

РЕЦИКЛІНГ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО НЕКОМПАКТНОГО ІНСТРУМЕНТУ ЗІ ШВИДКОРІЖУЧОЇ СТАЛІ СПОСОБОМ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ

Є.О. Педченко, Ю.В. Костецький, В.Л. Петренко, Л.Б. Медовар

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

Розглянуто результати експериментів з електрошлакового переплаву відпрацьованого дрібного інструменту зі швидкоріжучої сталі марки Р6М5. Показана доцільність застосування переплаву за двоконтурною схемою, що дозволяє отримати зливку з поверхню високої якості та хімічним складом, який відповідає складу сталі Р6М5. В ході експериментів здійснено переплав електродів, сформованих з відпрацьованих бурів (протяжок), фрез та різців габаритами до 0,2 м. Проведено переплав у струмопровідний Т-подібний кристалізатор з діаметром формуючої частини 0,18 м. Показана можливість вести переплав витратних електродів з площею поперечного перетину, яка змінюється по довжині електрода, з підтриманням стабільного електричного режиму при розподілі підведеної потужності між струмопровідним кристалізатором і витратним електродом (75 і 25 %) та отримувати за цих умов зливки високої якості без дефектів поверхні. Бібліогр. 17, табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: електрошлаковий переплав; двоконтурна схема; рециклінг; швидкоріжуча сталь; зливка; продуктивність переплаву; якість зливка

Вступ. Електрошлаковий переплав є одним з ефективних способів рециклінгу відходів легованих марок сталей [1–3]. Під час переплаву мають місце мінімальні втрати легуючих домішок з окисненням, що дозволяє зберегти вихідний хімічний склад металу, та відбувається рафінування металу. Окрім того, умови твердіння металу у водоохолоджуваному кристалізаторі дозволяють отримувати фізично та хімічно однорідний зливку з високою якістю поверхні.

Електрошлаковий переплав швидкоріжучих сталей давно практикується і є успішним [4]. Проте переплав відпрацьованого інструменту за класичною схемою [5], як правило, здійснюють лише у випадках, коли окремі деталі мають форму і габарити, що дозволяють відносно просто сформувати з них суцільний електрод і забезпечити стабільні умови переплаву з отриманням якісного зливка. Але створення із дрібного відпрацьованого інструменту витратного електрода зі стабільною зовнішньою геометрією та щільним заповненням у поперечному перетині пов'язане зі складнощами. Через це утилізація таких деталей електрошлаковим переплавом за прямою схемою доцільна лише процесом електрошлакової тигельної плавки [6], під час якої рідкий метал, що утворюється в процесі плавлення витратного електрода, накопичується в тиглі і якість відливки, зокрема її поверхні, не залежить від стабільності процесу плавлення електрода.

Стабільність умов формування зливка під час електрошлакового переплаву в значній мірі залежить від стабільності параметрів процесу плавлення витратного електрода [5, 7, 8], який залежить від величини та розподілу електричного струму і магнітного поля в шлаковій ванні. Розподіл щільності електричного струму в шлаковій ванні визначається формою електрода, параметрами крапель рідкого металу, геометрією поверхні розділу шлак/метал. Найбільш інтенсивне виділення тепла відбувається в зонах з більшою щільністю електричного струму, зокрема на кінчику електрода або на краплях, що відриваються від нього. Відповідно стабільність геометричних та фізичних параметрів електрода в значній мірі визначає стабільність процесу переплаву.

Оскільки розплавлений шлак являє собою частину електричного ланцюга з відносно великим омичним опором, спрощено описати зв'язок між потужністю переплаву і площею поперечного перетину електрода можна на підставі закону Ома:

$$P_{\text{ел}} = IU = I^2 \rho \frac{l}{S}, \quad (1)$$

де $P_{\text{ел}}$ — потужність переплаву, кВА; U — прикладена напруга, В; I — струм, А; ρ — питомий опір шлакової ванни, Ом·м; l — відстань від торця електрода до поверхні ванни рідкого металу, м; S — площа поверхні електрода, яка заглиблена в шлакову ванну, м².

Є.О. Педченко — <https://orcid.org/0000-0002-8824-4389>, Ю.В. Костецький — <https://orcid.org/0000-0003-0742-0684>,

В.Л. Петренко — <https://orcid.org/0000-0003-2440-1901>, Л.Б. Медовар — <https://orcid.org/0000-0003-2077-5965>

Оскільки некомпактні відходи інструментальної сталі збирають в один електрод способом зварювання окремих деталей між собою, він буде мати не однакову по довжині площу поперечного перетину та ступінь її заповнення металом. Як наслідок, під час переплаву такого електрода буде непередбачувано змінюватись електричний опір, коефіцієнт заповнення та електричний режим переплаву. Відповідно електрошлаковий переплав такого електрода за прямою схемою з отриманням якісного зливка технологічно складно виконати через нестабільність процесу переплаву.

Вирішити проблему нестабільності процесу плавлення під час переплаву електродів з не сталими по довжині геометричними параметрами може застосування переплаву за двоконтурною схемою [9]. Вона реалізується через використання кристалізатора спеціальної конструкції (струмопровідного), який дозволяє підводити у шлакову ванну додаткову електричну потужність через нього (рис. 1). Додаткове підведення струму в шлакову ванну через струмопровідний кристалізатор дозволяє в значній мірі нівелювати негативний вплив непередбачуваної зміни геометричних параметрів витратного електрода на результат переплаву.

Концепція струмопідвідного кристалізатора була розроблена в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України [10–12]. Верхня частина такого кристалізатора має спеціальну водоохолоджувану секцію, яка утворює невитратний електрод і дає змогу додатково підводити електричну потужність у шлакову ванну від кристалізатора, утворюючи другий контур живлення (рис. 1). Схема може бути реалізована як з одним, так і з двома джерелами живлення [12].

Здійснення процесу ЕШП за двоконтурною схемою значно розширює його технологічні можливості, а саме: дозволяє підтримувати температуру шлакової ванни без витратного електрода, що дає змогу робити його заміну без ризику заохолдити шлак [9, 10]; забезпечує додатковий обігрів периферійної зони шлакової ванни, що значно покращує поверхню зливка та зменшує чи повністю виключає поверхневі дефекти [13]; змінює теплову картину плавильного простору, що дає змогу впливати на профіль ванни рідкого металу [14, 15]; змінює гідродинаміку плавильного простору та забезпечує рух шлаку по колу з інтенсивним його перемішуванням [12].

Таблиця 1. Хімічний склад флюсу АНФ-29, мас. %

| CaF ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | SiO ₂ | MgO | Температура плавлення флюсу, °С |
|------------------|--------------------------------|---------|------------------|-------|---------------------------------|
| 37...45 | 13...17 | 24...30 | 11...15 | 2...6 | 1230...1250 |

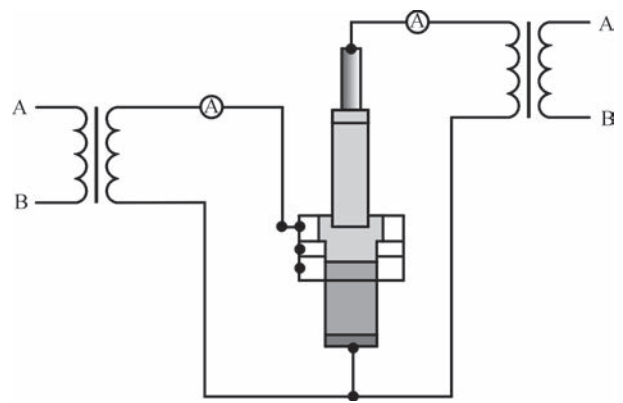


Рис. 1. Схема підключення джерела струму та вимірвальних приладів печі P951

Структура електромагнітного та теплового полів і відповідно розподіл потоків в об'ємі рідкого шлаку та форма ванни розплавленого металу під час ЕШП за двоконтурною схемою значно відрізняються від тих, що мають місце під час ЕШП за класичною схемою. Як показали дослідження [9], порівняно з класичною схемою ЕШП двоконтурна дозволяє зменшити залежність швидкості плавлення електрода від прикладеної до нього електричної потужності. При цьому виникає можливість регулювати температурні умови процесу незалежно від його продуктивності, що розширює можливості технології.

У даній роботі поставлене завдання — дослідити особливості переплаву за двоконтурною схемою витратних електродів, які сформовані з дрібного відпрацьованого інструменту і мають не постійну по довжині площу поперечного перетину та щільність заповнення металом.

Методика досліджень. Переплав дослідних витратних електродів зі швидкоріжучої сталі, зібраних з використаних малогабаритних інструментів, здійснювали на модернізованій печі електрошлакового переплаву P951 з Т-подібним струмопідвідним кристалізатором. Діаметр формуючої частини кристалізатора становив 0,180 м, діаметр струмопідвідної частини — 0,225 м (рис. 1).

Під час переплаву використовували флюс марки АНФ-29, хімічний склад якого наведено в табл. 1.

Дослідні витратні електроди виготовляли зварюванням окремих деталей в єдину конструкцію (рис. 2). Для виготовлення електродів використовували малогабаритні відпрацьовані інструменти (бури, протяжки, фрези та різці) з максимальним розміром до 0,2 м, які згідно маркуванню були



Рис. 2. Зовнішній вигляд дослідного електрода, зібраного з малогабаритного відпрацьованого інструменту зі сталі Р6М5

Таблиця 2. Хімічний склад сталі Р6М5 за ГОСТ 19265–73

| C | Mn | Si | Cr | W | V | Mo | Co | Ni | Cu | S | P |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|------|-------|--------|--------|
| 0,82...0,90 | 0,20...0,50 | 0,20...0,50 | 3,80...4,40 | 5,50...6,50 | 1,70...2,10 | 4,80...5,30 | ≤0,50 | ≤0,6 | ≤0,25 | ≤0,025 | ≤0,030 |

зроблений зі сталі Р6М5 (Р6М5К5, Р6М5К5-МП, Р6М5Ф3-МП, 10Р6М5У-МП) (табл. 2).

Електрошлаковий переплав дослідних електродів здійснювали за двоконтурною схемою (рис. 3). Під час переплаву 25 % від загальної електричної потужності підводили крізь контур живлення електрода, а решту (75 %) — струмопровідного кристалізатора. Загальна потужність переплаву складала близько 200 кВА. Необхідна величина загальної підведеної потужності була попередньо визначена розрахунком, виходячи з параметрів кристалізатора і величини коефіцієнта заповнення 0,2...0,3. Обраний розподіл потужності між контурами живлення був обумовлений необхідністю мінімізувати негативний вплив непередбачуваної зміни величини коефіцієнта заповнення та електричного опору електрода на стабільність параметрів процесу переплаву та забезпечити при цьому якість поверхні зливка.



Рис. 3. Процес ЕШП дослідних електродів

Також був випробуваний варіант ведення процесу, коли уся електрична потужність подається крізь контур живлення кристалізатора.

Результати досліджень та їх обговорення. В результаті переплаву трьох дослідних електродів, з їх послідовною заміною в ході процесу, був отриманий зливоч діаметром 0,180 м, довжиною 1,225 м і вагою 259 кг.

Як показав аналіз електричних параметрів, отриманих за допомогою вимірювального обладнання, електричний опір дослідних електродів через їх різну внутрішню структуру суттєво різнився і становив, Ом: для електрода 1 — 38...40; 2 — 29; 3 — 33. Таким чином, електрод 1 мав електричний опір, який був на 38 % більше ніж у електрода 2 і на 21 % більше ніж у електрода 3. Проте, незважаючи на це, завдяки особливостям обраної схеми переплаву такі коливання суттєво не вплинули на загальну стабільність електричних параметрів процесу (рис. 4).

За найбільшого електричного опору переплав електрода 1 характеризувався найменшою величиною коефіцієнта заповнення, яка становила 0,25, що відбилося на продуктивності процесу. Масова швидкість плавлення для цього електрода складала лише 63 кг/год. У той час як для електрода 2 вона становила 113 і 110 кг/год — для електрода 3 при однаковому для обох коефіцієнтах заповнення (0,37) та незмінній підведеній потужності для всіх електродів. Таким чином, в умовах експерименту за сталої загальної підведеної електричної потужності зі збільшенням коефіцієнту заповнення та зменшенням величини електричного опору електродів спостерігалось збільшення продуктивності процесу. Оскільки коефіцієнт заповнення та електричний опір електрода у даному випадку є величинами, значення яких в основному визначає внутрішню структуру і геометрію збірного електрода, продуктивність переплаву буде переважно залежати саме від них.

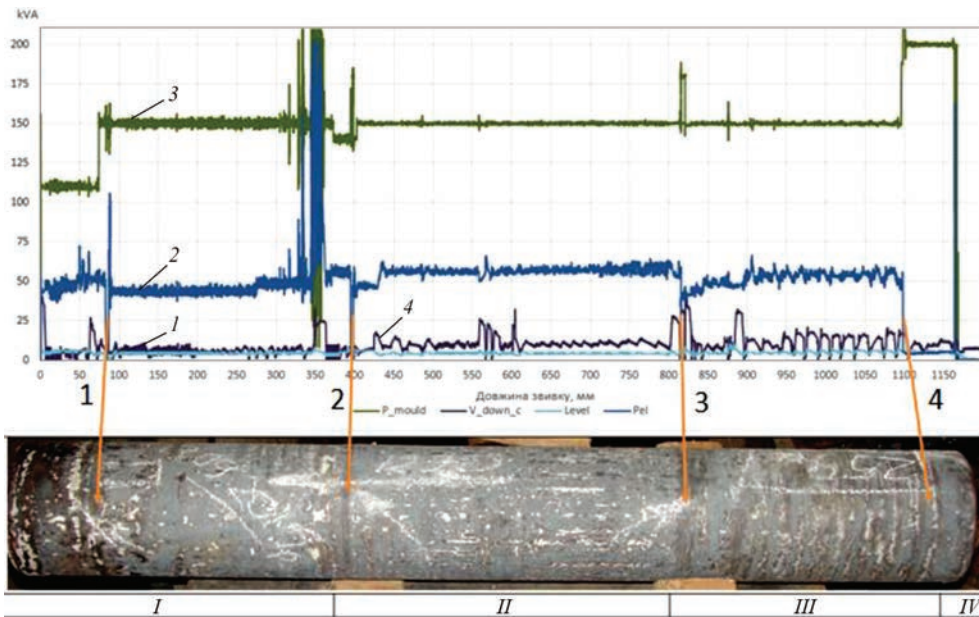


Рис. 4. Діаграми швидкості витяжки зливка (крива 1), потужності, прикладеної до електрода (крива 2) та струмопідвідної секції (крива 3), рівня металу в кристалізаторі (крива 4) по довжині зливка та їх відповідність поверхні зливка

Під час переплаву електрода 3 був протестований режим з підведенням до шлакової ванни усієї електричної потужності крізь ланцюг живлення струмопідвідної секції кристалізатора (рис. 4). Аналіз отриманої кривої продуктивності показав, що при переході на таку схему живлення за незмінної загальної потужності переплаву продуктивність переплаву зменшується. Слід зазначити, що подібне також спостерігалось і в інших дослідженнях [9].

Внаслідок переходу на режим з прикладанням усієї підведеної потужності на кристалізатор розподіл щільності електричного струму в шлаковій ванні змінюється і основне виділення джоулевого тепла зосереджується в її периферійних об'ємах, поблизу струмопідвідної секції кристалізатора [16]. До простору під витратним електродом тепло надходить шляхом теплопереносу. За таких умов характер плавлення електрода визначається умовами перенесення тепла в об'ємі шлакової ванни та її температурним станом. Величина теплового потоку від шлакової ванни в електрод залежить від перепаду температур між поверхнею електрода і рідким шлаком. За відсутності генерації тепла безпосередньо під електродом, як це відбуваєть-

ся, коли на нього подається певна електрична потужність, цей перепад вочевидь стає меншим, що спричиняє відповідне зменшення швидкості плавлення. В певній мірі компенсувати зменшення швидкості переплаву внаслідок зміни розподілу температур у шлаковій ванні можна за рахунок більшого занурення електрода, тим самим збільшивши густину теплового потоку на електрод, оскільки вона є функцією площі зануреної у шлакову ванну поверхні електрода. При перепаді з малими значеннями коефіцієнта заповнення цей механізм регулювання швидкості плавлення буде ефективним, що за необхідності дасть можливість вести плавку в цьому режимі з незначною втратою продуктивності, але з отриманням зливків з гарантовано високою якістю поверхні за рахунок покращення умов формуванням гарнісажу внаслідок збільшення температури шлакової ванни на периферії. Так, на дослідному зливку отримана найкраща якість поверхні саме в цьому режимі переплаву (рис. 5).

Слід зазначити, що якість поверхні отриманого дослідного зливка в цілому є якісною. Однак поверхня зливка, сформована під час переплаву кожного окремого електрода, має певні візуальні відмінності



Рис. 5. Зони поверхні виплавленого зливка: I–IV див. в тексті

Таблиця 3. Хімічний склад виплавленого зливка, мас. %

| Частина зливка | Mn | Si | Cr | W | V | Mo | Co | Ni | Cu | S |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Низ | 0,39 | 0,4 | 4,22 | 6,28 | 1,98 | 5,12 | 0,3 | 0,37 | 0,2 | 0,02 |
| Верх | 0,37 | 0,42 | 4,13 | 6,14 | 1,91 | 5,04 | 0,26 | 0,33 | 0,19 | 0,018 |

і її можна розділити на чотири зони, які відповідають окремим етапам експерименту (рис. 5).

I зона. Донна частина зливка без гофрів і збриж, які за класичної схеми ЕШП обов'язково присутні в цій зоні. Відповідно зменшується величина обрізи і збільшується вихід придатного. Пояс більш темного кольору (рис. 4, стрілка 1) відповідає підняттю потужності на струмопідвідній секції до 150 кВА.

II зона. Перехід між зміною електродів (рис. 4, стрілка 2) відрізняється лише кольором металу при відсутності дефектів.

На поверхні незначні дефекти у вигляді вертикально спрямованих заливин глибиною не більше 1,5 мм, у яких лишився гарнісаж. Їх виникнення обумовлене нестабільним плавленням електрода через його фізичну конфігурацію.

III зона. На поверхні спостерігаються шлакові пояски висотою до 1 мм. Їх поява спричинена нерівномірним рухом каретки витягування зливка внаслідок нестабільного плавлення електрода через його фізичну конфігурацію (рис. 4, крива 1).

IV зона. Поверхня зливка без видимих дефектів.

Спостережувані нерівності на поверхні зливка під обдирання не перевищують 1,5...2,0 мм, а для IV зони, яка відповідає переплаву зі 100 % потужності на струмопідвідній секції кристалізатора, дефекти взагалі відсутні

За своїм хімічним складом метал після перепаву відповідає вимогам стандарту для сталі марки Р6М5 (табл. 3) [17]. Зразки для хімічного аналізу були відібрані з нижньої та верхньої частин отриманого зливка. Результати хімічного аналізу зразків металу свідчать про задовільну хімічну однорідність дослідного зливка.

Висновки

1. Електрошлаковий перепад за двоконтурною схемою дозволяє ефективно здійснювати рециклінг відпрацьованого малогабаритного інструменту, скомпанованого у витратні електроди, зі збереженням хімічного складу металу та отриманням зливоків з поверхнею високої якості. Проведені експерименти показали можливість вести перепад витратних електродів з площею поперечного перетину, яка непередбачувано змінюється по довжині електрода, з підтриманням стабільного електричного режиму при розподілі підведеної потужності між струмопро-

відним кристалізатором і витратним електродом як 75 і 25 % та отримувати за цих умов зливки високої якості без дефектів поверхні.

2. Конфігурація збірного електрода впливає на продуктивність перепаву. За сталої загальної підведеної електричної потужності і її розподілі між контурами живлення зі збільшенням коефіцієнту заповнення з 0,25 до 0,37 та зменшенням величини електричного опору електродів спостерігалось збільшення продуктивності процесу.

3. Перепад електродів виключно за рахунок живлення струмопідвідної секції кристалізатора можливий, але при переході на цей режим за незмінної загальної потужності перепаву продуктивність його зменшується, а якість поверхні зливка покращується. При цьому завдяки великому периферійному тепловкладенню зникають дефекти на поверхні зливка.

Список літератури

1. Lore J.D. (1974) *Electrical conductivity measurements of molten-salt fluxes from an electroslag remelting process*. Oak Ridge Y-12 Plant.
2. Björkman B., Samuelsson C. (2014) *Chapter 6. Recycling of steel*. Handbook of Recycling, 65–83. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396459-5.00006-4>
3. Birat J.-P. (2015) Life-cycle assessment, resource efficiency and recycling. *Metallurgical Research & Technology*, 112(2), article 206. <https://doi.org/10.1051/metal/2015009>
4. Медовар Л.Б., Чернец А.В., Грабовский Ц.Ф. и др. (2000) Опыт изготовления и применения быстрорежущих валков ЭШН ЖМ. *Пробл. спец. электрометаллургии*, 3, 3–9.
5. (1976) *Электрошлаковые печи*. Патон Б.Е. и Медовар Б.И. (ред.). Киев, Наукова думка.
6. Фишман К.К., Орловский Ю.В., Федоровский Б.Б. (1989) *Электрошлаковое кокильное литье в ремонтном и инструментальном производстве*. Киев, Издательство «Знание» УССР.
7. Митчел А., Джексон Р.О., Балентайн А.С. (1975) Макросегрегация, движение жидкости и теплоперенос в процессе ЭШП. *Электрошлаковый перепад: Материалы IV Международ. симпозиума по технологии электрошлакового перепада (7–8 июня 1973 г., г. Токио, Япония)*. Киев, Наукова думка, вып. 3, 29–38.
8. Abdellah Kharicha, Andreas Ludwig, Menghuai Wu (2014) On melting of electrodes during electro-slag remelting. *ISIJ International*, 54(7), 1621–1628.
9. Цыкуленко А.К., Ланцман И.А., Медовар Л.Б. и др. (2000) Двухконтурная схема электрошлакового перепада расходуемого электрода. *Пробл. спец. электрометаллургии*, 3, 16–20.
10. Ксендзык Г.В., Фруммин И.И., Ширин В.С., Куков Ю.М. (1982) *Токонпроводящий кристаллизатор*. А.с. № 343538922-02. Заявлено 12.05.82.

11. Ксендзык Г.В., Фрумін І.І., Ширин В.С. (1964) А.с. № 264427. *Топодводящий кристаллизатор*. Заявлено 19.11.64.
12. Ксендзык Г.В. (1974) Топодводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны. *Специальная электрометаллургия*, **27**, 32–40.
13. Медовар Л. Б., Цыкуленко А.К., Чернец А. В. и др. (2000) О формировании поверхности слитков из никелевых суперсплавов при ЭШП в токоподводящем кристаллизаторе. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **4**, 7–14.
14. Кусков Ю.М., Соловьев В.Г., Лентюгов И.П., Жданов В.А. (2018) Роль шлаковой ванны в процессе наплавки в токоподводящем кристаллизаторе. *Современная электрометаллургия*, **2**, 41–44.
15. Медовар Л.Б., Цыкуленко А.К., Чернец А.К. и др. (2000) Исследование влияния параметров двухконтурной схемы ЭШП на размеры и форму металлической ванны. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **4**, 3–7.
16. Haibo Cao, Zhouhua Jiang, Yanwu Dong et al. (2020) Effect of single power two circuits electroslag remelting process on the cleanliness of the remelted ingot. *ISIJ International*, **60(2)**, 247–257. <https://doi.org/10.2355/isijinternational>. ISIJINT-2019–450.
17. ГОСТ 19265–73. *Прутки и полосы из быстрорежущей стали*.
6. Fishman, K.K., Orlovsky, Yu.V., Fedorovsky, B.B. (1989) *Electroslag chill casting in repair and tool production*. Kyiv, Znanie [in Russian].
7. Mitchell, A., Jackson, R.O. Ballantyne, A.S. (1975) Macrosegregation, fluid motion and heat transfer in ESR process. In: *Proc. of 4th Int. Symp. on Electroslag Remelting Technology (Japan, Tokyo, 7–8 June 1973)*. Kyiv, Naukova Dumka, issue 3, 29–38 [in Russian].
8. Abdellah Kharicha, Andreas Ludwig, Menghuai Wu (2014) On melting of electrodes during electroslag remelting. *ISIJ Int.*, **54(7)**, 1621–1628.
9. Tsykulenko, A.K., Lantsman, I.A., Medovar, L.B. et al. (2000) Bifilar circuit of consumable electrode electroslag remelting. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **3**, 16–20 [in Russian].
10. Ksyondzyk, G.V., Frumin, I.I. Shirin, V.S., Kuskov, Yu.M. (1982) *Current-supplying mould*. USSR author's cert. 343538922-02. Fill. 12.05.82 [in Russian].
11. Ksyondzyk, G.V., Frumin, I.I. Shirin, V.S. (1964) *Current-supplying mould*. USSR author's cert. 264427. Fill. 19.11.64 [in Russian].
12. Ksyondzyk, G.V. (1974) Current-supplying mould, providing the slag pool rotation. *Spets. Elektrometallurgiya*, **27**, 32–40 [in Russian].
13. Medovar, L.B., Tsykulenko, A.K., Chernets, A.V. et al. (2000) On formation of surface of ingots from nickel superalloys during ESR in current-supplying mould. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **4**, 7–14 [in Russian].
14. Kuskov, Yu.M., Solovjev, V.G., Lentyugov, I.P., Zhdanov, V.A. (2018) Role of slag pool in process of surfacing in current-carrying mould. *Suchasna Elektrometal.*, **2**, 41–44 [in Russian].
15. Medovar, L.B., Tsykulenko, A.K., Chernets, A.V. et al. (2000) Investigation of influence of parameters of ESR bifilar circuit on sizes and shape of metal pool. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **4**, 3–7 [in Russian].
16. Haibo Cao, Zhouhua Jiang, Yanwu Dong et al. (2020) Effect of single power two circuits electroslag remelting process on the cleanliness of the remelted ingot. *ISIJ Int.*, **60(2)**, 247–257. <https://doi.org/10.2355/isijinternational>. ISIJINT-2019–450.
17. ГОСТ 19265–73: *Bars and strips of high-speed steel* [in Russian].

References

1. Lore, J.D. (1974) *Electrical conductivity measurements of molten-salt fluxes from an electroslag remelting process*. Oak Ridge Y-12 Plant.
2. Björkman, B., Samuelsson, C. (2014) *Chapter 6. Recycling of steel*. Handbook of Recycling, 65–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396459-5.00006-4>
3. Birat, J.-P. (2015) Life-cycle assessment, resource efficiency and recycling. *Metallurgical Research & Technology*, **112(2)**, article 206. DOI: <https://doi.org/10.1051/metal/2015009>
4. Medovar, L.B., Chernets, A.V., Grabovsky, Ts.F. et al. (2000) Experience of production and application of high-speed rolls of ESS LM. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **3**, 3–9 [in Russian].
5. (1976) *Electroslag furnaces*. Ed. by B.E. Paton, B.I. Medovar. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

RECYCLING OF USED NONCOMPACT TOOLS FROM HIGH-SPEED STEEL BY ELECTROSLAG REMELTING

E.O. Pedchenko, Yu.V. Kostetskyi, V.L. Petrenko, L.B. Medovar

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

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

Results of experiments on electroslag remelting of used small tools from high-speed steel of R6M5 grade are considered. Rationality of application of remelting by a double-circuit scheme is shown, which allows producing an ingot with a high quality surface and chemical composition, corresponding to that of R6M5 steel. During experiments, remelting of electrodes, formed from used drills (broaches), mills and cutters of up to 0.2 m size was performed. Remelting into a current-supplying T-shaped mould with forming part diameter of 0.18 m was conducted. Shown is the possibility of performing remelting of consumable electrodes with the cross-sectional area, changing along the electrode length, while maintaining a stable electric mode at distribution of the supplied power between the current-supplying mould and consumable electrode (75 and 25 %) and obtaining high-quality ingots without surface defects under such conditions. Ref. 17, Table. 3, Fig. 5.

Key words: electroslag remelting; double-circuit scheme; recycling; high-speed steel; ingot; remelting productivity; ingot quality

Надійшла до редакції 21.06.2022