

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

**ЗАЙЦЕВ ВОЛОДИМИР АНАТОЛІЙОВИЧ**

УДК 669.187.56:621.74.046

**ЕЛЕКТРОШЛАКОВА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ БІМЕТАЛЕВИХ  
СТАЛЕМІДНИХ ЗЛИВКІВ ДЛЯ ПОДОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ ДУГОВИХ  
СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ**

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

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

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

**Медовар Лев Борисович,**

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,  
м. Київ, завідувач відділу

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

**Овчарук Анатолій Миколайович,**

Національна металургійна академія України МОН України,  
м. Дніпро, професор кафедри

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

**Верзілов Олексій Павлович,**

Фізико – технологічний інститут металів та сплавів НАН  
України, м. Київ, старший науковий співробітник

Захист відбудеться «13» травня 2021 р. о 10-00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.182.02 при Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 11, вул. Казимира Малевича, м. Київ, 03150, Україна.

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

Автореферат розісланий «12» квітня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.182.02  
кандидат технічних наук



С.Г. Григоренко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Тенденції розвитку світової чорної металургії останніх років свідчать про те, що частка виплавки сталі в дугових сталеплавильних печах (ДСП) в загальному об'ємі світового виробництва сталі буде постійно зростати. В розвинених країнах ця частка вже вдвічі більша за об'єми виплавки в кисневих конверторах. Цей процес зумовлено багатьма факторами, зокрема постійним здешевленням виробництва електроенергії й величезними об'ємами щорічного утворення сталевого лому, що сягають вже 1 мільярда тон. Окрім цього, зростання частки електросталі зумовлено ще й необхідністю скорочення викидів CO<sub>2</sub>. Сьогодні в світі використовують ДСП на змінному і постійному струмі. Дугові печі постійного струму (ДППС) мають цілий ряд переваг над ДСП змінного струму, й їх кількість в металургії та ливарному виробництві постійно збільшується. Сьогодні поруч зі 100-150 тонними ДППС вже працює рекордсмен – 420 тонна ДППС, що поставлена фірмою «Danieli» в Японію. Більш того, намітилась тенденція переобладнання порівняно невеликих ДСП ливарних виробництв на ДППС. Одним з критичних елементів конструкції ДППС є подовий електрод, що є анодом. Хоча ДППС конструюють й експлуатують багато років, досі немає сталих технічних рішень для анодів, на кшталт графітових електродів й електродотримачів для ДСП. Це значно обмежує розширення використання ДППС. В конструкціях ДППС різних компаній використовують різноманітні конструкції подових електродів, але в більшості випадків усі вони мають біметалеві елементи сталь-мідь. Саме виготовлення цих елементів з огляду на відомі проблеми надійного з'єднання сталі й міді, є головним бар'єром на шляху розширення використання ДППС не тільки в сталеплавильному виробництві, а й для виплавки чавуну, феросплавів, кольорових металів і сплавів, переробки шлаків. В той же час, добре відомими є широкі можливості електрошлакових технологій у виготовленні різних типів біметалів. Це стало підставою для постановки теми дисертаційної роботи, що є актуальною вже сьогодні з огляду на постійно зростаючий попит промисловості на ДППС в Україні.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема роботи відповідає пріоритетному напрямку науки й техніки України «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромислового комплексу». Виконання роботи пов'язане з планами науково-дослідних робіт Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, у яких автор брав безпосередню участь: «Дослідження кристалізації нікелевих суперсплавів для газових енергетичних турбін нового покоління та створення технології ЕШП зливків цих сплавів, вільних від плямистої ліквідації» (ДР 0102U005974, 2002-2006рр.); «Розробка наукових основ технологічних процесів з застосуванням електрошлакового та інших джерел нагріву та плавлення для отримання композитних багатошарових 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 багатошарових зливків, 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.) виконувалась під керівництвом автора дисертації.

**Мета роботи та задачі дослідження.** Метою роботи є розвиток технологічних можливостей ЕШП для виготовлення біметалевих зливків сталь-мідь для подових електродів дугових печей постійного струму. Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі було необхідно вирішити наступні задачі:

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

**Об'єкт дослідження:** електрошлаковий переплав за двоконтурною схемою зі зміною витратних електродів з різнорідних металів для отримання біметалу сталь-мідь.

**Предмет дослідження:** діапазони основних технологічних параметрів ЕШП ДС як то, швидкість плавлення електродів, електрична потужність, що вкладається в шлаковий розплав, розподіл електричної потужності між витратним електродом та струмопідвідним кристалізатором, профіль двофазної зони зливка, структура біметалевих зливків сталь-мідь та властивості їх перехідної зони.

**Методи дослідження.** Відповідно до поставлених задач використовували комплексні сучасні аналітичні, розрахункові та експериментальні методи досліджень із залученням загальноприйнятих методик металографічних досліджень макро- і мікроструктури металу, стандартних методик визначення механічних властивостей металу, спеціально розроблених методик визначення електричного опору з

моделюванням підвищених температур експлуатації. Зразки для дослідження біметалу сталь-мідь виготовляли з повномасштабних біметалевих зливків ЕШП діаметром 350 мм.

**Наукова новизна отриманих результатів.** 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 металевої 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 доведено 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;

- вперше визначено, що питомий електричний опір біметалевої сталемідної заготовки Ø350 мм в повздовжньому 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. Для сталемідного зливка зупинка протягом 25-30 хвилин дає змогу провести заміну шлаку, електродів й поновити процес наплавлення зливка та його витягування без утворення дефектів.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

- Технологія ЕШП ДС успішно випробувана при виготовленні пілотної партії біметалевих сталемідних зливків Ø 350 мм. З цієї партії були виготовлені подові електроди для ДППС різної садки від 0,5 до 15 тон.

- Встановлено, що час роботи подових електродів з біметалевих сталемідних зливків ЕШП вдвічі перевершив час роботи подових електродів інших методів виготовлення, що до того часу використовували на тих самих печах.

- Розроблено й запатентовано конструкцію аноду для печей великої потужності з діаметрами подового електроду 600-650 мм зі сталемідних зливків ЕШП ДС з контрольованою перехідною зоною.

- Розроблено технологічну інструкцію для виробництва сталемідних зливків діаметром до 700 мм для подових електродів ДППС потужністю до 420 тон.

- Розроблено основні принципи технології виготовлення заготовок біметалевих деталей великого перерізу на кшталт роторів парових турбін.

**Особистий внесок здобувача.** За безпосередньою участю автора проведено комплекс експериментальних і розрахункових досліджень з метою визначення особливостей процесу формування біметалевих сталемідних зливків за допомогою

ЕШП ДС, а також макро- та мікроструктури й службових характеристик біметалу. Наведені в дисертації обґрунтування, аналіз і узагальнення результатів експериментальних й розрахункових досліджень виконані автором особисто. Результати досліджень опубліковано у співавторстві з колегами, в своїй більшості з відділу фізико-металургійних проблем електрошлакових технологій ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. До особистого внеску автора відносяться: розрахунки основних геометричних параметрів зливоків, що виплавляються, із застосуванням способу ЕШП ДС на базі існуючого устаткування ЕШП [4-8,11,12,19]; постановка задачі та участь в побудові математичної моделі температурного розподілу в процесі ЕШП ДС та аналіз результатів математичного моделювання [10,13,16,21]; виплавка та аналіз промислово-дослідної партії сталемідних зливоків [4,11,18,19]; оцінка якості металу зони сплавлення зливоків за механічними властивостями, фактографічні дослідження поверхонь зломів зразків і встановлення характеру руйнування, аналіз мікро- та макроструктури виплавленого біметалу [2,3]; дослідження питомого електричного опору сталемідних зливоків [18]; оцінка перспективності застосування технології ЕШП ДС для виготовлення подових електродів надпотужних ДППС [1,4,7,11]; уточнення способу виготовлення подового модульного електроду ДППС та остаточна редакція формули винаходу [14,15,17].

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові положення та результати дисертаційної роботи доповідались на шести наукових конференціях: Київська конференція молодих вчених «Новітні матеріали та технології» (м. Київ, Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова, 16-17 листопада 2006р.); V Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів „Зварювання та суміжні технології” (м. Київ, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона, 2009р.); V міжнародна конференція «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (сmt. Кацівелі, АР Крим, Україна, 25-28 травня 2010р.); VI Международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (сmt. Кацівелі, АР Крим, Україна, 29 травня - 1 червня 2012г.); 2<sup>nd</sup> Medovar Memorial Symposium (м. Київ, Україна, 7-10 червня 2016р.); 9<sup>th</sup> International Conference of Young Scientists on Welding and Related Technologies (WRTYS-2017) (м. Київ, Україна, 23-26 травня 2017р.).

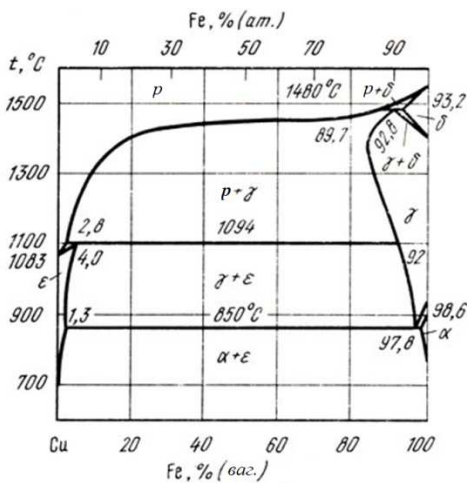
**Публікації.** По темі дисертації у співавторстві опубліковано 18 друкованих праць, в тому числі 10 у фахових виданнях України та одержано 3 патенти України.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з вступної частини, п'яти розділів та висновків. Викладена на 173 сторінках, містить 131 рисунок та 20 таблиць, використано 117 літературних джерел.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ 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, 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 Б.Є. Патон, Б.І. Медоваром, С.А. Голованенко, Л.Г. Пузріним, В.Я. Саєнко, Л.В. Меандровим, А.І. Астровим, К. Yamanaka, В. Arnold, Т. Heijikoop, J. Suchon та ін. В той же час, відомостей щодо отримання біметалевих з'єднань сталь-мідь великого перетину в літературі немає. Вочевидь, це пов'язано зі складнощами, що зумовлені практичною відсутністю з'єднань цих металів, що засвідчує діаграма стану залізо-мідь (рис.1), з якої видно мінімальні значення розчинення заліза в міді, на рівні не більше 2,5%. Це стало основою для формулювання припущення щодо доцільності використання електрошлакових технологій для виробництва біметалу



сталь-мідь, зокрема технологій ЕШП із застосуванням струмопідвідного кристалізатору й з двоконтурною схемою живлення. Розглянуто застосування ЕШП ДС для отримання біметалевих зливків з різних сталей й сплавів, з різницею між температурами початку тверднення 100-150°C.

Рис.1. Діаграма Cu – Fe.

На рис. 2 зображено принципову схему ЕШП ДС, що в результаті попереднього аналізу було запропоновано для отримання сталемідних зливків. Сформульовано задачі, які необхідно вирішити в процесі виконання роботи.

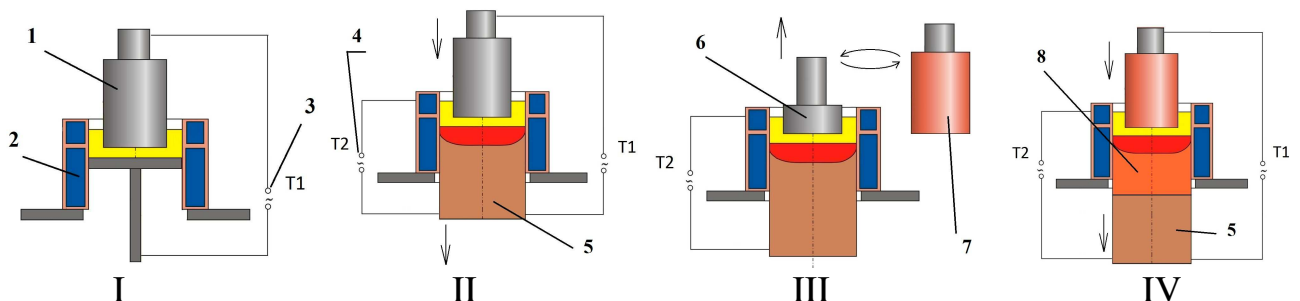


Рис. 2. Поетапна схема електрошлакового переплаву за двоконтурною схемою з заміною витратних електродів при виплавці сталемідного зливку: «I» – наведення шлакової ванни; «II» – переплав сталевих витратних електродів; «III» – зміна електроду й витримка; «IV» – переплав мідного витратного електроду, де:

1 – сталевий витратний електрод; 2 – кристалізатор; 3 – джерело живлення №1; 4 – джерело живлення №2; 5 – сталева частина виплавленого біметалевого зливка; 6 – недогарок сталевий витратний електрод; 7 – мідний витратний електрод; 8 – мідна частина виплавленого біметалевого зливка.

У другому розділі описано використане в дослідженнях устаткування – лабораторна піч ЕШП, обладнана для зміни електродів в процесі переплаву згідно зі схемою, що показано на рис. 2, й ведення переплаву за двоконтурною схемою живлення з фіксацією основних електричних параметрів переплаву, як показано на рис. 3.

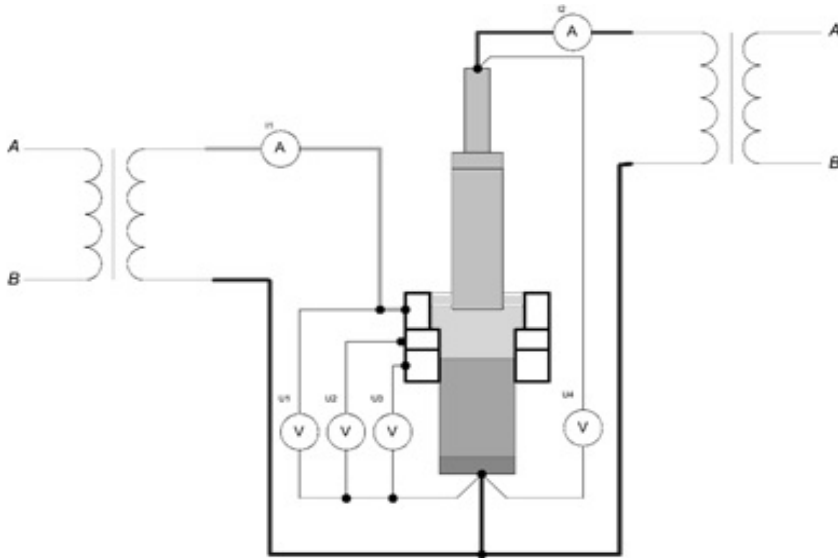


Рис. 3. ЕШП ДС сталемідних зливків й схема електричних вимірювань.

Основними матеріалами були вуглецева сталь типу СтЗсп та мідь М1 промислового виробництва. Основним методом дослідження обрано натурні експерименти з ЕШП ДС із заміною сталевий

електроду на мідний. Режимми плавлення задавали на основі математичного моделювання розподілу температур в сталемідних зливках при різних умовах переплаву. Дослідження зливків 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 (рис. 4).

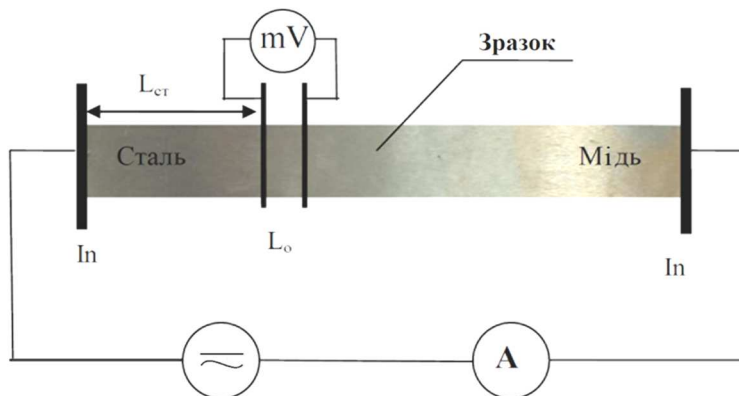


Рис. 4. Схема вимірювання питомого електроопору сталемідних зразків подових електродів.

Для виключення впливу зовнішніх факторів вимірювання температурної залежності питомого

електроопору в діапазоні робочих температур подових електродів проводили в



малоінерційному вакуумному кріостаті ( $P \cong 10^{-3}$  Па), в інтервалі температур 25-500°C в режимі стабілізації температури з точністю 1°C у всьому температурному діапазоні.

**Третій розділ** містить результати визначення особливостей використання ЕШП ДС для отримання сталемідних заготовок подових електродів ДППС. Розміри зливків вибрано на основі необхідних розмірів заготовок для подових електродів ДППС і можливостей лабораторного устаткування ЕШП ДС, на якому проводили експериментальні плавки. Тому з самого початку використано кристалізатор з діаметром формуючої секції 350 мм. З огляду на попередні експерименти з отримання біметалевих злитків з комбінуванням сталей, що відрізнялись порівняно невеликою різницею температур твердіння, що не перевищувала 30-40°C, було випробувано те саме співвідношення електричної потужності, що подається на витратний електрод ( $W_1$ ) й на струмопідвідний кристалізатор ( $W_2$ ) на стадії переплаву електроду з більшою температурою плавлення (стадії «I-II», як показано на рис.2), при витримці між зміною електродів (стадія «III» на рис.2) й кінцевою операцією – переплавом електроду з меншою температурою плавлення (стадія «IV» на рис.2). Це співвідношення для початкових експериментів становило:

- на стадіях «I» й «II» –  $W_1:W_2 = 60-70\%:40-30\%$ ;
- на стадії «III» –  $W_1:W_2 = 0:100\%$  з витримкою до 10 хвилин до початку переплаву (вводу в шлакову ванну) електроду іншого хімічного складу;
- на стадії «IV» –  $W_1:W_2 = 50-60\%:50-40\%$ .

В якості флюсу було обрано флюс АНФ-28 (40-55%  $CaF_2$ , 25-35%  $CaO$ , 20-25%  $SiO_2$ ,  $\geq 5\%$   $Al_2O_3$ ) з огляду на позитивний досвід його використання, як для ЕШП сталей з витяжкою зливків і при виплавці міді, так і для ЕШП ДС, при проведенні попередніх експериментів з отриманням сталевих біметалевих зливків. Зазначимо також, що ці експерименти проводили з електродами різного хімічного складу, але однакових геометричних розмірів, перш за все однакового діаметру 220 мм.

Перші експерименти показали, що пряме перенесення цих режимів не дає можливості надійного переходу від сталі до міді, й потрібне їх корегування. На рис.5 представлено повздовжній темплет біметалевого сталемідного зливка, що має досить велику перехідну зону від сталі до міді.



Рис.5. Повздовжній макротемплет біметалевого сталемідного зливка

Для вирішення задачі мінімізації перехідної зони було побудовано математичну модель розрахунків температурних полів біметалевого зливка на основі підходів академіка В.І. Махненка (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України). Теплове поле системи електрод-шлак при ЕШП ДС описували наступною системою рівнянь для електроду і для шлаку:

Рівняння енергії для електроду:

$$\rho_e C_e r \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + U \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_e \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r \lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} \right) + r Q_J, \quad (1)$$

де:  $\rho_e$  – питома щільність металу електроду,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$C_e$  – теплоємність металу електроду,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$U$  – вертикальна швидкість руху електроду,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$\lambda_e$  – теплопровідність металу електроду,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $Q_J$  – Джоулева теплота,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ .

*Граничні умови для електроду:*

- на боковій поверхні електроду з боку доквілля:

$$-\lambda_e \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_i} = \sigma_0 \varepsilon_1 [T^4 - T_a^4] + \alpha_1 (T - T_a), \quad (2)$$

- на боковій поверхні електроду з боку шлаку:

$$-\lambda_e \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_i} + q_{melt} = \alpha_s (T_s - T), \quad (3)$$

- на торці електроду з боку шлаку:

$$-\lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} + q_{melt} = \alpha_s (T_s - T), \quad (4)$$

де:  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  – постійна Стефана – Больцмана,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;  $\varepsilon_1$  – ступінь чорноти системи електрод-доквілля;  $\alpha_1, \alpha_s$  – коефіцієнти конвективної тепловіддачі до доквілля й до шлаку,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $R_i$  – значення змінних радіусів електроду,  $T_a$  – температура доквілля,  $q_{melt}$  – теплота, що витрачається на плавлення електроду,  $\text{Вт}/\text{м}^2$

Рівняння енергії для шлаку має бути записано наступним чином:

$$\rho_s C_s r \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} \right) + r (Q_J - Q_M), \quad (5)$$

де:  $\rho_s$  – питома щільність шлаку,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $C_s$  – теплоємність шлаку,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$\lambda_s$  – теплопровідність шлаку,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $Q_J$  – Джоулеве тепло в шлаку,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ ;  $Q_M$  – теплота, що йде на нагрів крапель металу в шлаковій ванні,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ .

*Граничні умови для шлаку:*

- на боковій поверхні зі сторони кристалізатору:

$$-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_m} = \alpha_m (T_m - T), \quad (6)$$

- на поверхні шлаку:

$$-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} = \sigma_0 \varepsilon_2 [T^4 - T_a^4] + \alpha_3 (T - T_a), \quad (7)$$

- на границі металевої ванни й шлаку:

$$-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_2 (T_{Me} - T), \quad (8)$$

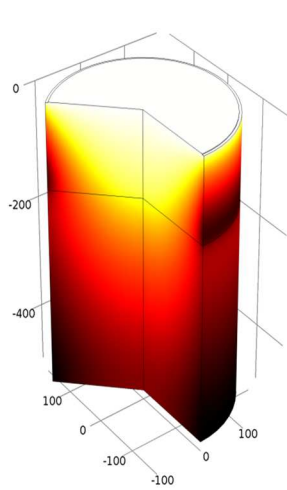
де:  $\epsilon_2$  – ступінь чорноти системи шлак-довкілля;  $\alpha_3, \alpha_2, \alpha_m$  – коефіцієнти конвективної тепловіддачі від шлаку в довкілля, металу й кристалізатору відповідно,  $Вт/(м^2 \cdot К)$ ;  $T_{Me}$  – температура поверхні металевої ванни,  $К$ ;  $T_m$  – температура поверхні кристалізатору,  $К$ .

Теплофізичні властивості сталі, міді та шлаку приведені в таблиці 1.

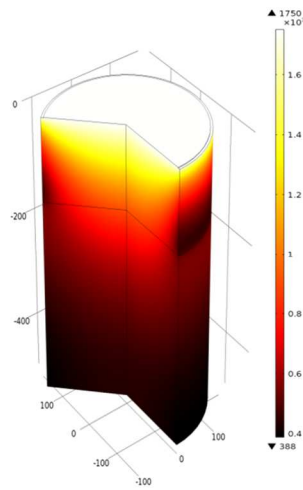
Таблиця 1. Теплофізичні властивості й параметри теплообміну при моделюванні ЕШП ДС

Параметр/матеріал	Теплофізичні властивості			Коефіцієнти теплообміну
	Сталь	Мідь	Шлак	
Теплопровідність, $Вт/(м \cdot К)$	30	390	3,5	$\alpha_1 = 15 \text{ Вт}/(м^2 \cdot К)$
Теплоємність, $Дж/(кг \cdot К)$	670	381	1250	$\alpha_2 = 1850 \text{ Вт}/(м^2 \cdot К)$
Питома щільність, $кг/м^3$	7700	8890	2850	$\alpha_3 = 30 \text{ Вт}/(м^2 \cdot К)$
Ступінь чорноти	0,7	0,7	0,8	$\alpha_s = 600 \text{ Вт}/(м^2 \cdot К)$
				$\alpha_m = 250 \text{ Вт}/(м^2 \cdot К)$

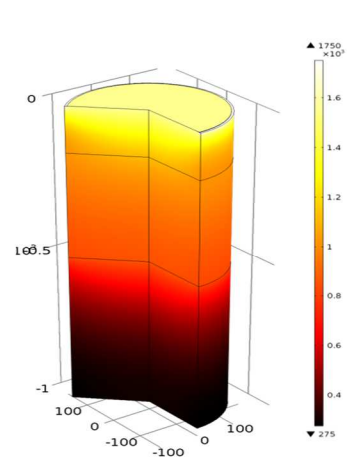
При такій постановці задачі можна розрахувати температурні поля при ЕШП й ЕШП ДС зі зміною електродів з різними геометричними розмірами й з різних матеріалів, а також зі зміною шлаку. Розрахунки показали доцільність зміни не тільки співвідношення  $W_1:W_2$  на всіх стадіях ЕШП ДС, а й збільшення часу витримки при заміні сталевих електродів на мідний. Розрахунки проводили для двох діаметрів сталевих електродів – 220 мм й 250 мм, а еквівалентні діаметри мідних електродів були 150, 180 й 220 мм. В усіх випадках для різноманітних співвідношень діаметрів математичне моделювання дозволило визначити, що першу стадію ЕШП ДС, при переплаві сталевих електродів, доцільно проводити зі співвідношенням  $W_1:W_2=70-75\% : 30-25\%$ , а перед заміною сталевих електродів на мідний проводити своєрідне підживлення головної частини зливка зі співвідношенням  $W_1:W_2=30\%-70\%$  щонайменше впродовж 10 хвилин, що для кристалізатору з діаметром формуючої частини 350 мм дозволяє зменшити глибину металевої ванни в середньому від 200 мм до 40 мм. Було також визначено, що для всіх еквівалентних діаметрів мідних електродів, що розглядали при моделюванні, перед початком їх переплаву на стадії «III» доцільно робити витримку не менше ніж 10 хвилин, що дозволяє вести подальший переплав міді без великого перемішування зі сталлю й збільшення перехідної зони виплавленого зливка. На рис. 6 наведено результати моделювання ЕШП ДС для випадку витратних сталевих електродів діаметром 220 мм й мідних електродів діаметром 150 мм.



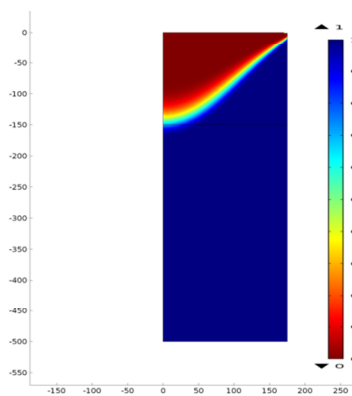
Розподіл температурних полів в сталій частині біметалевого зливку



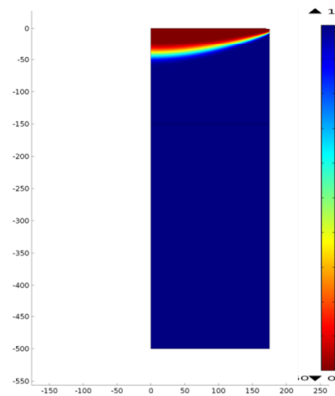
Розподіл температурних полів в сталій частині біметалевого зливку під час заміни сталюго електроду на мідний



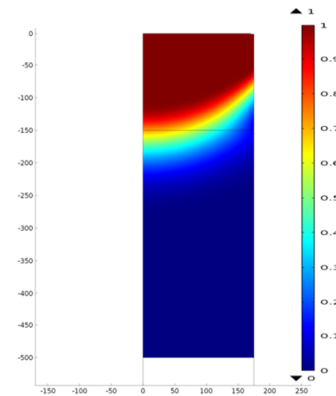
Розподіл температурних полів в мідній частині біметалевого зливку



Форма рідкої сталювої ванни й характер розподілу фаз у сталемідному зливку



Форма рідкої сталювої ванни й характер розподілу фаз у сталемідному зливку під час заміни сталюго електроду на мідний



Форма рідкої мідної ванни й характер розподілу фаз у сталемідному зливку

Рис. 6. Температурні поля при ЕШП ДС сталемідного зливку з витримкою 15 хвилин на стадії «III» при заміні витратного сталюгого електроду на мідний, у співвідношенні  $W_1:W_2$  для стадії «I», «II» і «IV» -75%:25%.

Моделювання дозволило обрати цільові значення цих параметрів для наступних натурних плавок: загальну електричну потужність на шлаковій ванні  $W$ , кВА, потужність на витратному електроді й струмопідвідному кристалізаторі  $W_1$ , кВА й  $W_2$ , кВА відповідно, діаметри витратних електродів й час витримки без плавлення електродів з підтримкою електрошлакового процесу зі 100% потужністю на кристалізаторі  $W_2$ .

**Четвертий розділ** присвячено вивченню механічних властивостей й питомого електричного опору біметалу сталь-мідь й підготовці до виготовлення пілотних зразків сталемідних зливків, подових електродів з них, а також випробуванні цих

подових електродів на реальних печах ДППС. З огляду на складність підбору мідних електродів постійних геометричних розмірів й вельми ймовірне використання в подальшому здебільше мідного лому невизначених розмірів, було вирішено провести випробування металу сталемідного зливку, що було отримано в перших експериментах. На рис.7 наведено схему відбору зразків для проведення металографічних досліджень перехідної зони сталь-мідь, її механічних властивостей й питомого електроопору.

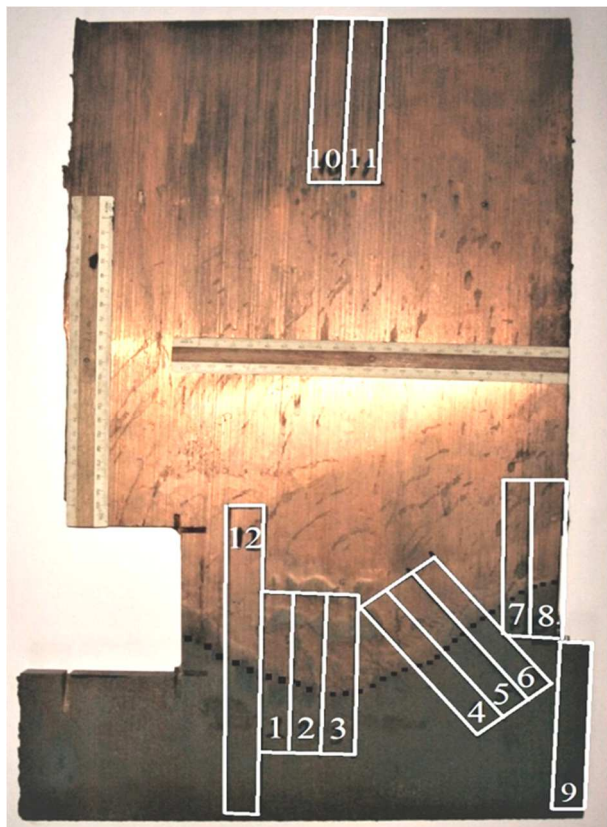


Рис.7 Схема вирізки зразків з повздовжнього темплету сталемідного зливку ЕШП ДС. Мідна частина зверху.

Всього було 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 обирали з огляду на те, 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, що представлено на рис. 8 з чіткою границею розділу між

мідною й сталеву частинами.

Аналогічний вигляд мала й структура перехідної сталемідної зони біля його поверхні й на вісі зливка, 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 (в нашому випадку – СтЗсп).

Це дало підставу для визначення механічних властивостей перехідної зони сталь-мідь та її електричного опору на зразках, перш за все, з половини радіусу зливка, тобто №№ 4, 5 й 6. Аналіз результатів вимірювання мікротвердості перехідної зони показав, що твердість перехідної зони зі сторони міді складає приблизно 2230 МПа, а зі стороною сталі приблизно 2260 МПа, що співпадає з даними вимірювань мікротвердості при аргоно-дуговому зварюванні сталі з міддю.



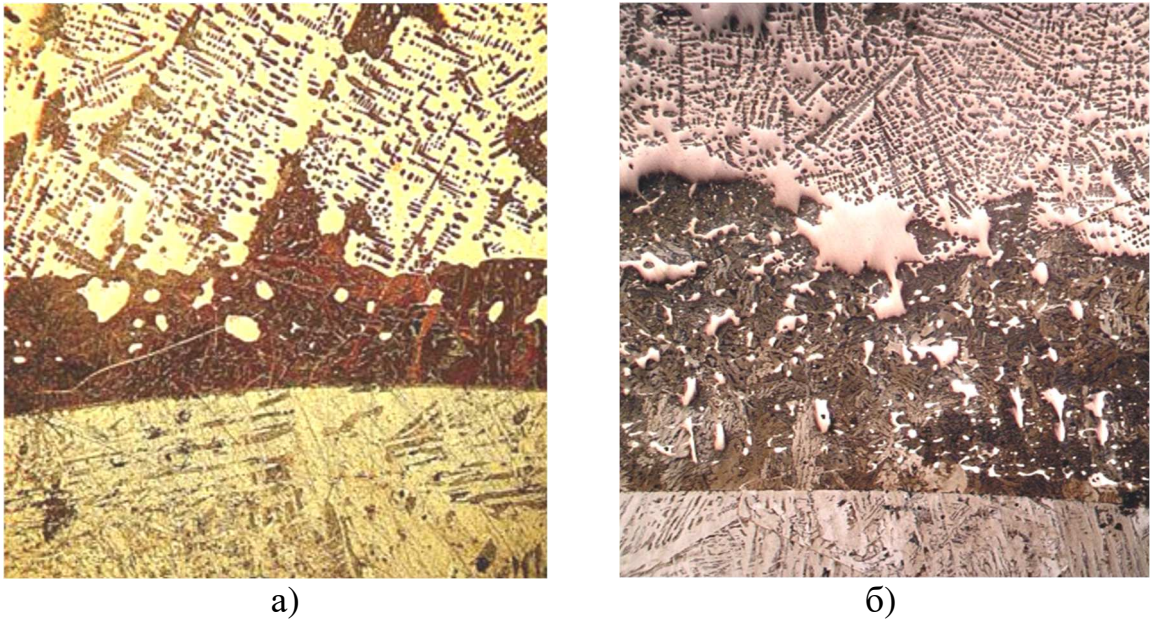


Рис. 8. Мікроструктура перехідної зони від міді до сталі при різних збільшеннях: а – збільшення  $\times 25$ ; б – збільшення  $\times 50$ .

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 значно меншого перерізу:  $\sigma_{0,2} = 153$  МПа;  $\sigma_B = 387$  МПа;  $\delta_5 = 21\%$ ;  $\psi = 75\%$ .

При проведенні типових випробувань якості зварного з'єднання на холодний згин під кутом  $45^\circ$  жоден із сталемідних зразків не було зруйновано.

Вимірювання питомого електричного опору сталемідних зразків проводили при кімнатній температурі та в діапазоні робочих температур перехідної сталемідної зони подового електроду, що може досягати  $450^\circ\text{C} - 500^\circ\text{C}$  за даними вимірювань на різних ДППС при різних режимах. Результати вимірювань представлені на рис.9.

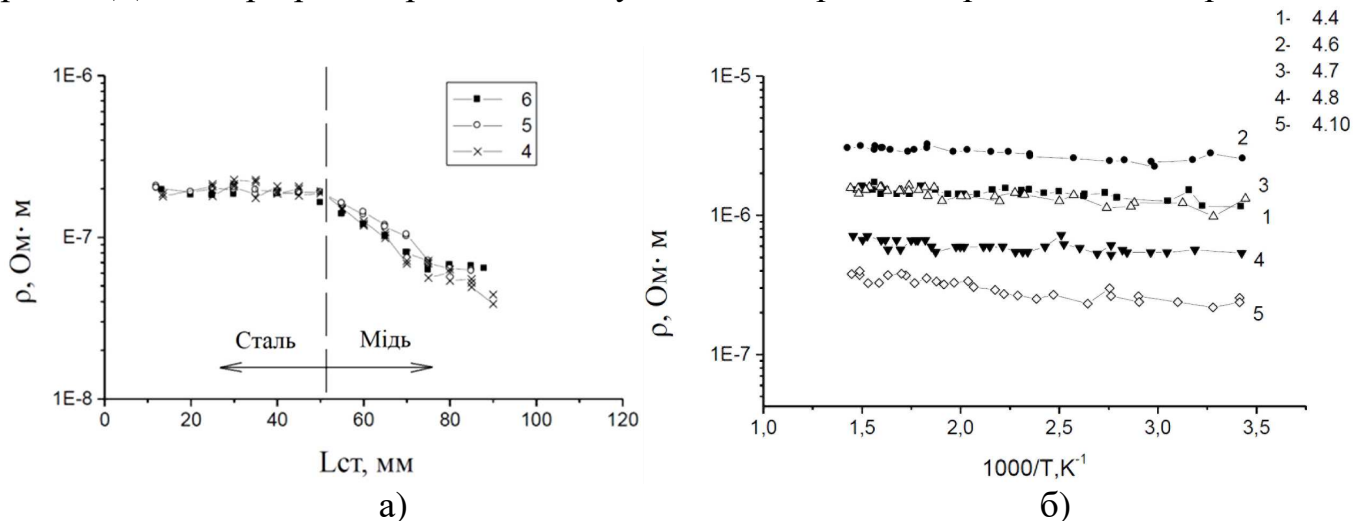


Рис. 9. Зміна питомого електричного опору сталемідних зразків № 4, 5 і 6 при переході від сталевій до мідній частині через перехідну зону при кімнатній температурі (а), та вирізаних зразків із сталемідного зразка № 4 в залежності від зміни температури (б).

В цілому питомий електричний опір зразків при переході від сталі до міді практично не змінюється, як при кімнатній температурі, так і при максимальних робочих температурах подового електроду ( $450^{\circ}\text{C}$  -  $500^{\circ}\text{C}$ ), й знаходиться в інтервалі  $1,86 \times 10^{-7}$  –  $6,02 \times 10^{-8}$  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 пілотного виготовлення сталемідних зливків для подових електродів різних ДППС України в лабораторних умовах на обладнанні Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Ці роботи було виконано в тісному співробітництві з розробниками конструкції стержневих сталемідних подових електродів (к.т.н. Тищенко П.І.).

У п'ятому розділі приведено результати доопрацювання технології ЕШП ДС, за якої виготовили партію сталемідних зливків діаметром 350 мм загальною довжиною 1100-1200 мм, з довжиною сталеві частини від 500 до 650 мм, яку змінювали відповідно до конструкції подових електродів конкретних ДППС. Для переходу до стабільного виготовлення біметалевих зливків й подових електродів із них, додатково провели експериментальні плавки з метою покращення поверхні мідної частини зливків, яка при використанні флюсу АНФ–28 потребувала механічної обробки 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%  $\text{CaF}_2$ , 30-40%  $\text{CaO}$ , 18-32%  $\text{SiO}_2$ ,  $\leq 6\%$   $\text{MgO}$ , 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 сталевого електроду на мідний, а саме склад шлаку та час витримки (стадія «III» на рис. 2). Оскільки для зміни шлаку необхідно додати орієнтовно 15%  $\text{MgO}$ , була оцінена можливість використання розширення струмопідвідного кристалізатору - перехід від формуючої секції  $\varnothing$  350 мм до струмопідвідної секції  $\varnothing$  380 мм. Як показали численні експериментальні плавки, для збереження стабільності ЕШП ДС в струмопідвідному кристалізаторі такої геометрії, необхідно підтримувати рівень шлаку в струмопідвідній секції не вище 50-60 мм й не нижче 20-30мм. Для цього початкова маса шлаку при виплавці сталі в нашому випадку мала становити від 25 кг до 35 кг. Витрати шлаку на гарнісаж сталеві частини зливка становлять не більше 3 кг при середній товщині його від 1,5 мм до 2 мм. Отже заміна шлаку принципово можлива й питання тільки в тому чи вистачить часу витримки для розплавлення 15%  $\text{MgO}$  (орієнтовно до 4 кг). Прямими експериментами встановлено, що навіть одночасне додавання такої кількості  $\text{MgO}$  не викликає помітних змін електричного режиму й 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  $\text{MgO}$  й початок плавлення мідного електроду («IV» стадія на рис. 2). На рис. 10а представлено зразки сталемідних зливків з механічною обробкою мідної частини, які в подальшому було використано ПП «РОУД» для виготовлення подових електродів різних ДППС (рис. 10б), які представлено в таблиці 2. Окремо зазначимо, що за даними кінцевих користувачів подові електроди цієї конструкції

працювали безвідмовно й напрацювання до заміни було вдвічі більшим в порівнянні з подовими електродами інших конструкцій й з іншими сталемідними з'єднаннями.

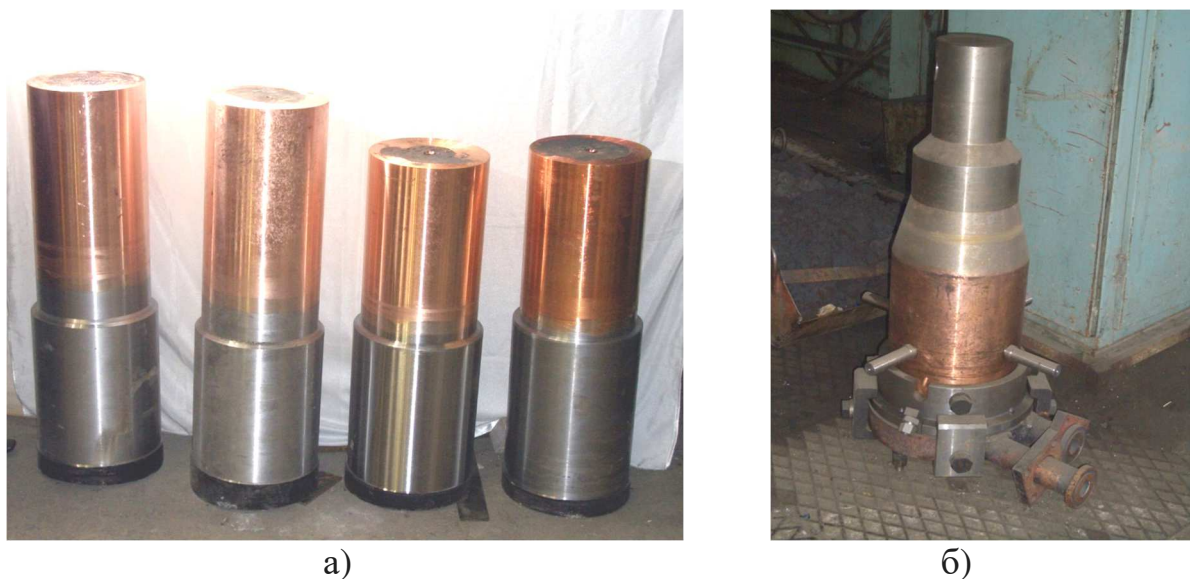


Рис.10. Сталемідні зливки ЕШП ДС (а), й подовий електрод 12 тонної ДППС (б)

Таблиця 2. Застосування подових електродів ДППС зі сталемідних зливок ЕШП ДС

Підприємство	Садка печі
ЗАТ «Елста», м. Дніпро	12 тонн
ЗАТ «Ферротрейдинг», м. Запоріжжя	2 печі по 12 тонн
ПМП «Панком», м. Одеса	3 тонни
ВАТ «Міттал Стіл», м. Кривий Ріг	0,5 тонн; 6 тонн
ВАТ «Дионіс», м. Запоріжжя	3 тонни

На основі отриманих результатів було сформульовано основні елементи технології ЕШП ДС для отримання сталемідних зливок діаметром до 700 мм, що потребує, наприклад, виготовлення подових електродів найбільшої в світі 420-тонної ДППС, яку побудовано до сьогодні. 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 зливок, дообладнана до можливості ведення переплаву за двоконтурною схемою живлення. Використання камери й захисної атмосфери для сталемідних зливок є необов'язковим з огляду на використання графітового захисного кільця в струмопідвідній секції кристалізатору.

В дисертаційній роботі було також проаналізовано можливості розповсюдження методу отримання сталемідних зливок по технології ЕШП ДС із заміною електродів й на інші біметалеві композиції, зокрема для виготовлення композитних роторів енергетичних турбін, що досліджувалось у рамках науково-дослідної роботи в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України «Розробка нового технологічного процесу одержання гетерогенних матеріалів на базі ЕШП для виробництва композитних роторів для енергетичних турбін нового



покоління». Зрозуміло, що складність отримання гетерогенного ротору для сучасних турбін значно вища за задачу, що вирішувалась в данній дисертаційній роботі. Але саме в експериментах зі сталемідним біметалом 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 за моделлю для сталемідної пари показують, що при виготовленні зливок діаметром 1000-1200 мм при заміні електродів, потрібна витримка щонайменше на протязі півгодини для вирівнювання профілю сталеві ванни перед початком переплаву електроду із Inconel. Окрім цього, потрібна й захисна атмосфера, але принципово може бути використано саме метод, що розроблено й випробувано для отримання сталемідних зливок з перерізом з'єднання різнорідних металів  $\varnothing$  350мм.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу, яка полягала в пошуку й обґрунтуванні методу надійного з'єднання сталі з міддю у біметалевих зливках порівняно великого діаметру для подальшого використання їх в якості заготовок для подових електродів дугових печей постійного струму, збільшення використання яких є магістральним напрямком розвитку сучасної електрометалургії.

За результатами досліджень були знайдені нові наукові рішення, отримані нові експериментальні данні, практичні результати і зроблені наступні висновки:

1. Аналіз сучасного стану розвитку чорної металургії, зокрема її електрометалургійної складової, показав тенденцію до зростання частки дугових печей постійного струму завдяки їх техніко-економічним перевагам над ДСП змінного струму. Водночас встановлено, що однією з головних перешкод широкому переходу від ДСП до ДППС є проблеми з подовим електродом – анодом. Наявність різноманітних конструкцій подових електродів й практичний досвід їх використання свідчать, що найефективнішими є подові електроди стержньового типу, в яких сталева частина надійно з'єднана з міддю. Однак, особливості взаємодії міді із залізом, що характеризуються малою розчинністю останнього в міді, й висока теплопровідність міді, обумовлюють складнощі зварювання цих металів, особливо в великих перерізах. Тому тема дисертації, що спрямована саме на дослідження можливостей нової електрошлакової технології – переплаву за двоконтурною схемою живлення зі зміною електродів – щодо з'єднання різнорідних металів, вивченню теплофізичної картини переплаву за допомогою моделювання й натурних експериментів, а також вивченню якості сталемідного з'єднання, є актуальною як для електрометалургії, так й зварювання різнорідних металів у великих перерізах.

2. Із застосуванням відомих моделей й досліджень виплавки зливок ЕШП зі змінним хімічним складом уздовж зливка, а також досвіду застосування двоконтурної схеми електрошлакового переплаву для управління формою рідкометалевої ванни й двофазною зоною при переплаві висунуто й обґрунтовано

робочу гіпотезу дисертації щодо доцільності вивчення можливості вирішення проблеми отримання якісних біметалевих сталемідних зливок методом ЕШП ДС.

3. Побудовано математичну модель розрахунку температурних полів в зливку ЕШП ДС при заміні сталевого електроду на мідний й, відповідно, при зміні їх теплофізичних параметрів. Для обраного розміру струмопідвідного кристалізатору  $\varnothing 350$  мм й обраних матеріалів вуглецева сталь типу СтЗсп й мідь марки М1 розраховали розподіл температурних полів при використанні флюсу АНФ-28 й флюсу АНФ-28М й бажану тривалість переривання процесу при переході від сталі до міді в 20-25 хвилин.

4. Розрахунками й експериментальними плавками ЕШП ДС визначено необхідність зміни витратних електродів різного хімічного складу в чотири основні стадії зі співвідношенням потужності на витратному електроді  $W_1$  до потужності на невитратному електроді–струмопідвідному кристалізаторі  $W_2$  на стадії плавлення сталевого електроду як  $W_1:W_2 = 70-75\%:30-25\%$ ; перед закінченням плавлення сталевого електроду, впродовж щонайменше 10 хвилин, це співвідношення має бути як  $W_1:W_2 = 30\%:70\%$ ; на другій й третій стадіях процесу при заміні сталевого електроду на мідний при співвідношенні  $W_1:W_2 = 0\%:100\%$ , має бути проведена витримка впродовж щонайменше 10 хвилин й можливе модифікування флюсу, й на четвертій стадії завершення плавлення може проводитись з тим же співвідношенням, що й на першій стадії.

5. Проведено плавки ЕШП ДС з використанням сталевих електродів діаметром 250 мм й мідних електродів діаметром 220 мм й отримано біметалеві прототипи діаметром 350 мм й довжиною 1300-1500 мм, які було використано для виготовлення експериментального подового електроду й подальшого дослідження властивостей перехідної зони сталь–мідь.

6. Випробувано механічні властивості сталемідної зони зливок в середині зливка, на половині радіусу й на поверхні. Практично їх рівень по перетину зливка однаковий і становить в середньому  $\sigma_{0,2} = 153$  МПа;  $\sigma_B = 387$  МПа;  $\delta_5 = 21\%$ ;  $\psi = 75\%$ . Типові випробування якості зварного з'єднання на холодний згин на  $45^\circ$  також засвідчили його придатність для використання при виготовленні подових електродів.

7. Дослідження мікроструктури підтвердили тотожність структури перехідної зони від сталі до міді на поверхні біметалевого зливка, на половині радіусу й на вісі зливка з найдовшою протяжністю перехідної зони. Мікротвердість при переході від сталі до міді складає HV10 – 2260 МПа зі сторони сталі й HV10 – 2230 МПа зі сторони міді.

8. Проведено вимірювання питомого електричного опору перехідної сталемідної зони при кімнатній та робочій температурі ( $500^\circ\text{C}$ ), що показали монотонний характер зміни величини питомого електроопору від  $1,86 \times 10^{-7}$  –  $6,02 \times 10^{-8}$  Ом·м для кімнатної температури, та  $2,8 \times 10^{-6}$  –  $2 \times 10^{-7}$  Ом·м для робочих температур, а при переході від сталеві частини до мідної також плавно змінюється від  $9,9 \times 10^{-8}$  Ом·м для сталі, й до  $1,72 \times 10^{-8}$  Ом·м для міді.

9. Обґрунтовано доцільність й можливість модифікування флюсу АНФ-28 до АНФ-28М за рахунок додавання 3-4 кг MgO під час зміни сталевого електроду на

мідний й 10-ти хвилинної витримки при цьому. Експериментально перевірено, що додавання такої кількості флюсу не дає негативних ефектів на з'єднання сталі з міддю й водночас покращує якість поверхні мідної частини біметалевого зливку в порівнянні з такою, що дає флюс АНФ-28.

10. Виготовлену партію сталемідних зливків було використано для виробництва подових електродів промислових ДППС ємністю до 12 тонн на різних підприємствах України. Експлуатація подових електродів із сталемідних зливків ЕШП ДС показала вдвічі більше напрацювання в порівнянні з сталемідними подовими електродами тієї ж конструкції, але які отримано іншими методами.

11. Намічено перспективи розширення використання принципів отримання біметалевих зливків методом ЕШП ДС для інших, в т.ч. жароміцних композицій, як то високолегована сталь – нікелевий сплав.

### ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Медовар Л.Б., Троянський А.А., Саенко В.Я., Федоровський Б.Б., Цыкуленко А.К., Рябцев А.Д., Ус В.И., Журавель В.М., **Зайцев В.А.**, Петренко В.Л. О новом подходе к конструкции камерных печей ЭШП. Современная электрометаллургия. 2005. №2. С.15-17. / About new approach to designing of ESR chamber furnaces. Medovar L.B., Troyansky A.A., Saenko V.Ya., Fedorovsky B.B., Tsykulenko A.K., Riabtsev A.D., Us V.I., Zhuravel V.M., **Zaitsev V.A.**, Petrenko V.L. Problemy Spetsial'noj Electrometallugii. 2005. №2. p. 15–17 (SCOPUS).

2. Саенко В.Я., Медовар Л.Б., Федоровський Б.Б., Шевченко Н.Т., Ярош В.М., Жуков В.В., Журавель В.М., **Зайцев В.А.**, Козин Р.В., Ремізов А.Г. Особенности оценки качества биметаллических материалов. Современная электрометаллургия. 2006. №1. С.3-8.

3. В. М. Ярош, В. В. Жуков, Р. В. Козин, **В. А. Зайцев**, В. М. Журавель, А. Г. Ремізов, А. А. Полишко. Исследование качества биметаллической арматуры с коррозионностойким слоем из стали 316L. Київська конференція молодих вчених «Новітні матеріали та технології» - м. Київ, Інституті металофізики ім. Г.В.Курдюмова, 16-17 листопада 2006. С. 35.

4. Медовар Л.Б., Жуков В.В., Журавель В.М., Козин Р.В., **Зайцев В.А.**, Ярош В.М., Полишко А.А. О некоторых направлениях исследований в области ЭШП. Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра. До 30-річчя кафедри ФХОТМ «НТУУ «КПІ»», збірник праць співробітників і випускників кафедри ФХОТМ. м.Київ «Політехніка». 2007. С. 123-130.

5. Полішко Г.О., Ремізов О.Г., Жуков В.В., **Зайцев В.А.**, Журавель В.М., Козин Р.В., Ярош В.М. Оцінка можливості отримання круглих сталевих зливків вагою 60 т на базі 20-тонної печі ЕШП. Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра. До 30-річчя кафедри ФХОТМ «НТУУ «КПІ»», збірник праць співробітників і випускників кафедри ФХОТМ. Київ «Політехніка». 2007. С. 17 - 25.

6. В.А. Рябинин, Ю.С. Гришко, **Зайцев В.А.**, Журавель В.М., Ярош В.М. Утилизация медьсодержащих шлаков медеплавильного производства на основе ЭШП. Матеріали V Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та спеціалістів „Зварювання та суміжні технології”.– Київ. 2009. С. 63.

7. **В. А. Зайцев**, Л. Б. Медовар. Подовые электроды дуговых печей постоянного тока. Современная электрометаллургия. 2009. № 2. с. 3-8.

8. В.А. Рябинин, Ю.С. Гришко, В.Я. Саенко, **В.А. Зайцев**, В.М. Журавель, В.М. Ярош. Извлечение меди из шлаков медеплавильного производства при использовании процессов ДШП и ЭШП. Современная электрометаллургия. 2009. №2. С.9-12.

9. Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, В. А. Рябинин, Ю. С. Гришко, **В.А. Зайцев**, В.М. Журавель, В. М. Ярош, М.Т. Шевченко. Переробка мідновмісних шлаків на основі електрошлакового та дугошлакового переплаву. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова — Миколаїв: НУК, 2010. 138 с.

10. Л.Б. Медовар, В. Я. Саенко, В. М. Ярош, В.М. Журавель, **В.А. Зайцев**, Ю. С. Гришко, А. А. Улещенко, А. О. Свистунов, В. А. Юценко, Е. Н. Гладкий. О моделировании новых электрошлаковых технологий. V международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (пос. Кацивели, Автономная Республика Крым, Украина, 25-28 мая 2010р.). С.48-49.

11. **В. А. Зайцев**, Л. Б. Медовар, П. И. Тищенко, Б. Б. Федоровский, В. М. Журавель. Применение ЭШП по двухконтурной схеме для получения сталемедных заготовок анодов дуговых печей постоянного тока. Современная электрометаллургия. 2011. № 2, с. 3-7.

12. Б. Б. Федоровский, Л. Б. Медовар, А. П. Стовпченко, В. М. Журавель, В. Я. Саенко, **В. А. Зайцев**, В. Б. Смолярко, В. А. Лебедь. О новом способе ЭШП крупногабаритных полых слитков. Современная электрометаллургия. 2011. №3. С.3-6.

13. В.И. Махненко, Л.Б. Медовар, В.Я. Саенко, А.А. Полишко, Б.Б. Федоровский, С.Г. Григоренко, **В.А. Зайцев**. Моделирование процесса ЭШН ЖМ при изготовлении крупных полых слитков. Сборник тезисов докладов VI Международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (29 мая - 1 июня 2012г., пос. Кацивели, республика Крым, Украина). – С.70-73.

14. Пат. 94333 Україна, МПК<sup>51</sup> В22D 19/16, С22В 9/18, В23К 25/00, С23С 6/00. Спосіб виготовлення великотоннажного металевого злитка. Л.Б. Медовар, Г.П. Стовпченко, В.Я. Саенко, Б.Б.Федоровський, Г.О. Полішко, В.М. Журавель, **В.А. Зайцев**. – №а200913931; заявл. 30.12.2009, опубл. 26.04.2011, бюл. №8.

15. Патент № 99329 Україна, МПК<sup>51</sup> С22В 9/18, В22D 7/04, В22D 23/00. Спосіб отримання порожнистих злитків електрошлаковим переплавом та пристрій для його здійснення. Б.Б. Федоровский, Л.Б. Медовар, В.Я. Саенко, Г.П. Стовпченко, В.Л. Петренко, В.М. Журавель, **В.А. Зайцев**. – №а201010232; заявл. 19.08.2010, опубл. 10.08.2012, бюл. №15.

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

17. Пат. 80780 Україна, МПК<sup>51</sup> H05B 7/00 F27B 3/00. Подовий модульний електрод сталеплавильної печі постійного струму. Медовар Л. Б., Саєнко В. Я., Федоровський Б. Б., **Зайцев В. А.**, Ярош В. М., Полішко Г. О., Лебідь В. А., Коломієць Д. В., Рябінін В. А. - №u201214728; заявл. 21.12.2012, опубл. 10.06.2013, бюл. №11.

18. **Зайцев В. А.**, Полишко А. А., Романко Л. А. Исследование удельного электрического сопротивления сталемедной зоны биметаллического электрошлакового слитка-заготовки анода ДСП постоянного тока. Современная электрометаллургия. 2014. №3. С.16-20.

19. **Volodymyr Zaitsev**, Lev Medovar, Ganna Stovpchenko, Ganna Polishko, Yevhenii Volchenkov. Reliable steel-copper anodes for Direct Current Electric Arc Furnaces manufactured by Electro-Slag Remelting under Two Circuits Diagram. Proc. of the Medovar Memorial Symposium Proceedings, 7-10 June 2016, Kyiv, Ukraine. 2016. С. 211-215.

20. Ye. A. Volchenkov, V. L. Petrenko, **V.A. Zaitsev**, Ya. V. Gusev, E.A. Pedchenko. Control over the form of liquid metal bath at ESR consumable electrodes of variable section. Abstracts of 9<sup>th</sup> International Conference of Young Scientists on Welding and Related Technologies (WRTYS-2017), 23-26.05.2017, Kyiv (Ukraine). С. 338.

21. Л.Б. Медовар, А.В. Сибирь, А.П. Стовпченко, Е.А. Педченко, **В.А. Зайцев**. О применении ЭСП для рециклинга отработанных прокатных валков и роликов МНЛЗ. Металургійна та гірничорудна промисловість. 2020. № 4. С. 40-51.

## АНОТАЦІЯ

**Зайцев В.А. Електрошлакова технологія отримання біметалевих сталемідних зливок для подових електродів дугових сталеплавильних печей.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів» – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, спеціалізована вчена рада Д 26.182.02, м. Київ, 2021.

Дисертація присвячена дослідженню можливостей електрошлакового переплаву за двоконтурною схемою (ЕШП ДС) для отримання з'єднання різнорідних металів з метою виготовлення сталемідних зливок для виробництва подових електродів – анодів дугових печей постійного струму (ДППС). Містить детальний аналіз проблеми виготовлення сталемідних подових електродів стержньового типу й можливості електрошлакових технологій в забезпеченні якісного біметалевого з'єднання. Запропоновано пілотне обладнання на основі печі ЕШП зі зміною електродів й двома ланцюгами незалежного електричного живлення витратного електроду й невитратного електроду – струмопідвідного кристалізатора. Побудовано математичну модель ЕШП ДС сталевих й мідних електродів й розраховано цільові технологічні параметри: електрична потужність, швидкість переплаву й часові межі стадій отримання біметалевого зливку сталь–мідь. Проведено експериментальні плавки й отримано сталемідні зливки діаметром 350 мм з контрольованою перехідною зоною від сталі до міді. Досліджено структуру й службові

характеристики перехідної зони сталь-мідь, включно з питомим електричним опором в діапазоні температур до робочої температури подового електроду 500°C.

В результаті визначення особливостей процесу формування сталемідних зливків електрошлаковим переплавом по двоконтурній схемі з заміною електродів в процесі переплаву розроблено технологічні рекомендації до реалізації процесу.

Виготовлено партію подових електродів із сталемідних зливків ЕШП ДС для ДППС ємністю до 12 тонн, які випробувано в промислових умовах. Працездатність подових електродів вдвічі вища за працездатність подових електродів з інших сталемідних заготівок.

**Ключові слова:** електрошлаковий переплав по двоконтурній схемі (ЕШП ДС), подовий електрод – анод, електродугова піч постійного струму, питомий електричний опір

### ABSTRACT

**Zaitsev V.A. Electroslag technology of bimetallic steel-copper ingots for bottom electrodes of an electric arc furnace. - On the rights of the manuscript.**

The dissertation on a scientific degree of the candidate of technical sciences on a speciality 05.16.02 "Metallurgy of ferrous and nonferrous metals and special alloys". - E.O. Paton Electric Welding Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Specialized Academic Council D 26.182.02, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to researching the possibilities of electroslag remelting according to the double - circuit diagram (ESR TC) to obtain the connection of dissimilar metals for the production of steel-copper billets of bottom electrodes - anodes of arc steel furnaces (DC EAF). It contains a detailed analysis of manufacturing steel-copper anodes of the rod type and the possibility of electroslag technologies in providing a high-quality bimetallic connection. The pilot equipment based on the ESR furnace with a change of electrodes and two circuits of independent high current loops of the consumable electrode and the non-consumable electrode – the current-supplying mould is offered. The mathematical model of ESR TC of steel and copper electrodes is proposed, and target technological parameters (electric power, remelting speed and time limits of stages of receiving bimetallic steel-copper ingot) were found. Experimental heats were made, and the structure and service characteristics of the transition zone between steel and copper, including electrical resistance in the temperature range up to the operating temperature of 500°C, have been studied.

As a result of determining the features of steel-copper ingots forming by electroslag remelting according to the two-circuit scheme with the change of electrodes while remelting process and technological recommendations for their implementation are outlined.

A pilot set of anodes made from ESR TC steel-copper ingots for DC EAF with a capacity of up to 12 tons was tested in industrial conditions. The efficiency of anodes is twice higher than the efficiency of anodes from other steel-copper blanks.

**Key-words:** electroslag remelting by two circuits (ESR TC), bottom electrode – anode, DC EAF, specific electrical resistivity.

Підписано до друку 05.04.2021 р. Формат 60x80/16. Пап офс. №1 Офс. друк.  
Ум. друк. арк. 0,8. Ум. фарбо-відб. 0,9. Тираж 120 прим. Зам. № 390  
ПОД ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 03680, Київ 150, МПС, вул. Антоновича, 69