

30 04 2021 825

ВІДГУК

офіційного опонента к.т.н. Верзілова Олексія Павловича
на дисертаційну роботу Зайцева Володимира Анатолійовича
«ЕЛЕКТРОШЛАКОВА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ БІМЕТАЛЕВИХ
СТАЛЕМІДНИХ ЗЛИВКІВ ДЛЯ ПОДОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ
ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ»,

представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів»

Дисертаційна робота складається з вступної частини, п'яти розділів та загальних висновків. Загальний обсяг складає 211 сторінок машинописного тексту, в тому числі 173 сторінки основного змісту, список використаної літератури на 117 джерел та додатки, містить 131 рисунок і 20 таблиць.

Актуальність теми.

Дугові печі постійного струму знаходять все більш широке застосування при отриманні сталі. Однією з особливостей конструкції дугового печі постійного струму, на відміну від ДСП змінного струму, є наявність одного або декількох подових електродів, вмонтованих в поду печі. Він являється анодом і служить для підведення струму до шихти і металу, що переплавляється в печі. Конструкція подового електрода повинна забезпечувати надійність електричного контакту з шихтою при мінімальних теплових втратах, ефективність охолодження електрода, простоту і технологічність його виготовлення. Матеріали для виготовлення подового електрода вибирають з урахуванням надійної роботи при високих теплових і струмових навантаженнях, стійкості до механічних і теплових ударів, чистоти розплаву і відсутності його взаємодії з футеровкою подини печі. Подовий електрод повинен забезпечувати безперебійну роботу подини, так як вихід його з ладу веде до тривалих простоїв при ремонті подини і заміні самого подового електрода. В сучасних дугових печах постійного струму перевага надається біметалевим сталемідним подовим електродам стержневого типу. Саме виготовлення цих елементів печі, є критичними з огляду на розширення використання дугових печей постійного струму не тільки для виплавки сталей різних марок, а й для плавки феросплавів, чавуну, кольорових металів і сплавів та ін. В той же час, добре відомі можливості електрошлакових технологій у виготовленні різних типів біметалів, які доцільно було б застосувати у виробництві не тільки для пари сталь-мідь, а й для інших біметалевих композицій, як-то сталей і сплавів для сучасних роторів парових турбін. Тому робота, яка спрямована на розвиток технологічних можливостей ЕСП для

виготовлення біметалевих зливоків сталь-мідь для подових електродів дугових печей постійного струму та інших композиційних зливоків є актуальною, а поставлені в ній наукові та прикладні завдання не викликають сумнівів.

Про актуальність теми дисертаційної роботи також свідчить її зв'язок з науковими темами наукових досліджень у рамках бюджетних тем та цільових програм НАН України, що виконувались в Інституті електрозварювання ім. С.О. Патона НАН України за безпосередньої участі автора: «Дослідження кристалізації нікелевих суперсплавів для газових енергетичних турбін нового покоління та створення технології ЕШП зливоків цих сплавів, вільних від плямистої ліквіації» (ДР 0102U005974, 2002-2006рр.); «Розробка наукових основ технологічних процесів з застосуванням електрошлакового та інших джерел нагріву та плавлення для отримання композитних багат шарових конструкційних та функціональних матеріалів з наперед заданим комплексом структури, фізичних, механічних та хімічних властивостей (ДР 0103U006165, 2003-2005рр.); «Розробка наукових основ електрошлакового переплаву сучасних жароміцних та інших високолегованих сталей і сплавів» (ДР 0106U005551, 2006-2008рр.); «Дослідження властивостей модельних багат шарових зливоків, одержаних методом ЕШП РМ із металу однорідного хімічного складу із високолегованої сталі 316L» (ДР 0108U001731, 2008р.); «Розробка нового технологічного процесу одержання гетерогенних матеріалів на базі ЕШП для виробництва композитних роторів для енергетичних турбін нового покоління» (ДР 0107U003292, 2009-2011рр.); «Створення нового покоління флюсів для сучасних електрошлакових технологій виробництва конструкційних матеріалів з наперед заданими властивостями» (№ ДР 0112U001502, 2012-2016рр.); «Оцінка ефективності застосування технологічної схеми електрошлакової виплавки сталемідних подових електродів змінного перетину для дугових печей в стаціонарному струмопідвідному кристалізаторі» (ДР 0109U002781, 2009р.), яка виконувалась під керівництвом автора дисертації.

Ступінь обґрунтованості та достовірність наукових положень.

Проведений аналіз дисертації та автореферату показав, що обґрунтованість та достовірність наукових положень, а також висновки і рекомендації, сформульовані у дисертації, цілком обґрунтовані, базуються на глибокому вивченні здобувачем літературних джерел, патентної літератури та власних результатів теоретичних і практичних розрахунків і досліджень. Доведено наступними результатами роботи.

У дисертаційній роботі розвинуті технологічні можливості ЕШП для виготовлення біметалевих зливоків сталь-мідь для подових електродів дугових печей постійного струму. Для досягнення поставленої мети було виконано

аналіз існуючих методів виготовлення сталемідних подових електродів та отримання біметалевих зливків методами електрошлакових технологій; визначено експериментально доцільність застосування ЕШП за двоконтурною схемою незалежного електричного живлення (ЕШП ДС) для з'єднання сталі з міддю в зливках діаметром 300-400 мм; досліджено експериментально технологічні й металургійні особливості ЕШП ДС з заміною електродів із застосуванням лабораторного устаткування для мінімізації довжини перехідної зони між сталлю та міддю в біметалевих зливках; досліджено структуру зони сплавлення сталі та міді, а також механічні властивості та питомий електричний опір литого металу зони сплавлення сталемідного зливку; розроблені рекомендації щодо реалізації процесу ЕШП ДС з заміною електродів для виробництва сталемідних зливків для виготовлення промислових подових електродів ДППС; виготовлено промислово-дослідну партію сталемідних зливків для подових електродів промислових ДППС.

У роботі використані сучасні аналітичні, розрахункові та експериментальні методи досліджень із залученням загальноприйнятих методик металографічних досліджень макро- і мікроструктури металу, стандартних методик визначення механічних властивостей металу, а також спеціально розроблених методик визначення електричного опору з моделюванням підвищених температур експлуатації забезпечуються достовірність результатів і висновків. Дисертантом широко використані сучасні методики моделювання процесів та математичної обробки даних результатів досліджень.

Наукові положення, висновки і рекомендації узгоджуються з існуючими концепціями, їх достатня обґрунтованість підтверджується визнанням на відомих вітчизняних та міжнародних конференціях, опубліковані у фахових виданнях.

Наукова новизна роботи полягає в тому що автором досліджено особливості ЕШП ДС при переході від переплаву витратних електродів одного хімічного складу – сталевих, до іншого – мідних, та вплив основних технологічних параметрів плавки на форму і глибину металеві ванни й формування з'єднання різнорідних металів, що дозволило вирішити важливу науково-практичну задачу отримання біметалевих сталемідних зливків та сформулювати нові принципи виробництва зливків змінного хімічного складу великого перерізу. Зокрема одержано наступні нові наукові результати:

Вперше експериментально доведена можливість отримання електрошлаковим переплавом за двоконтурною схемою біметалевих сталемідних зливків Ø350 мм змінного по висоті складу з контрольованою

довжиною перехідної зони між різнорідними металами меншою ніж 0,3-0,4 діаметру зливка;

Автором вперше визначено, що питомий електричний опір біметалевої сталемідної заготовки $\varnothing 350$ мм в поздовжньому напрямку в перехідній зоні від одного металу до іншого є стабільним по всьому перетину і становить $1,86 \times 10^{-7} - 6,02 \times 10^{-8}$ Ом·м при кімнатній температурі, і $1,2 \times 10^{-7} - 2,4 \times 10^{-6}$ Ом·м при робочих температурах подового електроду ($450^\circ\text{C} - 500^\circ\text{C}$);

Експериментально перевірено гіпотезу й підтверджено можливість використання ЕШП за двоконтурною схемою для отримання біметалів з суттєво різними фізичними властивостями шляхом заміни складу шлаку під час зміни електродів й припинення, а потім поновлення наплавлення - витягування зливка. Показано, що для сталемідного зливка зупинка переплаву на протязі 25-30 хвилин дає змогу провести заміну шлаку, електродів й поновити процес наплавлення зливка та його витягування без утворення дефектів.

Практичне значення роботи. В дисертаційній роботі запропонована й успішно випробувана технологія ЕШП ДС зі зміною електродів по ходу перепаву при виготовленні дослідно-промислової партії сталемідних злиwkів $\varnothing 350$ мм. З цієї партії були виготовлені подові електроди для дугових печей постійного струму садкою від 0,5 до 12 тонн на вітчизняних підприємствах.

Розроблено й запатентовано конструкцію модульного подового електроду для печей великої потужності з діаметрами подового електроду 600-650 мм зі сталемідних злиwkів ЕШП ДС з контрольованою перехідною зоною. Розроблено технологічні рекомендації для виробництва сталемідних злиwkів діаметром до 700 мм для подових електродів ДППС потужністю до 420 тон на сучасних печах ЕШП. Розроблено основні принципи технології виготовлення заготовок біметалевих деталей великого перерізу на кшталт роторів парових турбін.

Відповідність тексту автореферату і дисертації. Текст автореферату відповідає змісту, структурі та основним положенням дисертації.

Редакційний аналіз. Текст дисертації та автореферату викладений науковою мовою, послідовно, рисунки інформативні. Всі розділи дисертаційної роботи логічно взаємопов'язані.

Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях. Основні наукові положення, що повністю розкривають зміст та основні результати дисертаційної роботи, відображено в 16 наукових публікаціях, в тому числі 8 у фахових виданнях України, та представлено на 6 вітчизняних та міжнародних науково-практичних конференціях.

Аналіз основного змісту роботи.

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, дано її загальну характеристику, описано мету й завдання дослідження, висвітлено наукову новизну отриманих результатів і практичне значення роботи. Наведено дані про апробацію результатів дисертаційної роботи, про публікації, що відображають її зміст, зазначено особистий внесок здобувача, наведено структуру й обсяг дисертації.

У **першому розділі** на основі літературного огляду розглянуті сучасні дугові сталеплавильні печі постійного струму, визначено їх характеристики та області застосування в сучасній металургії. Проаналізовано принципи дії та конструктивні особливості подових електродів дугових сталеплавильних печей постійного струму. Розглянуті основні методи виготовлення стрижневих біметалевих сталемідних подових електродів та умови їх експлуатації. Проаналізовано методи виробництва біметалів, зокрема біметалу сталь-мідь. Визначено, що для подових електродів ДППС перспективної стрижневої конструкції потрібні біметалеві сталемідні заготовки діаметром 300 мм й і більше. Проаналізовано значний доробок в теорію й практику виробництва біметалів, зроблений вітчизняними та закордонними вченими, в тому числі і заснованими на електрошлакових технологіях. Розглянуто застосування ЕШП ДС для отримання біметалевих зливок з різних сталей й сплавів, з різницею між температурами початку тверднення 100-150°C, що стало основою для формулювання припущення щодо доцільності використання електрошлакових технологій для виробництва біметалу сталь-мідь, зокрема технологій ЕШП із застосуванням струмопідвідного кристалізатору й з двоконтурної схеми живлення. Представлено принципову схему ЕШП ДС з заміною електродів в процесі переплаву, що в результаті попереднього аналізу було запропоновано для отримання сталемідних зливок. Сформульовано постановку задач дослідження.

У **другому розділі** приведені установки та методики досліджень, описано використане в дослідженнях устаткування – лабораторна піч ЕШП для зміни електродів в процесі переплаву й ведення переплаву за двоконтурною схемою живлення з фіксацією основних електричних параметрів переплаву, вибрані матеріали. Основними матеріалами були обрані сталь СтЗсп та мідь М1. Основним методом дослідження обрано натурні експерименти з ЕШП ДС із заміною сталевого електроду на мідний електрод. Режимми плавлення задавали на основі математичного моделювання розподілу температур в сталемідних зливках при різних умовах переплаву. Дослідження зливок проводили за стандартними методами вивчення макро- та мікроструктури й механічних властивостей металу.

Для визначення електроопору сталевій частині, перехідній й мідній зони біметалевих зразків при кімнатній температурі та в діапазоні робочих температур подових електродів, використано методику двозондового вимірювання питомого електричного опору, засновану на реєстрації падіння напруги на зразку в залежності від величини струму, який проходить через цей зразок. Приведена методика вимірювання температурної залежності питомого електроопору в діапазоні робочих температур подових електродів, яку для виключення впливу зовнішніх факторів проводили в малоінерційному вакуумному кріостаті ($P = 10^{-3}$ Па), в інтервалі температур 25-500°C в режимі стабілізації температури з точністю 1°C у всьому температурному діапазоні.

Третій розділ містить результати визначення автором особливостей використання ЕШП ДС для отримання сталемідних заготовок подових електродів ДППС. Вибрані розміри зливків на основі необхідних розмірів заготовок для подових електродів ДППС і можливостей лабораторного устаткування ЕШП ДС у лабораторії ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, на якому проводили експериментальні плавки. Тому з самого початку використано існуючий кристалізатор з діаметром формуючої секції 350 мм. З огляду на попередні експерименти з отримання біметалевих зливків з комбінуванням сталей, що відрізнялись порівняно невеликою різницею температур твердіння, було випробувано те саме співвідношення електричної потужності, що подається на витратний електрод й на струмопідвідний кристалізатор на стадії переплаву електроду з більшою температурою плавлення, при витримці між зміною електродів й кінцевою операцією – переплавом електроду з меншою температурою плавлення.

При електрошлаковій виплавці міді та її сплавів добре себе зарекомендував флюс АНФ-28, тому для електрошлакової виплавки сталемідних зливків було обрано саме цей флюс. До того ж цей флюс справив позитивне враження при його використанні і для ЕШП ДС, зокрема при проведенні попередніх експериментів з отримання сталевих біметалевих зливків.

Для зменшення розміру перехідної зони в сталемідних зливках у ході виконання дисертаційної роботи було побудовано математичну модель розрахунків температурних полів біметалевого зливку на основі підходів, що запропоновано українським вченим академіком НАН України Махненко Володимиром Івановичем (Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України). Розрахунки показали доцільність зміни не тільки співвідношення потужності, що вводиться у шлакову ванну на всіх стадіях ЕШП ДС, а й збільшення часу витримки при заміні сталевого електроду на мідний. Математичне моделювання дозволило визначити, що першу стадію ЕШП ДС,

при переплаві сталевому електроду, доцільно проводити зі співвідношенням електрода до кристалізатора як 70-75% до 30-25%, а перед заміною сталевому електроду на мідний проводити своєрідне підживлення головної частини зливка із значенням цього співвідношення 30%-70% щонайменше впродовж 10 хвилин, що для кристалізатору Ø350 мм дозволяє зменшити глибину металевої ванни в середньому від 200 мм до 40 мм. Автором було також визначено, що перед початком переплаву мідного витратного електроду, на стадії заміни сталевому електроду на мідний доцільно робити часову витримку не менше ніж 10 хвилин, що в подальшому дозволяє вести переплав міді без великого перемішування зі сталлю й без збільшення перехідної зони виплавленого біметалевого зливка.

Приведені результати моделювання температурних полів, форм рідкої металевої ванни та характер розподілу фаз на всіх етапах виплавки сталемідного зливка ЕШП ДС для випадку витратних сталевих електродів Ø220 мм й мідних електродів Ø150 мм. Представлене математичне моделювання процесу виготовлення сталемідних зливок методом ЕШП ДС зі зміною електродів по ходу переплаву зроблене з урахуванням впливу особливостей будови струмопідвідного кристалізатора Ø 350 мм, для чого була розроблена його тривимірна твердотільна модель. Приведені результати моделювання, які демонструють розподіл температурних полів сталемідного зливка, форм рідкої металевої ванни, а також характер розподілу фаз на всіх технологічних етапах виготовлення біметалу. На основі моделювання також були обрані значення загальної електричної потужності на шлаковій ванні, потужність на витратному електроді й струмопідвідному кристалізаторі, діаметри витратних електродів й час витримки без плавлення електродів з підтримкою електрошлакового процесу при 100%-ій потужності що подається на струмопідвідна секцію кристалізатора, які було враховано для наступних натурних плавок.

Четвертий розділ присвячено дослідженню якості сталемідних зливок виготовлених за допомогою ЕШП ДС зі зміною електродів й підготовці до виготовлення дослідно-промислової партії зразків сталемідних зливок для виготовлення із них подових електродів, а також випробуванню цих подових електродів на реальних печах ДППС. Для дослідження структури металу сталемідного з'єднання, електричних характеристик заготовок майбутніх подових електродів печей ДППС, металографічних досліджень, з огляду на складність підбору мідних електродів постійних геометричних розмірів й ймовірне використання в подальшому здебільше мідного лому невизначених розмірів, було вирішено провести випробування металу сталемідного зливку, що було отримано в перших попередніх експериментах. Автором наведено

схему відбору зразків. Всього відібрано 12 зразків: 2 в мідній частині зливка, 1 в сталевій, 4 шт. в перехідній зоні від міді до сталі по вісі зливка, 3 шт. на половині радіусу зливка та 2 шт. вирізано біля поверхні зливка. Кількість зразків обраних дисертантом для досліджень, та місце їх відбору з темплету, вибиралися так, щоб на макротемплеті перехідна зона від міді до сталі мала однаковий вигляд на макрорівні. Подальше вивчення мікроструктури зразків підтвердило правильність відбору – мікроструктура при збільшенні $\times 25$ й $\times 50$ була ідентичною для зразків від поверхні зливка до його центру. Мікроструктура зразків на половині радіусу зливка мала вигляд, з чіткою границею розділу між мідною й сталевою частинами. Аналогічний вигляд мала й структура перехідної сталемідної зони біля його поверхні й на вісі зливку, де проникнення міді в сталь було вдвічі більшим, але чітка границя розділу між сталлю і міддю зберігалась. Згідно з багатьма дослідженнями зварюваності сталі з міддю саме наявність фериту запобігає глибокому проникненню міді в ферито-перлитну сталь якою і є сталь СтЗсп.

Вищезазначені факти дали підставу для визначення механічних властивостей перехідної зони сталь-мідь та її електричного опору на зразках, перш за все, з половини радіусу зливка. Металографічні дослідження сталемідних злиwkів діаметром 350 мм, і зокрема зони з'єднання, підтвердили високу хімічну і структурну однорідність металу зливка виплавлених за допомогою ЕШП ДС зі зміною електродів по ходу переплава. В зоні з'єднання відсутні дефекти усадочного і ліквіаційного характеру, а також продемонстровано формування дисперсної однорідної структури, та задовільні значення міцностних характеристик. Аналіз результатів вимірювання мікротвердості самої перехідної зони показав, що її твердість зі сторони міді складає приблизно 2230 МПа, а зі сторони сталі приблизно 2260 МПа.

Всі зразки, що пройшли іспит на розрив, були зруйновані біля границі сталь-мідь зі сторони міді, й показали, в середньому, такі ж результати, що є в інших авторів для сталемідних з'єднань, аледля значно меншого перерізу: $\sigma_{0.2} = 153$ МПа; $\sigma_n = 387$ МПа; $\delta_5 = 21\%$; $\psi = 75\%$.

При проведенні типових випробувань якості зварного з'єднання на холодний згин під кутом 45° жоден із сталемідних зразків не було зруйновано. Для всіх зразків характер було продемонстровано в'язкий характер руйнування виключно по мідній їх частині.

Робоча температура подового електроду в печі ДППС в зоні з'єднання сталі з міддю, за даними вимірювань на різних ДППС при різних режимах плавки, може досягати при певних обставинах 450°C - 500°C . Для врахування цієї обставини в дисертаційній роботі були проведені вимірювання питомого електричного опору сталемідних зразків як при кімнатній температурі, так і в

вищезазначеному діапазоні. У даному розділі у повному об'ємі представлені результати цих вимірювань. В цілому автором встановлено, що питомий електричний опір зразків при переході від сталі до міді практично був стабільним, як при кімнатній температурі, так і при максимальних робочих температурах подового електроду, й становив близько $1,86 \times 10^{-7} - 6,02 \times 10^{-8}$ Ом·м для кімнатної температури, та $2,8 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-7}$ Ом·м для робочих температур подового електроду відповідно. Завершення цих досліджень дозволило перейти до виготовлення сталемідних зливків для подових електродів різних промислових ДППС України в лабораторних умовах й на обладнанні Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

У п'ятому розділі автором приведена відкоригована технологія ЕШП ДС з заміною електродів для виготовлення сталемідних зливків й представлені можливості розширення цієї технології на інші біметалеві композиції результати доопрацювання технології ЕШП ДС; після доопрацювання виготовлена партія сталемідних зливків діаметром 350 мм загальною довжиною 1100-1200 мм, з довжиною сталеві частини від 500 до 650 мм (в залежності від конструкції подових електродів конкретних ДППС). Для переходу до стабільного виготовлення біметалевих зливків й подових електродів із них, додатково в лабораторії ІЕЗ ім. Є.О. Патона були провели експериментальні плавки з метою покращення поверхні мідної частини зливків, для яких при використанні флюсу АНФ-28 потрібна була механічна обробка на глибину до 15 мм до отримання чистої бездефектної поверхні. З огляду на те, що флюс АНФ-28 близький до флюсу АНФ-28М: 40-50% CaF_2 , 30-40% CaO , 18-32% SiO_2 , $\leq 6\%$ MgO , що з успіхом використовують для ЕШП мідних зливків, в т.ч. в коротких кристалізаторах з витягуванням зливка, було розраховано параметри, необхідні для зміни шлаку при заміні сталеві електроду на мідний, а саме склад шлаку та час витримки. В роботі оцінена можливість використання розширення струмопідвідного кристалізатору, для додаткової подачі орієнтовно 15% MgO у шлакову ванну при заміні сталеві витратного електроду на мідний. В ході експериментальних плавок встановлено, що перехід від формуючої секції $\varnothing 350$ мм до струмопідвідної секції $\varnothing 380$ мм дозволяє зберегти стабільність процесу ЕШП ДС при виплавці сталемідних зливків в струмопідвідному кристалізаторі такої геометрії. Зазначено, що при цьому з'являється необхідність підтримувати рівень шлаку в струмопідвідній секції не вище 50-60 мм й не нижче 20-30мм. Для цього початкова маса шлаку при виплавці першого електроду із сталі в нашому випадку має становити від 25 кг до 35 кг. Так як витрати шлаку на гарнісаж сталеві частини зливка становлять не більше 3 кг при середній товщині його від 1,5 мм до 2 мм, автором зроблено висновок, що заміна шлаку принципово можлива й питання

тільки в тому чи вистачить часу витримки для розплавлення 15% MgO (орієнтовно до 4 кг). В результаті проведення прямих натурних експериментів встановлено, що навіть одночасне додавання такої кількості MgO у шлакову ванну струмопідвідного кристалізатору не викликає помітних змін електричного режиму й надсильного зниження температури шлакової ванни, а розплавлення й розсередження її триває не більше 2 хвилин. Тому було використано саме цей технологічний прийом: заміна сталевого електроду, витримка до 10 хвилин з додаванням на початку витримки до 4 кг MgO, й початок плавлення мідного електроду.

У розділі представлено зразки сталемідних зливків з механічною обробкою мідної частини, які в подальшому було використано для виготовлення подових електродів різних ДППС, а також наведено список підприємств із тоннажністю печей, на яких встановлювались подові електроди ДППС зі сталемідних зливків ЕШП ДС.

На основі отриманих результатів для зливків 350 мм діаметром сформульовано основні елементи технології ЕШП ДС для виготовлення сталемідних зливків діаметром до 700 мм, що потребує, наприклад, виготовлення подових електродів найбільшої в світі 420-тонної ДППС, яку побудовано до сьогодні, зформульовані основні вимоги як до матеріалів, що мають місце при виготовленні таких подових електродів, так і до геометричних розмірів сталемідних заготовок для таких подових електродів. Практично, основні елементи такої технології випробувано, й визначено, що для її реалізації може бути використана будь-яка сучасна піч ЕШП зі зміною електродів й витягуванням зливків, дообладнана до можливості ведення переплаву за двоконтурною схемою живлення.

В дисертаційній роботі було також проаналізовано можливості розширення методу ЕШП ДС із заміною електродів окрім виготовлення сталемідних зливків й на інші біметалеві композиції, зокрема для виготовлення композитних роторів сучасних енергетичних турбін. Зазначено, що саме в експериментах зі сталемідним біметалом Ø350мм була показана можливість з'єднання різнорідних металів з різницею в температурах плавлення не десятки, а сотні градусів, що відкриває перспективу для подальшої розробки технології ЕШП ДС для біметалу «9-12% Cr жароміцна сталь» - «нікелевий суперсплав типу Inconel 718». Розрахунки в дисертації за моделлю для сталемідної пари показали, що при виготовленні зливків діаметром 1000-1200 мм при заміні електродів, потрібна витримка щонайменше на протязі півгодини для вирівнювання профілю ванни жароміцної сталі перед початком переплаву електроду із сплаву Inconel. Окрім цього вказано, що для отримання такого роду з'єднань потрібна й захисна атмосфера, але принципово може бути

використано саме метод, що розроблено й випробувано для отримання сталемідних зливків з діаметром з'єднання різнорідних металів 350мм.

Висновки дисертації у повній мірі відображають головні результати дослідження і повністю відповідають змісту дисертації.

На завершення дисертації здобувачем наведено список використаних джерел та додатки.

Зауваження щодо змісту та оформлення роботи:

1. В дисертаційній роботі не приведені результати аналізу сталемідних заготовок на вміст газів, особливо мідної їх частини, як однієї із базових складових досліджень металевих зливків.

2. У різних місцях дисертації та автореферату надано різні значення максимальної садки промислових печей ДППС, на яких були змонтовані сталемідні подові електроди виготовлені ЕШП ДС з заміною електродів (стор. 2, 3 та 14 анотації та стор. 159 дисертаційної роботи, стор. 2, 3, 14 в авторефераті).

3. На мою думку в роботі недостатньо приділено уваги опису технологічного прийому заміни електродів що витрачаються. Не зрозуміло який вплив чинить час зміни цих електродів на форму перехідної зони сталемідного зливка.

4. У тексті дисертації детально наводяться данні про перерозподіл потужностей між електродом і кристалізатором у різних пропорціях, проте не приведено яку ж саме треба підводити загальну/сумарну потужність на шлакову ванну при ЕШП ДС сталемідних зливків, включаючи як потужність ланцюгу електричного живлення витратного електроду, так і ланцюг кристалізатора.

5. На графіках рисунків 4.28 та 4.31 у розділі 4 дисертації не відображено лінією, чи у інший наглядний спосіб, де саме знаходиться межа переходу від сталі до міді, із-за чого не до кінця зрозуміло де саме данні питомого електричного опору для сталевий частини біметалевого зразка, а де для мідної.

6. В печатному чорно-білому варіанті як автореферату, та і дисертації рисунки не читабельні (наприклад сталь за кольором майже не відрізняється від міді) і тому не несуть того смислового навантаження, яке було в них автором закладено початково.

Загальний висновок.

Зазначені зауваження не знижують наукової та практичної цінності та значимості дисертаційної роботи і не впливають на її загальну позитивну оцінку.

Дисертаційна робота Зайцева Володимира Анатолійовича на тему «Електрошлакова технологія отримання біметалевих сталемідних зливків для подових електродів дугових сталеплавильних печей» є повністю завершеною науковою роботою, в якій вирішується науково-практична задача отримання біметалевих сталемідних зливків – заготовок для вітчизняних дугових печей постійного струму, а також сформульовані принципи виробництва зливків змінного складного хімічного складу великого перерізу. Актуальність, наукова новизна, обґрунтованість та достовірність основних наукових положень, висновків та рекомендацій, наукові результати та практична цінність дисертаційної роботи відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.13р. № 567 до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а її автор **Зайцев Володимир Анатолійович** заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів».

Офіційний опонент:

Кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник відділу магнітної гідродинаміки
Фізико-технологічного інституту
металів та сплавів НАН України



О.П. Верзілов

Підпис Верзілова О.П. засвідчую:

Вчений секретар ФТІМС НАН України,
кандидат технічних наук



В.А. Лахненко