УДК 669.117.56 DOI: https://doi.org/10.37434/sem2023.03.02

ОТРИМАННЯ СТАЛЕМІДНОГО ПОДОВОГО ЕЛЕКТРОДА ДЛЯ ДУГОВИХ ПЕЧЕЙ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Ф.К. Біктагіров, В.О. Шаповалов, О.В. Гнатушенко, А.П. Ігнатов, В.В. Барабаш, Т.І. Грищенко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: biktagirov@paton.kiev.ua

Розроблено технологію електрошлакового наплавлення міді на сталь для виробів з великими перерізом і товщиною міді. Наплавлення здійснюється з попереднім електрошлаковим підігрівом поверхні сталевої заготовки до температури вище за температуру плавлення міді, але нижче, ніж температура плавлення сталі. Потім формується сталемідний перехідний шар шляхом подачі в шлакову ванну міді у рідкому вигляді або у вигляді твердої дискретної присадки. Після цього наплавляється шар міді необхідної товщини. Для кожної стадії наплавлення розроблено шлаки з різною температурою плавлення. Показано, що при електрошлаковому наплавленні забезпечується міцне з'єднання з мінімальним проникненням заліза в мідь. Виготовлено біметалічні сталемідні заготовки подових електродів стрижневого типу для 12-тонної ДСП постійного струму з мідною частиною діаметром 320 мм та висотою 450 мм. Бібліогр. 9, рис. 7.

Ключові слова: біметал, сталь–мідь, електрошлакова наплавка, перехідний шар, якість, подовий електрод

Вступ. У дугових печах постійного струму як донний струмопідвід використовуються електроди різної конструкції [1]. Широкого застосування набули подові електроди у вигляді біметалевого сталемідного стрижня, який встановлюється у футерованому днищі печі таким чином, що сталева його частина контактує з рідким металом, а мідна частина є охолоджуваним елементом (рис. 1). Працездатність такого електрода значною мірою залежить від якості з'єднання міді зі сталлю. Чим менший електричний і тепловий опір як перехідної зони, так і подового електрода в цілому, тим менші витрати джоулевого тепла на його нагрівання і менша глибина проплавлення сталевої частини. Останнє важливо з точки зору руйнування футерування печі, яке посилюється під час контакту з рідким металом.

Відомі кілька технологій одержання подібного сталемідного подового електрода стрижневого типу. Це з'єднання сталевої і мідної заготовок способом алюмотермічного зварювання (Компанія «Danieli», Італія) [1, 2], послідовного електрошлакового переплаву у струмопідвідному кристалізаторі сталевого та мідного витратних електродів (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України) [3, 4], електрошлакового наплавлення міді на сталеву заготовку в теплоізольованому графітовому тиглі з використанням невитратного графітового електрода (Фірма «РОУД», Україна) [5, 6].

Отримання якісного з'єднання сталь–мідь ускладнюється суттєвою відмінністю фізичних і хімічних властивостей цих металів, у тому числі температури плавлення та густини. А з основних вимог є обмеження зони проникнення заліза в мідь через різке зниження електро- і теплопровідності цієї ділянки. Крім того, є небезпека утворення перитектичних сполучень заліза з міддю, які призводять до зниження механічних властивостей металу в місцях їхнього розташування.

При алюмотермічному зварюванні, особливо великих перерізів, складно забезпечувати рівномірне проплавлення сталі та міді з отриманням за всією площею дотику вузької перехідної зони.

При почерговому електрошлаковому переплаві сталевої та мідної заготовок передбачається наявність у кристалізаторі до початку плавки міді рідкої металевої (сталевої) ванни. Краплі міді при потраплянні в неї спускатимуться на дно ванни. Рідке залізо перемішуватиметься і взаємодіятиме з рідкою міддю і, маючи меншу густину, спливатиме, поступово розчиняючись вже у мідній ванні. Тому перехідна зона й область міді, що до неї прилягає, збагачуватиметься залізом.

Технологія фірми «РОУД» базується на виконаних в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ дослідженнях і розробках з електрошлакового наплавлення міді на сталь, у тому числі з нижнім розташуванням сталевої поверхні, що наплавляється [7, 8]. У цих роботах показано, що для отримання мінімального за товщиною перехідного шару, надійного та міцного з'єднання сталі з міддю наплавлення треба починати після нагрівання поверхневого шару сталевої заготовки до 1100…1300 °С. Тобто, наплавлення міді здійснюється на тверду сталеву підкладку. У цьому випадку забезпечується мінімальний за товщиною перехідний шар з незнач-

Ф.К. Біктагіров — https://orcid.org/0000-0001-7843-4261, В.О. Шаповалов — https://orcid.org/0000-0003-1339-3088, О.В. Гнатушенко — https://orcid.org/0000-0002-0328-0875, А.П. Ігнатов — https://orcid.org/0000-0001-8138-3565, В.В. Барабаш — https://orcid.org/0000-0001-8138-3565, Т.І. Грищенко — https://orcid.org/0000-0001-7840-9832

© Ф.К. Біктагіров, В.О. Шаповалов, О.В. Гнатушенко, А.П. Ігнатов, В.В. Барабаш, Т.І. Грищенко, 2023

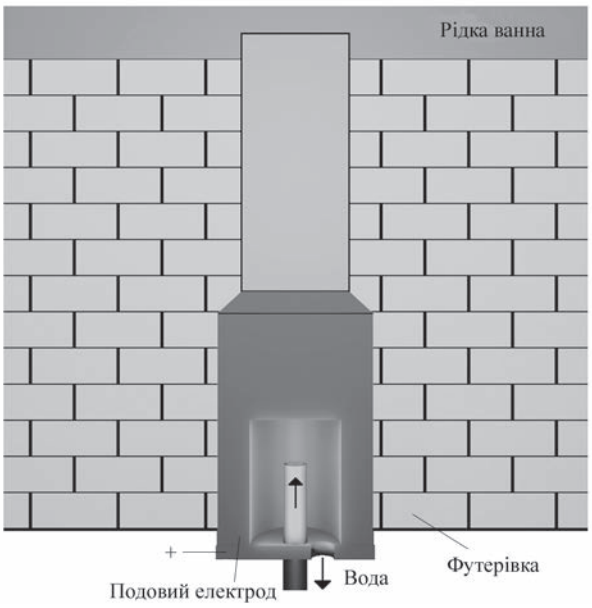

Рис. 1. Розташування подового електрода стрижневого типу в ДСП

ним, за рахунок дифузійних процесів, проникненням заліза в мідь.

Методика досліджень, обладнання і результати. Технологія наплавлення міді на сталь багато в чому індивідуальна для конкретного виробу. Для виготовлення й постачання на одне з промислових підприємств України подових електродів стрижневого типу з мідною частиною діаметром 320 мм та масою близько 350 кг були проведені дослідження та експерименти з отриманням біметалічного сталемідного з'єднання великого перерізу способом електрошлакового наплавлення з використанням обладнання та оснащення, показаного на рис. 2. Така технологічна схема наплавлення близька до тієї, що описана в патенті на винахід щодо отримання сталемідного з'єднання [9].

Процес отримання заготовки подового електрода в такий спосіб можна умовно розділити на три основні етапи. Перший — це нагрівання поверхні, що наплавляється, другий — отримання біметалічного з'єднання сталь–мідь і третій — отримання масивного мідного тіла заготовки.

Спочатку при діаметрі мідної частини 200 мм відпрацьовувалася технологія отримання перехідного шару за допомогою електрошлакового нагрівання сталевої заготовки з подальшою подачею до плавильного простору дискретної мідної присадки або рідкої міді. Якщо використовується тверда мідь, то, потрапляючи в шлакову ванну, вона плавиться і вже у рідкому вигляді покриває поверхню сталевої заготовки, утворюючи наплавний шар. Було визначено, що за порівняно низької температури підігріву підкладки на межі сталь–мідь може утворитися шлаковий прошарок, а за високої — розплавлення сталі та її спливання вже у твердому вигляді у рідкій міді, як це показано на рис. 3.

Утворення шлакового шару між сталлю і міддю неприпустимо, тому температура плавлення шлаку, що використовується, має бути нижче, ніж температура плавлення міді та температура підігріву підкладки. З цією метою після розігрівання сталі до шлаку системи CaF_2–CaO–Al_2O_3, що використовується на першому етапі, вводили кріоліт і буру в кількостях, що забезпечують зниження його температури плавлення до 1000 °С. Що стосується перегріву поверхні сталевої заготовки, то внаслідок нерівномірності температури за її перерізом (дещо вищу температуру має зона під електро-

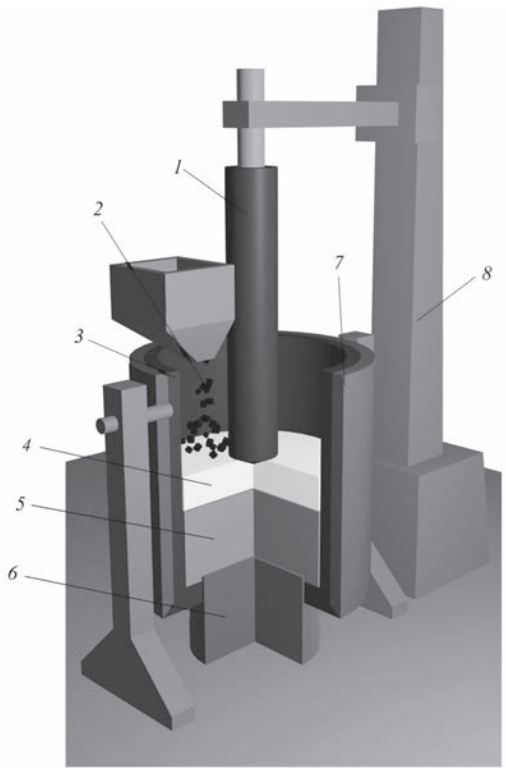

Рис. 2. Схема електрошлакового наплавлення міді на сталь: *1* — графітовий електрод; *2* — мідна присадка; *3* — графітовий тигель; *4* — шлакова ванна; *5* — металева ванна; *6* — сталева заготовка; *7* — теплоізоляція; *8* — колонна

Рис. 3. Зовнішній вигляд сталемідного з'єднання при надмірному оплавленні сталевої частини

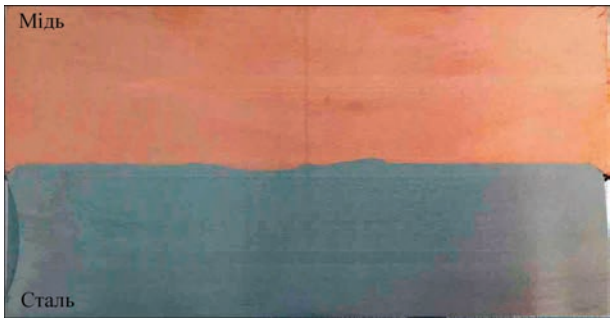

Рис. 4. Зовнішній вигляд сталемідного з'єднання діаметром 320 мм, отриманого електрошлаковим наплавленням міді на сталь

дом), можливе незначне оплавлення її центральної зони. Важливо в такому випадку виключити глибоке проникнення заліза в мідь. Для цього після подачі перших порцій міді і утворення мідного прошарку здійснювали заморожування ванни та фіксацію заліза в цьому тонкому шарі завдяки зниженню потужності електрошлакового процесу та інших заходів, що дають змогу зменшити перегрів міді. Внаслідок цього надалі залізо може проникати у мідь лише за допомогою дифузії.

Завданням третього етапу технології була електрошлакова плавка міді з формуванням якісної мідної частини заготовки подового електрода без дефектів внутрішньої і зовнішньої будови. Мета досягалася за рахунок коригування складу шлаку та підвищення потужності, що підводиться до шлакової ванни.

Результати, отримані під час попередніх досліджень, були застосовані для виготовлення макета подового електрода. Однак збільшення перерізу мідної частини в 2,5 рази з діаметра 200 до 320 мм викликало необхідність коригування технології. Експериментально шляхом наплавлення на сталь шару міді товщиною від 50 до 70 мм і подальшого вивчення біметалічного з'єднання були визначені оптимальні параметри процесу, що забезпечують високу якість перехідної зони. У цьому разі, як показано на рис. 4, сплавлення відбувається за всією площею дотику металів практично без розплавлення сталі. Тільки в центральній осьовій зоні є невеликі ділянки, де відбувається незначне оплавлення поверхні сталевої заготовки. Проте навіть у цих місцях вже на відстані 5…10 мм від умовної границі поділу металів вміст заліза становить менше ніж 0,05 % із подальшим зниженням на відстані 30…40 мм практично до рівня, регламентованого для міді марки М1.

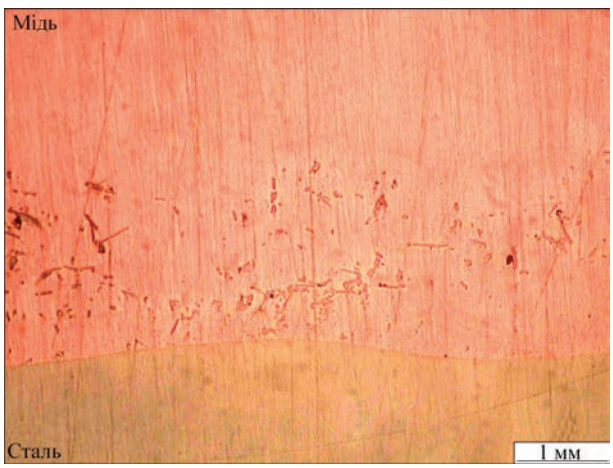

Рис. 5. Вигляд центральної осьової зони заготовки, отриманої електрошлаковим наплавленням міді на сталь

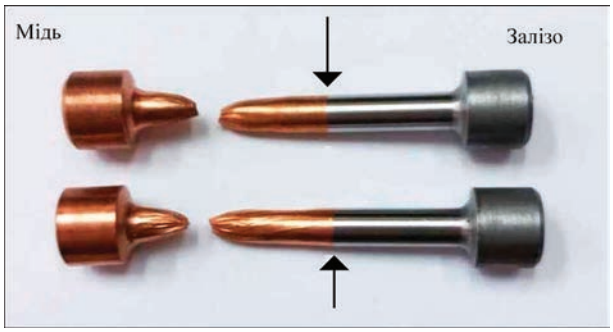

Рис. 6. Вигляд зразків біметалічної сполуки сталь–мідь після випробування на розрив

З наведеного на рис. 5 збільшеного зображення ділянки сталемідної заготовки видно, що невелика кількість сталі, що розплавилася, спливає в рідкій мідній ванні, але внаслідок її заморожування, про що говорилося вище, далеко не проникає.

Розроблена технологія наплавлення міді на сталь забезпечує надійне та міцне з'єднання цих металів. Про це свідчать результати механічних випробувань зразків, вирізаних із зони переходу сталь–мідь. Розрив відбувається у мідній частині (рис. 6).

Після відпрацювання процесу електрошлакового наплавлення на макетах подового електро-

Рис. 7. Чорнова (*а*) і чистова (*б*) заготовки подового електрода стрижневого типу

да отримані заготовки для виготовлення подових електродів. Вигляд заготовки подового електрода після проведення процесу наплавлення і механічного оброблення наведено на рис. 7.

Із виплавлених заготовок були виготовлені подові електроди і передані до металургійного підприємства. Зараз вони успішно експлуатуються при виплавлені сталі на печі ДСП-12 постійного струму. Нагляд і збір даних щодо експлуатації електродів у подальшому сприятиме поліпшенню технології наплавлення міді на сталь.

Висновки

1. Розроблено технологію електрошлакового наплавлення міді на сталь для виробів великого перерізу.

2. Показано, що під час електрошлакового наплавлення міді на сталь досягається якісне сплавлення металів при невеликій протяжності перехідної зони.

3. Виготовлено заготовки подового електрода стрижневого типу з діаметром мідної частини 320 мм для сталевої дугової печі постійного струму ДСП-12.

Список літератури

1. Лопухов Г.А. (2004) Подовый электрод дуговой сталеплавильной печи постоянного тока конструкции фирмы «Danieli». *Электрометаллургия*, **6**, 48–51.
2. Gensini G., Pavlicevic M. (1994) *Cooled bottom electrode for direct current electric furnace*. Danieli & Co Off. Mec. Spa (Italy). Priority data 05.11.1994. Patent US 5651024. H05B 7/06. www.espacenet.com
3. Зайцев В.А., Медовар Л.Б., Тищенко П.И. и др. (2011) Применение ЭШП по двухконтурной схеме для получения сталемедных заготовок анодов дуговых печей постоянного тока. *Современная электрометаллургия*, **2**, 3–7.
4. Зайцев В.А., Медовар Л.Б. (2009) Подовые электроды дуговых печей постоянного тока. *Современная электрометаллургия*, **2**, 3–8.
5. Тищенко П.И., Тимошенко С.Н., Онищенко С.П. (2012) *Подовые электроды ДСППТ*. Обзор основных технических решений. http://uas.su/articles/steelmaking/2012/00001.php
6. Тищенко П.И., Тищенко А.П., Тимошенко С.Н., Фридман М.А. (2012) Подовый электрод дуговой печи постоянного тока. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, **7**, 282–284.
7. Лычко И.И. (1969) *Электрошлаковая наплавка меди и ее сплавов на сталь*. Киев, УкрНИИНТИ.
8. Лычко И.И. (1978) *Электрошлаковая наплавка меди и ее сплавов на сталь в нижнем положении*. Сб. «Сварка и наплавка тяжелых цветных металлов». Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, сс. 40–42.
9. Пасічник С.Ю., Пасічник А.Ю., Корицький Г.Г. (2014) *Спосіб електрошлакового наплавлення міді і її сплавів на сталь*. Україна, Пат. 104262.

References

1. Lopukhov, G.A. (2004) Hearth electrode of DC arc steel furnace of Danieli Company design. *Elektrometallurgiya,* **6**, 48–51 [in Russian].
2. Gensini, G., Pavlicevic, M. (1994) *Cooled bottom electrode for direct current electric furnace*. Danieli & Co Off. Mec. Spa (Italy). Priority data 05.11.1994. Patent US 5651024. H05B 7/06. www.espacenet.com
3. Zaitsev, V.A., Medovar, L.B., Tishchenko, P.I. et al. (2011) Using two-circuit electroslag remelting for producing steel-copper blanks for anodes of DC arc furnaces. *Advances in Electrometallurgy,* **2**, 63–68.
4. Zaitsev, V.A., Medovar, L.B. (2009) Hearth electrode of DC arc furnaces. *Sovrem. Elektrometallurgiya,* **2**, 3–8.
5. Tishchenko, P.I., Timoshenko, S.N., Onishchenko, S.P. (2012) Hearth electrodes DSPPT. Review of main technical solutions [in Russian] http://uas.su/articles/steelmaking/2012/00001.php
6. Tishchenko, P.I., Tishchenko, A.P., Timoshenko, S.N., Fridman, M.A. (2012) Hearth electrode of DC arc furnaces. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost,* **7**, 282–284 [in Russian].
7. Lychko, I.I. (1969) *Electroslag cladding of copper and its alloys on steel.* Kyiv, UkrNIINTI [in Russian].
8. Lychko, I.I. (1978) *Flat electroslag cladding of copper and its alloys on steel*. In: Welding and cladding of heavy nonferrous metals. Kyiv, PWI, 40–42 [in Russian].
9. Pasichnyk, S.Yu., Pasechnik, A.Yu., Korytskyi, G.G. (2014) *Method of electroslag cladding of copper and its alloys on steel. Pat. UA* 104262 [in Ukrainian].

PRODUCING STEEL-COPPER HEARTH-LEVEL ELECTRODE FOR DC ARC FURNACES

F.K. Biktagirov, V.O. Shapovalov, O.V. Hnatushenko, A.P. Ignatov, V.V. Barabash, T.I. Hrishchenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: biktagirov@paton.kiev.ua

Technology of electroslag surfacing of steel with copper for products of a large cross- section and copper thickness was developed. Surfacing is performed with electroslag preheating of the steel billet surface to a temperature higher than copper melting temperature, but lower than that of steel melting. Then the steel-copper transition layer is formed by feeding copper into the slag pool in the liquid state or in the form of solid discrete filler. This is followed by deposition of a copper layer of the required thickness. Slags with different melting temperature were developed for each surfacing stage. It is shown that electroslag surfacing ensures a strong bonding with minimal penetration of iron into copper. Bimetal steel-copper billets of rod-type hearth-level electrodes with the copper part of 320 mm diameter and 450 mm height were produced for 12 ton DC ASF. 9 Ref., 7 Fig.

Keywords: bimetal, steel-copper, electroslag surfacing, transition layer, quality, hearth-level electrode

Надійшла до редакції 10.08.2023