

## ЕЛЕКТРОШЛАКОВИЙ ПЕРЕПЛАВ ВИТРАТНИХ ЕЛЕКТРОДІВ ЗМІННОГО ПЕРЕРІЗУ

Л.Б. Медовар<sup>1</sup>, Є.О. Педченко<sup>1</sup>, А.В. Сибір<sup>2</sup>, В.Л. Петренко<sup>1</sup>, Д.В. Коломієць<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Національна металургійна академія України. 49600, м Дніпро, просп. Гагаріна, 4. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

Розглянуто практику використання електрошлакового перепау для переробки відпрацьованих роликів машин безперервного лиття заготовок. Показана доцільність перепау роликів без відрізання шийок й зварювання в суцільний витратний електрод. Запропоновано й досліджено на експериментальних плавках використання ЕШП за двоконтурною схемою для перепау роликів з шийками. В якості імітаторів електродів реальних роликів використано електроди змінного перерізу з діаметрами 150 мм, що імітують бочку ролика 110 та 80 мм, а також, відповідно, перехід від бочки до шийки і саму шийку реального ролика слябової машини безперервного лиття заготовок. При цьому коефіцієнт заповнення змінюється від 0,69 до 0,2. Проведено дві серії експериментальних плавки з метою отримання стабільної глибини двофазної зони при твердненні зливка. Виявлено, що збереження швидкості перепау й глибини двофазної зони досягається при співвідношенні електричної потужності, що підводиться до витратного електрода, до потужності, що підводиться до струмопідвідного кристалізатора як 2:1. Бібліогр. 8, рис. 3.

*Ключові слова:* електрошлаковий перепад; рециклінг; ролик; безперервна розливка; витратний електрод; двофазна зона; струмопідвідний кристалізатор

Електрошлаковий перепад сьогодні — це основний технологічний процес виробництва сталей і сплавів найвищої якості. Одним з ключових елементів технології ЕШП є застосування витратних електродів, що відповідають цілому ряду вимог до їх внутрішнього та зовнішнього стану, хімічного складу та геометрії. Багаторічна практика ЕШП показала, що дуже бажано застосування витратних електродів з високим коефіцієнтом заповнення на рівні 0,65...0,75. Коефіцієнт заповнення визначають, зазвичай, як відношення площі поперечного перерізу витратного електрода до площі поперечного перерізу зливка ЕШП. Іноді під коефіцієнтом заповнення розуміють відношення умовних діаметрів поперечних перерізів електрода і зливка, але в цьому випадку значення цього коефіцієнта мають бути більш високі, від 0,8 і вище. Застосування витратних електродів з високим коефіцієнтом заповнення дозволяє досягти не тільки раціональної конструкції печі і високої якості зливка ЕШП, але і забезпечує найкращі показники економічності по питомій витраті електроенергії. Однак у багатьох випадках застосування витратних електродів постійної геометрії і використання постійного коефіцієнта заповнення для виплавки одного зливка ЕШП ускладнено або економічно невигідно. Йдеться про перепад відпрацьованих деталей різних машин і механізмів з метою повернення у виробництво високолегованих сталей і сплавів з мінімальними втратами легуючих. У

зв'язку з цим вельми цікаво, що практично з самого початку промислового застосування ЕШП було використано для перепау відпрацьованих валків холодної прокатки заготовок для виготовлення нових валків, тобто для реалізації того, що сьогодні називають елементами циркулярної економіки. Економічно успішно десятиліттями існувала практика повернення валків холодної прокатки для утилізації їх шляхом ЕШП на НКМЗ (м. Краматорськ) і Електростальтяжмаш (м. Електросталь) та виробництва там же нових кованих валків холодної прокатки зі зливків ЕШП, що виплавляли з відпрацьованих валків. З часом ця практика припинилася, хоча в усьому світі відпрацьовані валки холодної прокатки для виробництва нових валків перепавають в якості витратних електродів ЕШП. Загальновідомо, що прокатний валок має змінний перетин і тому при його перепаві застосовують обрізку шийок валка і реалізують перепад фактично тільки бочок валків, зварених в єдиний електрод, або зі зміною електродів (бочок відпрацьованих валків) по ходу перепау.

В останні роки ЕШП стали широко застосовувати і для повернення в виробництво відпрацьованих роликів слябових машин безперервного лиття. При цьому реалізують той же підхід, що й при ЕШП прокатних валків, тобто обрізку шийок і складання бочок роликів в єдиний витратний електрод постійного діаметра [1, 2]. У статті розглянуті деякі особливості ЕШП відпрацьованих роликів

Л.Б. Медовар — <https://orcid.org/0000-0003-2077-5965>, Є.О. Педченко — <https://orcid.org/0000-0002-8824-4389>, А.В. Сибір — <https://orcid.org/0000-0002-9974-0636>, В.Л. Петренко — <https://orcid.org/0000-0003-2440-1901>, Д.В. Коломієць — <https://orcid.org/0000-0003-0057-447X>

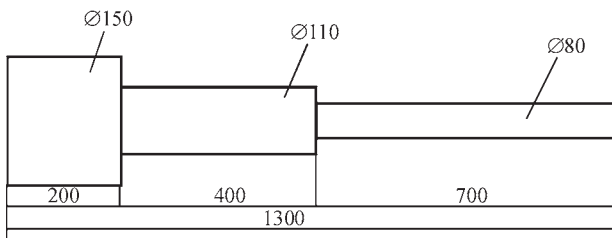


Рис. 1. Схема витратного імітатора електрода ролика слябової МБЛЗ

машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), які відомі з літературних джерел, та проаналізовано ефективність застосування ЕШП за двоконтурною схемою для їх переплаву без обрізки шийок.

**Стан проблеми та постановка задачі дослідження.** ЕШП для виготовлення роликів слябових МБЛЗ почали застосовувати приблизно 20 років тому. Сьогодні на Магнітогорському металургійному комбінаті (ММК, Росія) всі шість слябових МНЛЗ комбінату, що працюють в конвертерному і електросталеплавильному цехах, використовують тільки литі ролики власного виробництва з металу ЕШП [3]. У ряді публікацій і дисертацій по цій темі досить детально висвітлені основні стадії технології — від підготовки витратних електродів до власне ЕШП і виготовлення роликів [4–6].

ЕШП проводиться під шлаком АНФ-32 на звичайних печах ЕШП-1,25Л та ЕШП-2,5ВГ (без захисної камери і зміни електродів) в короткі кристалізатори із зустрічним рухом.

Застосування спеціально виготовлених литих або деформованих витратних електродів виявилось економічно недоцільним, що поступово призвело до повного переходу на переплав відпрацьованих роликів з відрізними шийками, зварених з окремих роликів.

Багаторічний досвід експлуатації показав, що застосування металу ЕШП в литому вигляді (без деформації) дозволило знизити поломки роликів вдвічі в порівнянні з традиційними кованими з тієї ж самої сталі 25Х1МФ і 25Х1М1Ф.

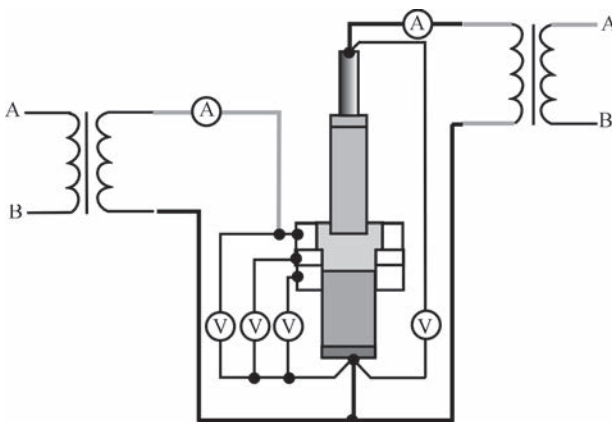


Рис. 2. Схема вимірювань електричних параметрів ЕШП ДС імітатора електрода

Оскільки переплав ведуть на печах, на яких неможливо змінювати електроди по ходу переплаву і які не мають захисної атмосфери, то існують проблеми з'єднання роликів в електрод, а також складності з забезпеченням стабільного хімічного складу через втрати кремнію та марганцю, а підвищений вміст водню вимагає проведення протифлокеної обробки. Ці недоліки можуть бути усунені при застосуванні сучасного обладнання ЕШП, тобто печей зі зміною електродів і захисною атмосферою, що дозволить поліпшити економічну ефективність рециклінгу роликів. Крім того, досвід застосування ЕШП за двоконтурною схемою (ЕШП ДС) показав стабільність профілю двофазної зони при переплаві електродів різного перетину, що дозволило поставити перед собою завдання переплаву роликів МБЛЗ без обрізки шийок.

**Експериментальна перевірка ЕШП ДС для переплаву електродів змінного перетину.** Для експериментальної перевірки провели переплав витратних електродів змінного перетину, що імітують профіль ролика слябової МБЛЗ. Схема таких імітаторів електродів представлена на рис. 1.

Розміри імітатора електрода були обрані з урахуванням наявного плавильного оснащення для реалізації ЕШП ДС — струмопідвідного кристалізатора з діаметром формуючої секції 180 мм. Вага кожної частини електрода була однаковою і становила 28 кг. Ролик, переплав якого моделювали, мав діаметри, мм: бочки — 350, перехідної зони від бочки до шийок — 255, шийок — 190.

Переплав такого ролика з урахуванням усадки і припусків на механічну обробку бажано проводити в кристалізаторі діаметром 420 мм. У цьому випадку коефіцієнт заповнення складе для зазначених вище секцій 0,69; 0,37 і 0,19 відповідно. Такі ж коефіцієнти заповнення забезпечує і імітатор електрода. Схема досліду ЕШП ДС представлена на рис. 2.

Роботи по ЕШП ДС, які передували цьому дослідженню, проводили на різних сталях і сплавах з використанням струмопідвідних кристалізаторів різних діаметрів. Однак всі вони були націлені на досягнення більш плоскої форми двофазної зони в порівнянні зі стандартним ЕШП і фактично проводились на знижених швидкостях переплаву в порівнянні зі стандартним ЕШП зливків того ж діаметру. Крім того, як і в наших попередніх експериментах по ЕШП ДС, так і в експериментах інших дослідників були використані електроди з коефіцієнтом заповнення не менше 0,4 [6–8].

Оскільки мета даної роботи в тому, щоб визначити можливість переплаву роликів МБЛЗ з шийками, а в перспективі і прокатних валків, досліджували можливість отримання якісного зливка ЕШП з щільною однаковою структурою. Відомо, що для

отримання такого зливка переплаву повинен вестися зі стабільною швидкістю наплавлення зливка і, відповідно, незмінною формою двофазної зони. Тому було вирішено спочатку експериментально оцінити можливість дотримання постійної швидкості наплавлення зливка ЕШП при зміні коефіцієнта заповнення від стандартної величини до вельми низької — від 0,69 до 0,2.

Моделювання ЕШП ДС для зазначених умов дозволило встановити розподіл електричної потужності, що підводиться до електрода та струмомопідвідного кристалізатора, та потужності для ЕШП ділянок електрода з різними діаметрами. Для першої серії дослідів запропоновано такі співвідношення, %: 100/0, 75/25 і 50/50 для ділянок з діаметрами 150, 110 та 80 мм відповідно.

Проведено кілька дослідів, які показали, що зберегти швидкість наплавлення зливка при переході на мінімальний коефіцієнт заповнення не вдається. Електрод необхідно плавити настільки швидко із такою величиною струму, що шлак починає кипіти і процес переплаву втрачає стабільність. В той же час, зниження потужності на електроді і збільшення її на кристалізаторі до величин приблизно 35/65 також позбавило змоги уникнути кипіння шлаку. Продуктивність переплаву коливалась в межах від 150 до 110 кг/год. Глибина двофазної зони фіксувалась додаванням сірчастого заліза. Ця глибина змінювалась пропорційно швидкості переплаву від приблизно 80 мм для електрода діаметром 150 до 50 і 30 мм для діаметрів електрода 110 та 80 мм відповідно.

Тому другу серію дослідів провели при меншій швидкості (120 кг/год), але зі зростаючою величиною загальної потужності, що підводиться до плавильної зони (електрода і кристалізатора), прагнучі зберегти постійну продуктивність переплаву і, відповідно, профіль двофазної зони. При цьому співвідношення потужності на електроді і кристалізаторі підтримували для тих же ділянок діаметром 150, 110 та 80 мм на рівні 2:1, але з послідовним збільшенням загальної потужності від 110 кВА для початкової ділянки електрода діаметром 150 мм до 150 кВА для діаметра електрода 110 мм і 220 кВА для найменшого діаметра 80 мм.

На рис. 3 наведено повздовжні темплети одного з дослідних зливків із зазначеним профілем двофазної зони, практично ідентичним для трьох зон зливка, отриманих з трьох ділянок електрода змінного діаметра, показаного на рис. 1. Верхній темплет відповідає діаметру електрода 80 мм, середній — 110, а нижній — 150 відповідно.

**Обговорення результатів.** Проведені експерименти підтвердили принципову можливість переплаву електродів змінного перерізу зі збереженням профілю двофазної зони. Виявлений ефект необхідності суттєвого збільшення електричної



Рис. 3. Профіль двофазної зони на різних ділянках зливка ЕШП діаметром 180 мм з електрода змінного діаметра

потужності, що підводиться до плавильної зони при переході до переплаву електрода з невеликим коефіцієнтом заповнення, вимагає більш докладного розгляду. Справа в тому, що при переході на переплаву реальних роликів і/або валків слід ставити завдання не тільки отримання однакової якості структури зливка ЕШП при перепаві їх шийок і бочки, а й економічних показників. Розглянемо результати експериментів під цим кутом. Виявилось, що для збереження профілю двофазної зони експериментального зливка ЕШП за рахунок підтримки постійної швидкості наплавлення зливка необхідно було зменшити стандартну швидкість переплаву (притаманну стандартному ЕШП зливка такого ж діаметра) практично на 30 % при зниженні витрати електроенергії також приблизно на третину. Однак, в той же час, для підтримки швидкості наплавлення зливка необхідно вести переплаву збільшуючи витрату електроенергії практично вдвічі. В реальних умовах переплаву роликів попередні оцінки показують, що зниження продуктивності переплаву компенсується зниженням витрат електроенергії за рахунок ведення процесу на меншій швидкості. Збільшення ж потужності, що підводиться на ділянках переплаву шийок, матиме незначний ефект в зв'язку з їх невеликою масою в порівнянні з масою бочки реального ролика або валка. У разі ролика слябової МБЛЗ, переплаву якого моделювали, маса бочки ролика становить приблизно 1500 кг проти 160 кг маси його шийок. Таким чином, вважаємо, що застосування ЕШП ДС дозволить ефективно реалізувати переплаву відпрацьованих роликів і прокатних валків без обрізки шийок.

**Висновки**

1. Розглянуто особливості застосування ЕШП для переробки відпрацьованих роликів слябових МБЛЗ і показано доцільність відмови від обрізки шийок роликів і їх зварювання в суцільний витратний електрод.

2. Проведено експериментальні плавки за двоконтурною схемою ЕШП–ЕШП ДС електродів зі змінним поперечним перерізом, що імітують переплав реального ролика МБЛЗ з шийками з коефіцієнтом заповнення від 0,69 до 0,2.

3. При електрошлаковому переплаві імітаторів електродів роликів МБЛЗ показано можливість збереження постійної швидкості наплавлення зливка, що підтверджує доцільність промислового застосування ЕШП ДС для переплаву роликів МБЛЗ без обрізки їх шийок.

**Список літератури**

1. Самойлович Ю.А., Тимашпольский В.И., Горяинов В.А., Кабишов С.Н. (2008) Повышение долговечности опорных роликов МНЛЗ. *Литье и металлургия*, 45(1), 49–55.
2. Вдовин К.Н., Бердников А.С., Подосян А.А. (2010) Разработка технологии получения заготовок для производства роликов МНЛЗ методом ЭШП. *Теория и технология металлургического производства*, 2, 68–73.
3. Цеху ремонта металлургического оборудования № 3 ООО «Механоремонтный комплекс» — 30 лет (ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»). [bizon.ru/news/view/news\\_id/376228](http://bizon.ru/news/view/news_id/376228)
4. Хребто В.Е. (2002) *Методологические основы реконструкции МНЛЗ в соответствии с современными требованиями технологии и надежности*: дис. ... канд. тех. наук, Магнитогорск, 114.
5. Юсин А.Н. (2004) *Разработка рациональных режимов электрошлакового переплава роликов и стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок*: дис. ... канд. тех. наук, Магнитогорск, 162.
6. Бердников А.С. (2013) *Ресурсосберегающие технологии изготовления слитков для роликов МНЛЗ на основе элект...*

*трошлакового переплава*: дис. ... канд. тех. наук, Магнитогорск, 143.

7. Medovar L., Fedorovsky B., Petrenko V. (2005) ESR with two power sources and process control. *International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting, Santa-Fe, New Mexico, USA, Sept. 11–14, 2005*, pp. 131–135.
8. Yanwu Dong, Zhouhua Jiang, Haibo Cao et al. (2016) Study of single-power, two-circuit ESR process with current-carrying mold. Development of the Technique and its Physical Simulation. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 47b, 3575–3581. DOI:10.1007/s11663-016-0813-8

**References**

1. Samojlovich, Yu.A., Timashpolskij, V.I., Goryainov, V.A., Kabishov, S.N. (2008) Increase of service life of BCCM bearing rollers. *Litio i Metallurgiya*, 45(1), 49–55 [in Russian].
2. Vdovin, K.N., Berdnikov, A.S., Podosyan, A.A. (2010) Development of technology for producing BCCM rollers by ESR method. *Teoriya i Tekhnologiya Metallurgicheskogo Proizvodstva*, 2, 68–73 [in Russian].
3. 30 years of metallurgical equipment repair shop No. 3, LLC Mechanical-repair Complex (PJSC Magnitogorsk Metallurgical Plant) [in Russian]. [bizon.ru/news/view/news\\_id/376228](http://bizon.ru/news/view/news_id/376228)
4. Khrebto, V.E. (2002) *Procedural bases of BCCM reconstruction in accordance to modern requirements of technology and reliability*: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree, Magnitogorsk, 114 [in Russian].
5. Yusin, A.N. (2004) *Development of rational modes of electroslag remelting of rollers and mold walls of billet continuous casting machines*: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree, Magnitogorsk, 162 [in Russian].
6. Berdnikov, A.S. (2013) *Resource-saving technologies for producing of BCCM roller ingots based on electroslag remelting*: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree, Magnitogorsk, 143 [in Russian].
7. Medovar, L. et. al. (2005) ESR with two power sources and process control. In: *Proc. of Int. Symposium on Liquid Metal Processing and Casting (Santa-Fe, New Mexico, USA, Sept. 11–14, 2005)*, 131–135.
8. Yanwu, Dong, Zhouhua, Jiang, Haibo, Cao et al. (2016) Study of single-power, two-circuit ESR process with current-carrying mold, development of the technique and its physical simulation. *Metallurg. and Mater. Transact. B*, 47b, 3575–3581. DOI:10.1007/s11663-016-0813-8

**ELECTROSLAG REMELTING OF CONSUMABLE ELECTRODES OF VARIABLE SECTION**

L.B. Medovar<sup>1</sup>, Y.O. Pedchenko<sup>1</sup>, A.V. Sybir<sup>2</sup>, V.L. Petrenko<sup>1</sup>, D.V. Kolomiets<sup>1</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

<sup>2</sup>National Metallurgical Academy of Ukraine. 4 Gagarin Ave., 49600, Dnipro, Ukraine. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

The practice of using electroslag remelting for recycling worn rollers of slab type continuous casters is considered. The expediency of remelting the rollers without cutting off necks and welding them into a solid consumable electrode is shown. The use of ESR with a two circuit scheme for remelting rollers with necks is proposed and investigated on experimental melts. Electrodes of a variable section of 150 mm diameter were used as electrodes-simulators of real rollers, which simulated the 110 mm and 80 mm barrel of a roller, as well as the transition from the barrel to the neck and the neck proper of a real roller of slab caster, respectively. The filling factor varied from 0.69 to 0.2. Two series of experimental melts were performed in order to obtain a stable depth of the two-phase zone during the ingot solidification. It was found that the same remelting rate and depth of the two-phase zone are preserved at 2:1 ratio of electric power supplied to the consumable electrode to the power supplied to the current-supplying mould. Ref. 8, Fig. 3.

*Key words: electroslag remelting; recycling; roller; continuous casting; consumable electrode; mushy zone; current supplying mould*

Надійшла до редакції 17.12.2020