизняної і зарубіжної літератури із 124 найменувань.

У вступі обґрунтована актуальність роботи, наукова новизна, достовірність і практична значимість одержаних результатів, дана загальна характеристика роботи, сформульовані основні задачі досліджень. Автором цілком вірно наголошено на те, що технології Індустрії 4.0 є основними рушіями розвитку систем автоматизації в металургії.

У першому розділі розглянуті технології та обладнання ЕШП, основні залежності і критерії контролю класичного процесу ЕШП та відомі підходи до автоматизації печей ЕШП, датчики рівня розплаву в кристалізаторі.

Проаналізована ретроспектива установок електрошлакового переплаву та наведені їх основні конструктивні елементи, показані переваги і недоліки різних типів установок ЕШП. Значна увага приділена будові схем підведення електроенергії (пряма, біфілярна, двоконтурна) для однофазних і трифазних печей, основним математичним співвідношенням (представлені у вигляді передаточних функцій) і критеріям контролю процесу переплаву. Це дозволило авторам визначити основні параметри, якими необхідно управляти для забезпечення якісної структури злитку та недоліки в системах АСУ ЕШП, що існують.

Безумовно вдалим та максимально повним є аналіз основних видів датчиків контролю рівня розплаву в кристалізаторі під час плавлення. Приведені основні доводи «за і проти» їх використання в системах АСУТП. Разом з тим твердження автора, що ідеальною системою є «система автоматичного керування без участі оператора» є дискусійним оскільки є певні ризики повного виключення людини з управління складними та небезпечними металургійними агрегатами.

Розділ характеризується великою кількістю проаналізованої вітчизняної та закордонної літератури (90 джерел) та якісним методичним вкладенням. Фактично матеріали розділу можна використовувати для викладання дисциплін пов'язаних з теорією, технологію та автоматизацією процесів спеціальної металургії для магістрів і бакалаврів у закладах вищої освіти.

Таким чином, у розділі сформовані завдання дослідження по створенню сучасної АСУ ЕШП.

У другому розділі здійснено опис методики дослідження і лабораторного устаткування. Активні експерименти було здійснено на лабораторному устаткуванні Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона – печі Р-951/УШ-

149, а пасивні промислові експерименти – в умовах цеху №5 ПАТ «Дніпроспецсталь» на печі ОКБ-1065 (на жаль, не наведені її технічні параметри).

Особливістю лабораторної печі Р-951/УШ-149 є можливість реалізовувати різні технологічні схеми ЕШП як злитків суцільного перерізу, так і порожнистих, а також дообладнання, за участю автора, сучасною системою обробки прямих вимірювань на базі LabView компанії National Instruments з можливістю записувати та будувати діаграми з динамікою основних параметрів ЕШП. Таким чином, модернізація лабораторної печі Р-951/УШ-149 шляхом оснащення її сучасним обладнанням створила передумови для проведення подальших досліджень і реалізації мети та завдань дисертаційної роботи.

У **третьому розділі** виконано дослідження впливу технологічних параметрів електрошлакового переплаву на формування злитка. Автор цілком вірно відзначає ті перспективи для розвитку систем автоматизації, що дає один з напрямків Індустрія 4.0 - великі дані (*big data*). Дисертант здійснив класифікацію параметрів, які необхідно контролювати під час плавки за трьома категоріями: параметри, що підлягають прямому вимірюванню, простому обчисленню або обчисленню за допомогою віртуального програмного датчика (soft-sensor) для постійних розрахунків. Проаналізовано переваги та недоліки різних типів датчиків рівня шлакової ванни і рідкого металу, що використовують при ЕШП в короткому кристалізаторі та деякі перспективні рішення, що застосовуються в МБЛЗ, а також запропоновано схему вимірювань за допомогою розробленого за участю автора індуктивного датчика рівня рідкого металу вбудованого типу ДУИ-20, який успішно пройшов перевірку в лабораторних умовах і разом з системою вимірювання MLOC-2M продемонстрував високу точність детектування межі метал-шлак у кристалізаторах промислових печей ЕШП, що дає можливість стабілізувати роботу печі та забезпечити роботу обладнання. На жаль, автор не навів технічні параметри датчика та інформацію на яких підприємствах та організаціях цей датчик пройшов успішні випробування.

Аналіз енергетичних параметрів та діапазонів керованості печей ЕШП за даними 20 промислових плавок в умовах ПАТ «Дніпроспецсталь» дозволив авторів встановити деякі цікаві та нові для науки факти:

- Навіть незначна зміна ступені напруги призводить до коливань фактичної потужності до 4,5-5%, що не завжди є припустимим;
- Суттєвим для управління печі є заглиблення електроду, яке необхідно контролювати.

- Ідентифіковані три зони контрольованості процесу ЕШП в залежності від величини міжелектродного проміжку (відстань між електродом та металевою ванною): зона контрольованого режиму, зона енергетично невідповідної роботи, зона неконтрольованого режиму.

Експериментальні плавки, виконані для різних схем подачі струму, за безпосередньою участю автора дозволили дисертанту отримати данні щодо впливу технологічних параметрів ЕШП на глибину металевої ванни і структуру злитків. Доведено, що ЕШП за двоконтурною схемою (електроенергія подається на витратний електрод і струмопровідний кристалізатор) якісно змінює умови плавлення витратного електрода і геометричні параметри рідкої і рідко-твердої зони злитка. На рис. 3.18-3.20 (стор. 88-89) приведені макроструктури 6 злитків різних діаметрів, що були отримані для різної продуктивності печі і температури шлаку, проте в роботі відсутній опис цих рисунків.

Четвертий розділ присвячений випробуванню САУ ЕШП в лабораторних та промислових умовах. Автором запропоновано новий метод визначення положення торцю витратного електрода 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 - «swing control». У порівнянні з «класичним» методом (визначення заглиблення електрода шляхом порівняння розрахункової зміни величини струму на однаковій ступені трансформатору через зменшення довжини витратного електрода в процесі переплаву) цей метод значно більш точний. Пояснення суті цього, безумовно, нового і інноваційного методу, а також алгоритм його реалізації, наведено значно пізніше, що дещо ускладнює сприйняття матеріалу (розділ 5, стор. 143-145).

Експериментальні дослідження з метою відпрацювання режиму «swing control» було виконано в умовах Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона на печі Р-951/УШ-149 з встановленою дворівневою системою автоматичного управління, що включає в себе сенсори, виконавчі елементи, пульт ручного управління процесом і промисловий комп'ютер зі встановленою SCADA системою «Labview» фірми National Instruments (USA). На стор. 107-121 наведено її докладний опис.

Заслуговує схвалення компоновання лабораторної установки сучасною АСУ і великий обсяг активних промислових експериментів, який довів

дієздатність та ефективність нового алгоритму контролю положення електроду - «swing control».

Виконані лабораторні дослідження дозволили перевірити запропоновану АСУ на промисловій печі ЕШП-10Г (виплавлено 7 злитків). Цікавою особливістю досліджень є те, що вдалося зіставити електричні параметри плавки з якістю злитків, що були отримані. Наявність рисунків з макроструктурою злитків була б дуже доречною і підсилило б науковий рівень розділу. За результатами досліджень в АСУ були внесені корегуючі зміни: налаштування параметрів ПД-регулятора, додано відпрацювання аварійних ситуацій, показники тривалості різних режимів плавки, модернізовано алгоритм розрахунку кількості переплавленого металу.

Проведений великий обсяг експериментальної роботи створив передумови для оновлення систем управління печей ОКБ-1065 в умовах цеху №5 ПАТ «Дніпроспецсталь».

У **п'ятому розділі** автор розробив пропозиції щодо оновлення систем управління печей ОКБ-1065 в умовах цеху №5 ПАТ «Дніпроспецсталь». Існуюча там АСУ є морально застарілою і потребує заміни, а наявність алгоритму точного регулювання величини заглиблення електроду у шлак є вкрай необхідною, як для поліпшення якості злитку, так і для зниження витрат електричної енергії.

Основними апаратними елементами даної системи є (рис. 14) програмований мікропроцесорний контролер Simatic S7-1500 з центральним процесором CPU-1517-3, модульні станції розподіленого вводу-виводу на основі мережі PROFIBUS (SIMATIC ET 200M-1). Інструментом людино-машинного інтерфейсу і необхідних розрахунків слугує сенсорна панель TP 1500 Comfort (рис. 5.9, стор. 154, та додаток Ж стор. 180-182) зі SCADA-системою WinCC. Позитивною рисою системи, що пропонується є можливість інтеграції в глобальну АСУ підприємства за допомогою технологій «інтернету речей» (IoT – internet of things) і хмарних технологій (clouds).

Значна увага в розділі приділена питанням роботи ПД і ПІ регуляторів, які є складовою частиною системи, також слід зазначити значну кількість блок-схем, які пояснюють різні режими роботи АСУ.

Таким, чином виконано значний обсяг підготовчої роботи до модернізації АСУ ТП печей електрошлакового переплаву в умовах ПАТ «Дніпроспецсталь».

Аналіз розділів роботи дозволяє зробити висновки, що дисертація добре оформлена, написана грамотною технічною мовою, характеризується

цілісністю, високим науковим рівнем. За своїм змістом і рівню досліджень, по своїй завершеності і практичним результатам дана робота відповідає вимогам, що пред'являються до кандидатських дисертацій. Автореферат відповідає змісту дисертації.

7. Рекомендації в частині використання отриманих в роботі результатів.

Результати наукових досліджень дисертанта, і розроблені технічні та технологічні рішення і алгоритми систем автоматичного управління рекомендується використовувати на металургійних підприємствах, що мають установки електрошлакового переплаву, в учбових і науково-дослідних інститутах, об'єктом дослідження яких є процеси спеціальної металургії.

8. Зауваження по дисертаційній роботі.

1. У розділі 2 «Методика дослідження. Лабораторне устаткування» дисертаційної роботи, на жаль, не наведені технічні параметри печі ОКБ-1065 ПАТ «Дніпроспецсталь», теж саме стосується вдосконаленого електромагнітного датчика вбудованого типу ДУИ-20 (розділ 3 дисертаційної роботи) - автор не навів технічні параметри датчика та назву установи, де цей датчик пройшов успішні випробування.

2. У розділі 3 дисертантом ідентифіковані три зони контрольованості процесу ЕШП в залежності від величини міжелектродного проміжку (відстань між електродом та металевою ванною):

- зона контрольованого режиму,
- зона енергетично не вигідної роботи,
- зона неконтрольованого режиму,

і наведено відповідний рисунок (у дисертації рис. 3.11, а у авторефераті рис. 5). У першому висновку наукової новизни наводиться твердження що “межею керованості є співвідношення активного опору шлакової ванни до загального опору силових ланцюгів”. У цьому сенсі дуже доцільним було б у дисертації та авторефераті навести графік зон контрольованості процесу в залежності від величини цього співвідношення.

3. На рис. 3.18-3.20 (стор. 88-89) приведені макроструктури 6 злитків різних діаметрів, що були отримані для різної продуктивності печі і температури шлаку. На жаль, в роботі відсутній аналіз макроструктури цих

злитків. І навпаки, у розділі 4 (стор. 126-136) виконано аналіз макроструктури злитків, які були отримані в результаті промислових експериментів, але, не наведені самі макроструктури. Наявність рисунків з макроструктурою злитків була б дуже доречною і підсилила б науковий рівень розділу.

4. У четвертому розділі, який присвячений випробуванню САУ ЕШП в лабораторних та промислових умовах, автором запропоновано новий метод визначення положення торцю витратного електроду в шлаковій ванні - «swing control» (стор. 121). Пояснення суті цього, безумовно, нового і інноваційного методу, а також алгоритм його реалізації, наведено значно пізніше, що дещо ускладнює сприйняття матеріалу (розділ 5, стор. 143-145). Теж саме стосується і автореферату, в якому автор наводить посилання на рис. 6 (третій розділ) і рис. 7 (четвертий розділ), що є більш логічним ніж у дисертації, в якій аналогічні рисунки присутні у розділі 5 (рис. 5.3, 5.4 і 5.2 відповідно).

5. У дослідженнях на лабораторній печі Р-951/УШ-149 (розділ 4) та при розробці оновленої АСУТП печі ОКБ-1065, дисертант цілком справедливо використовує ПІД регулятори. На жаль, питання вибору параметрів ПІД-регуляторів, а також питання оцінки якості регулювання залишилися за межами цієї роботи.

6. При описі деяких параметрів в роботі приводиться їх оцінка на якісному рівні (гарною точністю, з запасом відповідає) без конкретної кількісної характеристики (стор. 57; стор. 62).

7. З урахуванням того, що в роботі визначена чітка конфігурація нової АСУ ТП для печі ОКБ-1065 в умовах ПАТ «Дніпроспецсталь» дуже доречним було б у окремому додатку до дисертації навести техніко-економічні розрахунки ефективності системи.

Приведені зауваження не вносять коректив в основні висновки і пропозиції і не знижують загальної цінності роботи.

9. Загальний висновок про відповідність дисертації вимогам

З вищевикладеного виходить, що дисертаційна робота Петренка Володимира Леонідовича, яку представлено на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, по своїй завершеності, одержаним теоретичним і практичним результатам, є завершеним науковим дослідженням, загальні висновки дисертаційної роботи відповідають її змісту. Дисертаційна робота повністю відповідає паспорту спеціальності 05.16.02 «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів».

Аналіз наукової новизни, практичних результатів, висновків і рекомендацій дозволяють зробити висновок про відповідність дисертаційної роботи вимогам пунктів 9, 11, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р., зі змінами, затвердженими постановами Кабінету Міністрів України №656 від 19.08.2015 р. та №1159 від 30.12.2015 р., та нормативним документам Міністерства освіти і науки України.

Кількість, обсяг та рівень видання публікацій повністю відповідають вимогам Департаменту атестації кадрів вищої кваліфікації МОН України. Аналіз особистого внеску автора роботи вказує на високий ступінь самостійності виконання досліджень та публікування їх результатів.

Таким чином, на підставі наведеного вище, вважаю що дисертаційна робота Петренка Володимира Леонідовича «Розробка нових принципів управління технологічним процесом і побудова системи автоматичного керування ЕШП» повністю відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів вищої кваліфікації МОН України щодо кандидатських дисертацій, а її автор, безумовно, заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів».

**Офіційний опонент,
доцент кафедри електрометалургії
Національної металургійної
академії України,
кандидат технічних наук, доцент**



ОЛЕКСАНДР Жаданос

Підпис Жаданоса Олександра Володимировича засвідчую

Начальник відділу кадрів
Національної металургійної
академії України



ВОЛОДИМИР Шифрін