

УДК 669.187.56-669.054

<https://doi.org/10.34185/tpm.2.2020.03>

Медовар Л.Б., Полішко Г.О., Петренко В.Л., Стівченко Г.П.

## Сучасні електрошлакові технології переплаву електроду та переробка рідкого металу (огляд)

Medovar L., Polishko G., Petrenko V., Stovpchenko G.

### Modern electroslag technologies of electrode remelting and processing of liquid metal (review)

**Мета.** Представлено результати аналізу сучасних технологій електрошлакового переплаву. **Результати.** Показано, що ЕШП сьогодні є основним і найперспективнішим в одержанні металу високої якості. Захист плавильного простору і електроду від навколишньої атмосфери інертним газом (IESR) або плавлення під тиском (PESR) дозволяє запобігти окисленню, що особливо актуально при переплаві сталей і сплавів з великим вмістом легкоокислюваних елементів. Відмова від використання витратного електроду при класичному ЕШП на користь рідкого металу, за умови застосування струмопідвідного кристалізатора, є ефективним вирішенням проблеми його виготовлення (ціна виготовлення досягає до 40-60% вартості виробництва зливка, а в деяких випадках неможливе) та зниження енергетичних витрат. **Наукова новизна.** При ЕШП РМ відбувається зниження температури шлаку і перегріву металу порівняно з класичним ЕШП, зменшується обсяг ванни рідкого металу, що в свою чергу покращує умови формування зливка, за рахунок зниження розвитку сегрегаційних процесів і дає можливість отримання металу однорідного складу і структури.

**Objective.** The results of the analysis of advanced technologies of electroslag remelting are presented. **Results** It is shown that ESR today is the main and most challenging in obtaining of high quality metal. Protection of the melting chamber and the electrode from the atmosphere by inert gas (IESR) or melting under pressure (PESR) prevents oxidation, which is especially important during remelting of the steels and alloys with high content of easily oxidizable elements. Refusal to use a consumable electrode in the classical ESR in favor of liquid metal, provided by the use of current-supplying mold, is an effective solution to the problem of its manufacture (manufacturing price reaches 40-60% of the cost of ingot production, and in some cases impossible) and reduce energy costs. **Scientific novelty.** During ESR LM, there is a decrease in temperature of slag and overheating of metal in comparison with classical ESR, the volume of liquid metal bath decreases that followed by improving conditions of ingot formation, at the expense of decrease in development of segregation processes and gives the chance to receive metal of homogeneous composition and structure. **Practical significance.** The advantages of the new ESR processes are a wide variation of the metal feed rate, less metal overheating and a flat bath, which provides molding with a homogeneous and defect-free internal structure and a smooth surface.

**Ключові слова:** електрошлаковий переплав, витратний електрод, електрошлакова переробка рідкого металу, струмопідвідний кристалізатор

**Keywords:** electroslag remelting, consumable electrode, electroslag processing of liquid metal, current supplying mould.

#### ВСТУП

Вперше ідею використання нагріву та плавлення твердої заготовки при проходженні змінного електричного струму через рідкий шлак було висунуто на початку 50-х років ХХ ст. в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України Б.Є. Патonom і Б. І. Медоваром. [ 1]. Принциповою особливістю запропонованого нового способу було застосування бездугового зварювального процесу, де джерелом тепла слугує рідкий електропровідний шлак, в якому відбувається перетворення електричної енергії в теплову. Спочатку він використовувався для зварювання і наплавлення [2,3] а далі отримав застосування для одержання злиwkів під назвою електрошлаковий переплав (ЕШП). [4-7]. Класичний ЕШП передбачає використання витратних електродів (литі злитки або прокатані заготовки), основою яких (як і в інших переплавних процесах - ВДП, ЕЛП тощо) є плавлення з невеликою швидкістю для утворення рідкого металу, який знову затвердне в злиток, але дуже щільний і гомогенний за перетином і висотою [8]. Швидкість формування зливка в процесі ЕШП є меншою, ніж в процесах розливки рідкого металу в злитки або на безперервно литу заготовку в традиційній металургії. Навмисне

суттєве скорочення потенційної продуктивності процесу плавлення робиться задля високої якості виробу - запобігання ліквідаційного перерозподілу елементів і утворенню усадкових дефектів. ЕШП може проводитися у водоохолоджувальному кристалізаторі (стаціонарному з його заповненням (рис.1.1, а) або в короткому з витягуванням зливка донизу або рухом доверху (рис. 1.1, б)).

В якості вихідного матеріалу при класичному ЕШП зазвичай використовують витратний електрод, який може бути литим або деформованим, що отриманий будь-яким переплавним процесом або відлитим у форму. Шлакова ванна, що знаходиться в водоохолоджувальному кристалізаторі, нагрівається і розплавлюється електричним струмом (електричним опором), що протікає між електродом і піддоном. Коли температура шлакової ванни перевищує температуру плавлення металу, електрод починає оплавлятися; краплі, що стікають з торця електроду падають в шлакову ванну, утворюючи на піддоні металеву ванну, яка поступово твердне. Висока температура шлаку і розплавленим металом впливають на реакції, які протікають на границі розділу шлак - метал. Електрод поступово подають в шлакову ванну і за мірою його ро-

Медовар Лев Борисович – д.т.н., проф. ІЕЗ ім. Патона  
Полішко Ганна Олексіївна – к.т.н., ст. наук.с. ІЕЗ ім. Патона  
Петренко Володимир Леонідович – м.наук.с. ІЕЗ ім. Патона  
Стівченко Ганна Петрівна – д.т.н., проф. ІЕЗ ім. Патона

Medovar L. - Ph.D., prof. IEW named after Paton  
Polishko G. - Ph.D., Assoc. Prof. IEW named after Paton  
Petrenko V. - Junior Research Fellow. IEW named after Paton  
Stovpchenko G. - Ph.D., prof. IEW named after Paton

зплавлення формується зливком. Направлену кристалізацію металу в зливках ЕШП забезпечують умови безперервного підведення тепла зверху (від електродного металу та шлакової ванни) при відведенні тепла до зливку і стінку кристалізатора. У місцях контакту розплавленого шлаку зі стінками водооходжувального кристалізатора він твердне, що забезпечує наявність суцільної кірки твердого шлаку (гарнісажу) між кристалізатором і зливком.

Товщина гарнісажу залежить від температури плавлення шлаку та теплової енергії, що виділяється в шлаковій ванні, та складає 1-4 мм. Наявність гарнісажу забезпечує формування високоякісної гладкої поверхні зливоків ЕШП, а також сприяє направленої кристалізації за рахунок зменшення тепловідведення в горизонтальному напрямленні [9].

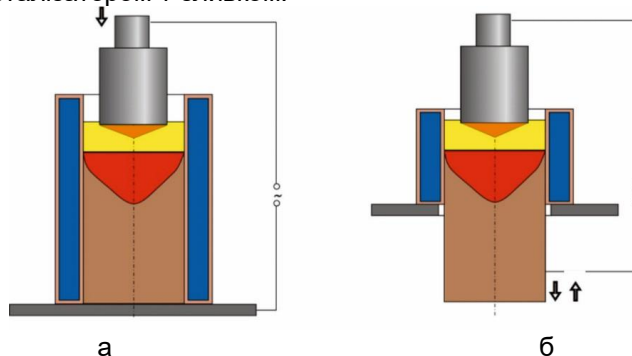


Рис. 1 Схеми класичного ЕШП: а- ЕШП в стаціонарному кристалізаторі з його заповненням, б- ЕШП в короткому кристалізаторі

Електрошлаковий процес знаходить своє застосування в різних металургійних виробництвах. Цей процес поєднує функції рафінування металу і контролювання умов його кристалізації. На різних етапах розвитку ЕШП роль цих функцій змінювалася. Якщо на першому етапі перевага віддавалася можливості рафінування металу, то в даний час загальноприйнято, що головною функцією ЕШП є забезпечення необхідної структурної та хімічної однорідності злитка, тобто забезпечення таких умов кристалізації, при яких будуть повністю пригнічені процеси, що зумовлюють розвиток ліквіації. Слід відмітити, що основне призначення ЕШП за останні десятиліття змінилося. Якщо раніше ЕШП здебільшого використовували для очищення металу від домішок, зараз він є перш за все спосо-

бом формування зливка з щільною структурою і гладкою поверхнею, що придатна до деформування без додаткової зачистки, що гарантує високий вихід придатного [10, 11].

Сьогодні електрошлаковий передел використовують для виготовлення найбільш відповідальних деталей машин і механізмів, які працюють в жорстких умовах в основних галузях промисловості у всьому світі: металургії, енергетиці, нафтохімії тощо [12- 16]. ЕШП дозволяє отримувати високоякісні вироби з інструментальних, конструкційних, високоміцних сталей, нержавіючих теплостійких та жаростійких сталей, сплавів на нікелевій основі та суперсплавів [17] (рис. 1.5), при тому загальний об'єм виробництва електрошлакових сталей постійно зростає.

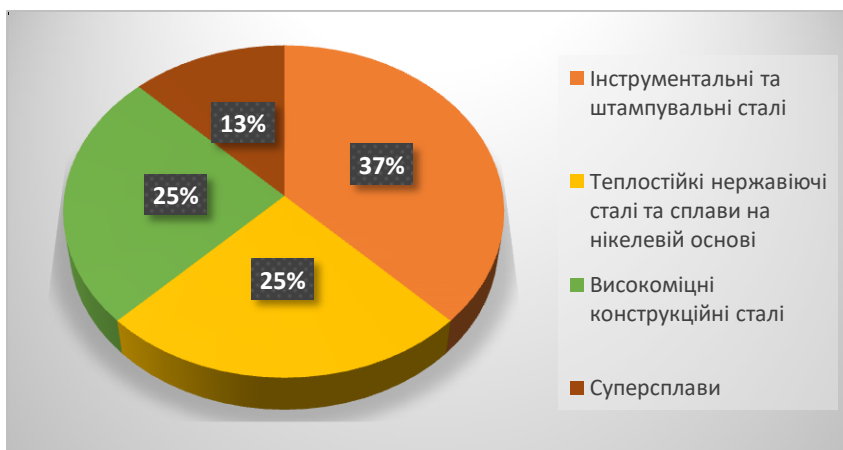


Рис. 1.5 Використання ЕШП у світі [17]

Сучасна електрометалургія використовує широку гаму технологій, які створені на базі електрошлакового процесу. Сьогодні винайдено і впроваджено в промисловість цілу низку технологій, що

базуються на електричному нагріві шлаку, як джерела тепла, які можна поділити на дві основні групи: з використанням витратних електродів та без електродів з рідким металом.

Електрошлаковий переплав витратного електрода.

Якісний і однорідний витратний матеріал (електрод, дріт або порошок) і його повільне плавлення є запорукою підтримання стабільного процесу переплаву, який забезпечує малий обсяг і постійне оновлення металеві ванни. Ванна наповнюється і утримується біля джерела тепла, а її протилежний бік твердне з утворенням зливку, що має близький склад, але значно кращу гомогенність і структуру.

Для виробництва витратних матеріалів переплавних процесів, як і для випуску готової продукції традиційної металургії, застосовують всі стадії металургійного циклу: виплавку, рафінування, легування, розкислення та розливу, інколи ще й прокатку або ковку. Для одержання ж дротів і порошоків використовують ще додаткові обробки (волочіння дротів, подрібнення та/або розпилення порошоків тощо). Зрозуміло, що витратні матеріали переплавного процесу мають таку ж або вищу вартість, як і готова продукція традиційного металургійного заводу. В результаті, для переплавних процесів спеціальної електрометалургії (зокрема для ЕШП та ВДП) вартість витратного електрода складає до 60 % собівартості зливка.

Сам процес переплаву теж є затратним, оскільки тільки на повернення твердого металу витратного електрода в рідкий стан необхідні суттєві затрати електроенергії (теоретична витрата енергії на розігрів та плавлення сталевого скрапу складає 1274 МДж/т, а при перегріві розплаву до 1873 К величина її підвищується до 1327 МДж/т [18]). При електрошлаковому переплаві витрата електроенергії суттєво залежить від технології плавки (склад і кількість шлаку, коефіцієнт заповнення кристалізатора, режим плавлення тощо) та ефективності короткої мережі печі [19.], але в будь-якому разі є значно вищою (800-2000 кВт·год [20.]) за теоретичну величину на плавлення скрапу.

Електрошлаковий переплав витратного (витратних) електрода (ів) реалізовано в наступних різновидах:

- *класичний електрошлаковий переплав* без використання закритої камери з застосуванням витратних електродів придатний для отримання високоякісних виробів з інструментальних, конструкційних, високоміцних сталей, теплостійких нержавіючих та жаростійких сталей, сплавів на нікелевій основі та суперсплавів;

- *ЕШП в закритій камері* з використанням захисного інертного газу (азоту, аргону, рідше – осушеного повітря) при атмосферному тиску (англійською - Inert Electroslag Remelting - IESR) [21-23] - це головний процес на сьогодні;

- *ЕШП при підвищеному тиску* (зазвичай до 4 МПа) в камері, що зазвичай заповнена азотом (англійською - Pressure Electroslag Remelting- PESR),

який використовують головним чином для виплавки високоазотистих сталей [23, 25];

- *ЕШП у вакуумі* (англійською Electroslag Remelting Under Vacuum - VAC-ESR) [26] використовується для переплаву суперсплавів і титанових сплавів. При VAC-ESR переплавлений метал захищено від окислення. Застосування вакууму забезпечує вакуумну дегазацію розплаву та видалення водню;

- *камерний ЕШП* (англійською – Chamber Electroslag Remelting – ChESR) - різновид технології ЕШП в контрольованій атмосфері з робочим тиском до 8 МПа. Застосовується для виробництва високоякісних зливок титану та його сплавів з титанової губки або порошку, з можливістю отримання квадратних і прямокутних зливок, що дуже важливо для подальшої деформації [27, 28];

- *швидкісний ЕШП* - (англійською - Electroslag Rapid Remelting Process –ESRR). У такому процесі здійснюється переплав електрода великого діаметру в Т-подібний кристалізатор, при цьому перетин витратного електрода в 3-10 разів перевершує перетин зливка, що витягується з кристалізатора. Цим способом отримують заготовки з ледебуритних, швидкорізальних, нержавіючих сталей та суперсплавів [29];

- *дугошлаковий переплав (ДШП)* (англійською – Arc Slag Remelting– ASR) це процес переплаву витратного електрода електричною дугою, що горить між поверхнею рідкої шлакової ванни і електродом в мідному водоохолоджуваному кристалізаторі

ДШП використовується для виплавки високоазотистих сталей і титану та його сплавів [30-32].;

- *двоконтурна схема ЕШП (ЕШП ДС)* з використанням струмопідвідного кристалізатора (англійською - Electroslag Remelting With Two Independent Power Circuits – ESR TC). Під час ЕШП ДС струм подається по двох ланцюгах «витратний електрод - піддон» і «струмопідвідний кристалізатор - піддон». Це дозволяє розірвати жорстку залежність температури процесу і швидкості плавлення електрода та забезпечити управління тепловкладенням в шлакову і металеву ванни, що важко досягти в стандартному ЕШП. ЕШП ДС застосовується для виробництва складних сталей, суперсплавів і титану [33, 34].

Досвід застосування електрошлакових технологій в отриманні високоякісної продукції орієнтований переважно на застосування витратних електродів. Розширити можливості ЕШП дозволяє перехід на рідкий метал, в якості витратного матеріалу. Про перспективність відмови від витратних електродів при ЕШП та застосування рідкого металу свідчать розробки, що наведені нижче.

Електрошлакові процеси без витратних електродів з використанням струмопідвідного кристалізатора.

Будь-які вдосконалення, що скорочують витрати електроенергії в переплавних процесах, є необхідними і актуальними. Одним з найбільш радикальних і ефективних рішень є використання рід-

кого металу замість витратного електроду, що було реалізовано зі створенням електрошлакового процесу з застосуванням рідкого металу (ЕШП РМ) [35-38].

Основні технологічні процеси без витратних електродів представлено наступними різновидами:

- *порційна електрошлакова вилівка (ПЕШВ)* це технологія яка розроблена на основі використання електрошлакової технології з невитратним графітованим електродом. Метал в кристалізатор заливають порційно. ПЕШВ застосовувалася у виробництві великих сталевих ковальських зливків, як метод боротьби з дефектами усадкового та ліквіційного походження [39-42];

- *електрошлакове наплавлення (ЕШН) дискретними матеріалами* (дріб, порошок, стружка тощо). Наплавлення відбувається в струмопідвідному кристалізаторі, до якого підведено струм і який є секційним неплавким електродом. Це дає можливість забезпечення рівномірного теплового поля на великій площині; відсутність забруднення наплавленого металу включеннями електродного металу; можливість магнітного впливу на процеси кристалізації металу, що наплавляється; можливість регулювання проплавлення основного металу як за рахунок електричного режиму, так і за рахунок зміни швидкості наплавлення тощо. На практиці при ЕШН з подачею дискретних матеріалів використовують присадкові матеріали вуглецевих низьколегованих, швидкорізальних та інструментальних сталей, чавунів, карбідів вольфраму з різними добавками та інш. Використовується для відновлювання робочого шару відповідаль-

них виробів, наприклад, прокатних валків, роторів електродвигунів тощо [43, 44].

- *з подачею рідкого металу (ЕШП РМ)* (англійською - Electroslag Remelting by Liquid Metal – ESR LM), в тому числі електрошлакове безперервне лиття (англійською - Electroslag Continuous Casting – ESCC), і виробництво методом ЕШП композитних виробів (ЕШН РМ, ЕШН РПМ) (англійською - Electroslag Surfacing by Liquid Metal – ESS LM) (валки, листовий прокат, труби, ротори та ін.) [45-47]. Електрошлакове безперервне лиття (ESCC) дозволяє отримувати заготовки круглого та прямокутного перетину з високоміцної сталі гарантованої якості, які вільні від дефектів ліквіційного походження та з направленою кристалізацією. До того ж швидкість лиття в 1-3 рази вище ніж традиційного ЕШП, а споживання електроенергії зменшується на 20-30% [48- 50].

Електрошлаковий процес із застосуванням рідкого металу сьогодні реалізовано в технологіях і обладнанні для наплавлення рідким металом (Електрошлакове Наплавлення Рідким Металом - ЕШН РМ) валків прокатних станів (процес комерціалізовано - 2 промислові установки збудовано на НКМЗ). В дослідно-промисловому варіанті можливості цього процесу успішно випробувано і при виробництві суцільних та порожнистих злитків (Електрошлакова Переробка Рідкого Металу - ЕШП РМ) [51, 52]. В цих технологіях витратні електроди не використовують, що складає радикальну відмінність розробленого процесу і визначає його переваги.

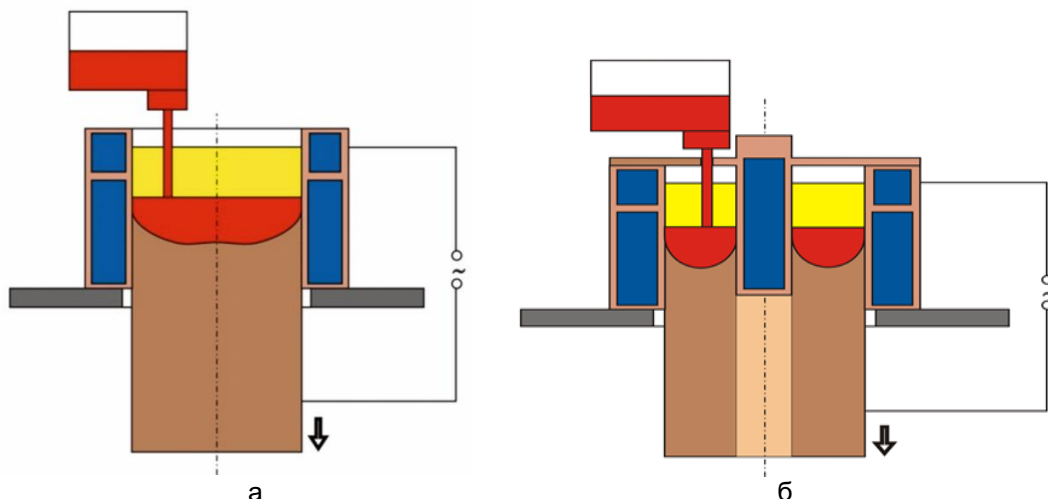


Рис. 3 Схема ЕШП РМ суцільних (а) і порожнистих зливків (б)

Рідкий метал подають з підігрівного пристрою в кристалізатор спеціальної конструкції, перші варіанти дизайну якого було винайдено в Інституті електрозварювання ім. Є.О.Патона [53, 54], а потім вдосконалено нашими колегами, в тому числі співавтором цієї роботи Л. Медоваром [55, 56].

Особливістю струмопідвідного кристалізатора (назва англійською - current supplying mould - CSM-

зареєстрований товарний знак компанії "ЕЛМЕТ-РОЛ" [57]) є його секційна структура, яка дозволяє організувати підвід перемінного струму до верхньої частини, де знаходиться верхня частина шлакової ванни.

Кільцевий невитратний електрод, яким є струмопідвідна секція такого кристалізатора, нагріває периферію шлакової ванни, завдяки чому вона підтримується в рідкому стані. При цьому

істотно змінюються шляхи проходження електричного току в неї. Доля електричної потужності, що подається на шлакову ванну через струмопідвідний кристалізатор може змінюватися від 0 до 100%. Джерелом рідкого металу в такому кристалізаторі можуть бути витратний електрод, кускові матеріали, або рідкий метал, який подають з підігрівного розливального пристрою.

Широкою програмою лабораторних досліджень і промисловим випробуванням сьогодні вже переконливо доведено, що заміна витратних електродів рідким металом відкриває широкі перспективи підвищення однорідності злитка і гнучкості технологічного процесу [58-60], особливо для виробництва сплавів, що мають велику кількість легуючих елементів та є складними для деформування.

З точки зору фізико-хімічних умов можна вважати, що при ЕШП РМ взаємодії відбуваються при температурах нижчих на 70-95 градусів. Зниження температури системи сприяє меншому окисленню активних елементів, спорідненість яких (окрім вуглецю) до кисню зменшується з ростом температури. Доведено [61], що це однак вона не має суттєво вплинути на перебіг реакції десульфурзації металу, незважаючи на деяке збільшення в'язкості шлаку, яке, гіпотетично, може впливати на асиміляцію неметалевих включень. Одержані нами результати є й свідченням того, що основні рафінувальні реакції між шлаком і металом відбуваються на поверхні контакту шлакової і металеві ванни, а не в пливці на торці електроду, як це інколи вважали. Безумовно ж перевагою меншої температури металу, що

подається при ЕШП РМ, є кращі умови тверднення злитку.

В кінцевому підсумку, зниження і температури шлаку і перегріву металу при ЕШП РМ порівняно з класичним ЕШП, зменшує обсяг ванни рідкого металу, що в свою чергу покращує умови формування злитка і, як доведено на практиці, знижує розвиток сегрегаційних процесів і дає можливість отримання металу однорідного складу і структури, що є передумовою високого і стабільного рівня властивостей.

#### ВИСНОВКИ:

Більш ніж шістдесятирічний вітчизняний і світовий досвід застосування свідчить, що ЕШП є основним сьогодні і перспективним в майбутньому процесом одержання металу високої якості.

Найбільш розповсюдженим сьогодні є ЕШП з захистом плавильного простору і електроду інертним газом в закритій камері, що особливо актуально при переплаві легованих сталей і сплавів з великим вмістом легкоокислюваних елементів.

Поряд з класичними технологіями ЕШП з витратним електродом з'явилися процеси, що використовують струмопідвідний кристалізатор і працюють з дисперсною шихтою, або попередньо розплавленим металом. Це технології ЕШП за двокомпартній схемою подачі струму (ЕШП ДС), електрошлакові процеси отримання злитків і наплавлення/укрупнення подачею кускових матеріалів і рідкого металу (ЕШП(Н) РМ), перевагами яких є широке варіювання швидкістю подачі металу, менший перегрів металу та пласка ванна, що забезпечує формування з однорідною та бездефектною внутрішньою структурою і гладкою поверхнею.

#### Бібліографічний опис

1. Б.Е. Патон, Б.И. Медовар, В.Е. Патон. Новый способ электрической отливки слитков. *Б.Е. Патон. Избранные труды*. Киев : Наукова думка, 2008. С.610-619. ISBN 978-966-8872-09-9
2. Электрошлаковая сварка и наплавка / под ред. Б. Е. Патона. Москва: Машиностроение, 1980. 511 с.
3. Б.И. Медовар. Сварка жаропрочных и аустенитных сталей и сплавов. Москва: Металлургия, 1966. 430 с.
4. Б.Е. Патон, Б.И. Медовар, Ю.В. Латаш. Электрошлаковый переплав сталей и сплавов в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*. 1958. №11. С.5-15
5. Латаш Ю.В., Медовар Б.И. Электрошлаковый переплав. Москва : Металлургия, 1970. С.240
6. G. Hoyle. *Electroslag processes. Principle and Practice*. Applied Science Publishers LTD : The Universities Press (Belfast), England, 1983. 215p.
7. Дакуорт У.Э., Хойл Дж. Электрошлаковый переплав; пер. с англ. А.Б. Парцевский. Москва : «Металлургия», 1973. 192 с.
8. Медовар Б. И., Цыкуленко Л. К., Шевцов В. Л. Металлургия электрошлакового процесса. Киев : Наук. думка, 1986. 248 с.
9. Электрошлаковый металл / ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. Киев : Наук. думка, 1981. 680 с.
10. B.E. Paton, L.B. Medovar. Improving the electroslag remelting of steel and alloys. *Steel in Translation*. 2008.Vol. 38. P.1028-1032.
11. Medovar L.B. Electroslag technologies and new structural materials. Proc. of Int. Conf. Advances in metallurgical processes and materials, Dnipropetrovsk: Porohy, 2007
12. Lev Medovar. Forewords: some aspects of ESR development. *MMS-100*. Proc. Medovar Memorial Symposium. Kyiv, Ukraine, 7 - 10 June 2016. P. 5-8
13. 60 лет ЭШП на заводе «ДНЕПРОСПЕЦСТАЛЬ» / В. Н. Корниевский и др.; *Современная электрометаллургия*, № 2 (131). 2018. С. 4-12
14. Michael Kubin, Alexander Scheriau, Matthias Knabl, Harald Holzgruber. Production of heavy forging ingots up to 250 tons via the ESR process — operational experiences and process optimization method. *MMS-100*. Proceedings Medovar Memorial Symposium. Kyiv, Ukraine, 7 - 10 June 2016. P. 16-20
15. Liu Zhongli, Liu Xihai, Yang Chuanhao. The application of ESR technology for nuclear power equipments in China. *MMS-100*. Proceedings Medovar Memorial Symposium. Kyiv, Ukraine, 7 - 10 June 2016. P. 28-31

16. Vladimir S. Dub, Leonid Ya. Levkov, Dmitry A. Shurygin. Applications of ESR in modern energy engineering. *MMS-100*. Proceedings Medovar Memorial Symposium. Kyiv, Ukraine, 7 - 10 June 2016. P.. 39-49
17. Electroslag Remelting Process: Part One. URL: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=226> (дата звернення: 10.07.2019)
18. Theoretical Minimum Energies to Produce Steel for Selected Conditions R.J. Fruehan, Otavio Fortini, Otavio Fortini, H.W. Paxton, R. Brindle. Carnegie Mellon University Pittsburgh, PA. DOI: 10.2172/769470 P.25
19. Лісова Л.О., Стовпченко Г.П., Медовар Л.Б., Петренко В.Л. Вплив витрат шлаку при ЕШП на склад металу та технологічні параметри процесу. *Современная электрометаллургия*. 2017. №2. С. 3–10.
20. Ключев М.М., Волков С.В. Электрошлаковый переплав. Москва : Металлургия, 1984. 208 с.
21. Electroslag remelting (2010) A technical information brochure by ALD Vacuum Technologies
22. URL:<https://consarc.com/wp-content/uploads/sites/9/2019/05/ElectroSlag-Remelting-Furnace-guide-en.pdf>. (дата звернення: 10.05.2020)
23. Vacuum melting, remelting and casting – a must for highest end materials. Henrik Franz. [https://cdn.thomasnet.com/kc/1318/doc/0000100332\\_70\\_15851.pdf](https://cdn.thomasnet.com/kc/1318/doc/0000100332_70_15851.pdf)
24. G. Stein, I.Hucklenbroich. Manufacturing and Applications of High Nitrogen Steels. *Materials and Manufacturing Processes*. Vol. 19. №1. 2004. P.7-17. <https://doi.org/10.1081/AMP-120027494>
25. A Carosi, B Kleimt, G Paura, V Diehl, J Schmitz. Mastering P-ESR technology for high nitrogen steel grades for high value applications. (Final report for European Commission, Contact No RFSR-CT-2005–00004, 2010).
26. S. Radwitz, H. Scholz, B. Friedrich. Investigation of Slag Compositions and Pressure Ranges Suitable for Electroslag Remelting under Vacuum Conditions. Proceedings of the 2013 International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting. September 22–25, 2013. Austin, Texas, USA. P. 87-94
27. О новом подходе к конструкции камерных печей ЭШП / Л.Б. Медовар и др. *Современная электрометаллургия*. 2005. № 2. С. 15–17
28. Ryabsev A.D., Troyansky O.A. Chamber Electroslag Remelting (ChESR) – a new method for enhance quality ingot production. Proceedings of The Theird Biennial Academic Conference Baosteel BAC 2008. Shanghai, China. September 2008. P. 39-42
29. W.Holzgruber, "Production of high-quality billets with ESR process", INTECO, Bruck a.d.Mur, 1997
30. Дуговой шлаковый переплав расходуемого электрода / Б.Е. Патон и др.; *Специальная электрометаллургия*. 1975. №28. С.42-48
31. Arc slag remelting of steel and alloys / B. I. Medovar, et al. Cambridge International Science Publishing, 1996. 160 p
32. Roman Ritzenhoff, Lev Medovar, Volodymyr Petrenko, Ganna Stovpchenko. Comparison of ARC Slag Remelting vs. P-ESR Melting for High Nitrogen Steels. Proceedings of the 2013 International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting. September 22–25, 2013 Austin, Texas, USA. P. 159-162
33. К вопросу об электрошлаковой выплавке крупнотоннажных заготовок из высоколегированных сталей и сплавов / Б.И. Медовар и др.; *Специальная электрометаллургия*. 1999. № 2. С.26-30
34. Двухконтурная схема электрошлакового переплава расходуемого электрода / А.К.Цыкуленко и др.; *Специальная электрометаллургия*. 2000. № 3. С.16-20
35. Электрошлаковая наплавка жидким присадочным металлом / Б.И. Медовар и др.; *Проблемы специальной электрометаллургии*. 1995. № 5. С. 7-11.
36. ЭШН РМ – как способ получения тонкой структуры наплавленного слоя из быстрорежущей стали / Б.И. Медовар и др.; *Проблемы специальной электрометаллургии*. 1997. №1. С. 3-4.
37. Медовар Б.И., Медовар Л.Б., Саенко В.Я., Чернец А.В. Электрошлаковый процесс с использованием жидкого присадочного металла – новый путь в развитии электрошлаковой сварочной технологии. *Проблемы специальной электрометаллургии*. 1999. №3. С. 3-8.
38. Установа для електрошлакового наплавлення рідким металом двохслойних валків: пат. 32637 Україна: МКП В 22 D 19/00; № 99116425; заявл. 26.11.1999; опубл. 15.02.2001, Бюл. №1
39. Порционная электрошлаковая отливка слитков / Б.Е. Патон и др. *Специальная металлургия*. 1973. №79. С.24-29
40. Производство высококачественных крупных кузнечных слитков способом порционной электрошлаковой отливки / Латаш Ю.В. и др. *Сталь*. 1975. №11. С.999-1002.
41. Крупные кузнечные слитки порционной электрошлаковой отливки / Ю.В. Латаш и др. *Электрошлаковый переплав*. Киев : Наук. думка, 1987. Вып.9. С.78 – 84.
42. Біктагіров Ф.К. Електрошлакові технології з невитратним графітовим електродом в процесах виплавки та рафінування сталей і сплавів: автореф. дис. Біктагірова Фаріта Каміловича д-ра техн. наук: 05.16.02 / Нац. акад. наук України, Ін-т електросварювання ім. Є. О. Патона. Київ, 2007. 36с
43. Кусков Ю.М. Электрошлаковый процес і технологія наплавлення дискретними матеріалами в струмопідвідному кристалізаторі: автореф. дис. Кускова Юрія Михайловича д-ра техн. наук: 05.03.06 / Нац. акад. наук України, Ін-т електросварювання ім. Є. О. Патона. Київ, 2005. 33 с.
44. Электрошлаковая наплавка / Ю.М.Кусков и др.; Москва : ООО «Наука и технологии», 2001. 180 с
45. Electroslag surfacing by liquid metal – a new way for HSS – Rolls manufacturing / B.I. Medovar et al.; 38th MWSP Conf. Proc. V. XXXIV, Cleveland, Ohio, October 13-16, 1996. P. 83-87
46. Electroslag cladding by liquid filler metal / B.I. Medovar et al. The Europ. Conf. on advance materails and processes "EUROMAT 95", Italy, Sept. 25-28. 1995. P. 165
47. Electroslag processes without consumable electrodes / B.I. Medovar et al. Intern. symp. On liquid metal processing and casting. Santa Fe, New Mexico; USA, Febr. 16-19, 1997



48. B.I. Medovar, L.B. Medovar, V.Ja. Saenko, A.V. Chernets. Electroslag semy-continuous casting – a new way of clean high-speed steel manufacturing. Proc. of 5th Intern. Confer. on Clean Steel, Balatonfured, Hungary. 2-5 June. 1997. Vol.2. P. 188-195
49. Development of New-Generation Electroslag Remelting Technology / Jiang Zhouhua et al. Proceedings INTECO Remelting & Forging Symposium Shanghai 2010. P.169-184
50. Sui Tieliu. General Situation of Overseas Electroslag Remelting and Developing Direction of Electroslag Remelting in China INTECO Remelting & Forging Symposium Shanghai 2010 – Proceedings pp.241-259
51. Electroslag refining with liquid metal for composite rotor manufacturing. L. Medovar et al. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2018. Vol. 91. No 2. P. 49-55. DOI: 10.5604/01.3001.0012.5489
52. Evolution of ESR Technology and Equipment for Long Hollow Ingots Manufacture / L. Medovar et al.; *LMP-2013*. Proceedings of Liquid Metal Processing and Casting Conference. Austin, Texas, September. 2013.. P. <https://doi.org/10.1002/9781118830857.ch21>
53. G. Ksendzyk, I. Frumin, V. Shyrin. U.S. Patent 4 185 682 January (1980)
54. G. Ksendzyk, I. Frumin, V. Shyrin. U.S. Patent 4 305 451 December (1981)
55. Струмopідвідний кристалізатор : пат. 25605 Україна, МКИ В 22 D 19/00. № 98042026; заявл. 22.04.98; опубл. 25.12.98, бюл. № 6
56. Струмopідвідний кристалізатор : пат. 25607 Україна, МКИ В 22 D 19/00. № 98031384; заявл. 19.03.98; опубл. 25.12.98, бюл. № 6
57. <https://profitmark.ua/#word:CSM;country:UA;classes::tm:208395> (дата звернення: 22.05.2020)
58. Исследование влияния параметров двухконтурной схемы ЭШП на размеры и форму металлической ванны / Л.Б. Медовар и др.; *Проблемы специальной электрометаллургии*. 2000. №4. С. 3-7.
59. О формировании поверхности слитков из никелевых суперсплавов при ЭШП в токоподводящем кристаллизаторе / Л.Б. Медовар и др.; *Проблемы специальной электрометаллургии*. 2000. №4. С. 7-14.
60. Медовар Л.Б., Стовпченко А.П., Головачев А.Н., Федоровский Б.Б. ЭШП и современные подходы к управлению затвердеванием крупного кузнечного слитка. *Современная электрометаллургия*. 2013. №3. 12-18
61. Ganna Polishko, Ganna Stovpchenko, Lev Medovar, Lyudmila Kamkina Physicochemical comparison of electroslag remelting with consumable electrode and electroslag refining with liquid metal. *Ironmaking & Steelmaking*. 2019. Vol. 46. No. 8. P. 789–793 <https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1428419>

#### Referens

1. B.E. Paton, B.I. Medovar, V.E. Paton. Novyj sposob elektricheskoy otlivki slitkov. B.E. Pa-ton. Izbrannye trudy. Kiev : Naukova dumka, 2008. S.610-619. ISBN 978-966-8872-09-9
2. Elektroshlakovaya svarka i naplavka / pod red. B. E. Patona. Moskva: Mashinostroenie, 1980. 511 s.
3. B.I. Medovar. Svarka zharoprochnyh i austenitnyh stalej i splavov. Moskva: Metallurgiya, 1966. 430 s.
4. B.E. Paton, B.I. Medovar, Yu.V. Latash. Elektroshlakovyy pereplav stalej i splavov v med-nom vodoohlazhdaemom kristallizatore. Avtomaticheskaya svarka. 1958. №11. S.5-15
5. Latash Yu.V., Medovar B.I. Elektroshlakovyy pereplav. Moskva : Metallurgiya, 1970. S.240
6. G. Hoyle. Electroslag processes. Principle and Practice. Applied Science Publishers LTD : The Uni-versities Press (Belfast), England, 1983. 215r.
7. Dakuort U.E., Hojl Dzh. Elektroshlakovyy pereplav; per. s angl. A.B. Parcevskij. Moskva : «Metallurgiya», 1973. 192 s.
8. Medovar B. I., Cykulenko L. K., Shevcov V. L. Metallurgiya elektroshlakovogo processa. Kiev : Nauk. dumka, 1986. 248 s.
9. Elektroshlakovyy metall / red. B. E. Patona, B. I. Medovara. Kiev : Nauk. dumka, 1981. 680 s.
10. B.E. Paton, L.B. Medovar. Improving the electroslag remelting of steel and alloys. *Steel in Trans-?ation*. 2008.Vol. 38. P.1028-1032.
11. Medovar L.B. Electroslag technologies and new structural materials. Proc. of Int. Conf. Advances in metallurgical processes and materials, Dnipropetrovsk: Porohy, 2007
12. Lev Medovar. Forewords: some aspects of ESR development. MMS-100. Proc. Medovar Memorial Symposium. Kyiv, Ukraine, 7 - 10 June 2016. P. 5-8
13. 60 let EShP na zavode «DNEPROSPECSTAL» / V. N. Kornievskij i dr.; *Covremennaya elekt-rometallurgiya*, № 2 (131). 2018. С. 4-12
14. Michael Kubin, Alexander Scheriau, Matthias Knabl, Harald Holzgruber. Production of heavy forging ingots up to 250 tons via the ESR process — operational experiences and process optimization method. MMS-100. Proceedings Medovar Memorial Symposium. Kyiv, Ukraine, 7 - 10 June 2016. P. 16-20
15. Liu Zhongli, Liu Xihai, Yang Chuanhao. The application of ESR technology for nuclear power equipments in China. MMS-100. Proceedings Medovar Memorial Symposium. Kyiv, Ukraine, 7 - 10 June 2016. P. 28-31
16. Vladimir S. Dub, Leonid Ya. Levkov, Dmitry A. Shurygin. Applications of ESR in modern energy engineering. MMS-100. Proceedings Medovar Memorial Symposium. Kyiv, Ukraine, 7 - 10 June 2016. P.. 39-49
17. Electroslag Remelting Process: Part One. URL: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=226> (data zvernennya: 10.07.2019)
18. Theoretical Minimum Energies to Produce Steel for Selected Conditions R.J. Fruehan, Otavio Fortini, Otavio Fortini, H.W. Paxton, R. Brindle. Carnegie Mellon University Pittsburgh, PA. DOI: 10.2172/769470 P.25
19. Lisova L.O., Stovpchenko G.P., Medovar L.B., Petrenko V.L. Vplyv vitrat shlaku pri EShP na sklad metalu ta tehnologichni parametri procesu. *Sovremennaya elektrometallurgiya*. 2017. №2. S. 3–10.
20. Klyuev M.M., Volkov S.V. Elektroshlakovyy pereplav. Moskva : Metallurgiya, 1984. 208 s.
21. Electroslag remelting (2010) A technical information brochure by ALD Vacuum Technologies

22. URL:<https://consarc.com/wp-content/uploads/sites/9/2019/05/ElectroSlag-Remelting-Furnace-guide-en.pdf>. (data zvernennya: 10.05.2020)
23. Vacuum melting, remelting and casting – a must for highest end materials. Henrik Franz. [https://cdn.thomasnet.com/kc/1318/doc/0000100332\\_70\\_15851.pdf](https://cdn.thomasnet.com/kc/1318/doc/0000100332_70_15851.pdf)
24. G. Stein, I.Hucklenbroich. Manufacturing and Applications of High Nitrogen Steels. Materials and Manufacturing Processes. Vol. 19. №1. 2004. R.7-17. <https://doi.org/10.1081/AMP-120027494>
25. A Carosi, B Kleimt, G Paura, V Diehl, J Schmitz. Mastering P-ESR technology for high nitrogen steel grades for high value applications. (Final report for European Commission, Contact No RFSR-CT-2005–00004, 2010).
26. S. Radwitz, H. Scholz, B. Friedrich. Investigation of Slag Compositions and Pressure Ranges Suitable for Electroslag Remelting under Vacuum Conditions. Proceedings of the 2013 International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting. September 22–25, 2013. Austin, Texas, USA. R. 87-94
27. O novom podhode k konstrukcii kamernih pechej EShP / L.B. Medovar i dr. Sovremennaya elek-trometallurgiya. 2005. № 2. S. 15–17
28. Ryabsev A.D., Troyansky O.A. Chamber Electroslag Remelting (ChESR) – a new method for enhance quality ingot production. Proceedings of The Theird Biennial Academic Conference Baosteel BAC 2008. Shanghai, China. September 2008. P. 39-42
29. W.Holzgruber, "Production of high-quality billets with ESRR process", INTECO, Bruck a.d.Mur, 1997
30. Dugovoj shlakovij pereplav rashoduemogo elektroda / B.E. Paton i dr.; Specialnaya elekt-rometallurgiya. 1975. №28. S.42-48
31. Arc slag remelting of steel and alloys / V. I. Medovar, et al. Cambridge International Science Publishing, 1996. 160 p
32. Roman Ritzenhoff, Lev Medovar, Volodymyr Petrenko, Ganna Stovpchenko. Comparison of ARC Slag Remelting vs. P-ESR Melting for High Nitrogen Steels. Proceedings of the 2013 International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting. September 22–25, 2013 Austin, Texas, USA. R. 159-162
33. K voprosu ob elektroshlakovoj vyplavke krupnotonnazhnyh zagotovok iz vysokolegirovannyh stalej i splavov / B.I. Medovar i dr.; Specialnaya elektrometallurgiya. 1999. № 2. S.26-30
34. Dvuhkonturnaya shema elektroshlakovogo pereplava rashoduemogo elektroda / A.K.Cykulenko i dr.; Specialnaya elektrometallurgiya. 2000. № 3. S.16-20
35. Elektroshlakovaya naplavka zhidkim prisadochnym metallom / B.I. Medovar i dr.; Problemy specialnoj elektrometallurgii. 1995. № 5. S. 7-11.
36. EShN RM – kak sposob polucheniya tonkoj struktury naplavlennogo sloya iz bystrorezhushej stali / B.I. Medovar i dr.; Problemy specialnoj elektrometallurgii. 1997. №1. S. 3-4.
37. Medovar B.I., Medovar L.B., Saenko V.Ya., Chernec A.V. Elektroshlakovij process s ispolzovaniem zhidkogo prisadochnogo metalla – novyj put v razvitii elektroshlakovoj svarochnoj tehnologii. Problemy specialnoj elektrometallurgii. 1999. №3. S. 3-8.
38. Ustanovka dlya elektroshlakovogo naplavlennya ridkim metallom dvuhslajnih valkov: pat. 32637 Ukrayina: MKP V 22 D 19/00; № 99116425; zayavl. 26.11.1999; opubl. 15.02.2001, Byul. № 1
39. Porcionnaya elektroshlakovaya otlivka slitkov / B.E. Paton i dr. Specialnaya metallurgiya. 1973. №79. S.24-29
40. Proizvodstvo vysokokachestvennyh krupnyh kuznechnykh slitkov sposobom porcionnoj elektroshlakovoj otlivki / Latash Yu.V. i dr. Stal. 1975. №11. C.999-1002.
41. Krupnye kuznechnye slitki porcionnoj elektroshlakovoj otlivki / Yu.V. Latash i dr. Elekt-roshlakovij pereplav. Kiev : Nauk. dumka, 1987. Vyp.9. S.78 – 84.
42. Biktagirov F.K. Elektroshlakovi tehnologii z nevitratnim kرافitovim elektrodom v procesah viplavki ta rafinuvannya stalej i splaviv: avtoref. dis. Biktagirova Farita Kamilovicha d-ra tehn. nauk: 05.16.02 / Nac. akad. nauk Ukrayini, In-t elektrozvayuvannya im. Ye. O. Patona. Kiyiv, 2007. 36s
43. Kuskov Yu.M. Elektroshlakovij proces i tehnologiya naplavlennya diskretnimi materialami v strumopidvidnomu kristalizatori: avtoref. dis. Kuskova Yuriya Mihajlovicha d-ra tehn. nauk: 05.03.06 / Nac. akad. nauk Ukrayini, In-t elektrozvayuvannya im. Ye. O. Patona. Kiyiv, 2005. 33 s.
44. Elektroshlakovaya naplavka / Yu.M.Kuskov i dr.; Moskva : OOO «Nauka i tehnologii», 2001. 180 s
45. Electroslag surfacing by liquid metal – a new way for HSS – Rolls manufacturing / B.I. Medovar et al.; 38th MWSP Conf. Proc. V. XXXIV, Cleveland, Ohio, October 13-16, 1996. P. 83-87
46. Electroslag claddingby liquid filler metal / B.I. Medovar et al. The Europ. Conf. on advance materails and processes "EUROMAT 95", Italy, Sept. 25-28. 1995. R. 165
47. Electroslag processes without consumable electrodes / B.I. Medovar et al. Intern. symp. On liquid metal processing and casting. Santa Fe, New Mexico; USA, Febr. 16-19, 1997
48. B.I. Medovar, L.B. Medovar, V.Ja. Saenko, A.V. Chernets. Electroslag semy-continuos casting – a new way of clean high-speed steel manufacturing. Proc. of 5th Intern. Confer. on Clean Steel, Balatonfured, Hungary. 2-5 June. 1997. Vol.2. P. 188-195
49. Development of New-Generation Electroslag Remelting Technology / Jiang Zhouhua et al. Proceedings INTECO Remelting & Forging Symposium Shanghai 2010. P.169-184
50. Sui Tieliu. General Situation of Overseas Electroslag Remelting and Developing Direction of Electroslag Remelting in China INTECO Remelting & Forging Symposium Shanghai 2010 – Proceedings pp.241-259
51. Electroslag refining with liquid metal for composite rotor manufacturing. L. Medovar et al. Archives of Materials Science and Engineering, 2018. Vol. 91. No 2. P. 49-55. DOI: 10.5604/01.3001.0012.5489
52. Evolution of ESR Technology and Equipment for Long Hollow Ingots Manufacture / L. Medovar et al.; LMPC-2013. Proceedings of Liquid Metal Processing and Casting Conference. Austin, Texas, September. 2013.. P. <https://doi.org/10.1002/9781118830857.ch21>
53. G. Ksendzyk, I. Frumin, V. Shyrin. U.S. Patent 4 185 682 January (1980)



54. G. Ksendzyk, I. Frumin, V. Shyrin. U.S. Patent 4 305 451 December (1981)
55. Strumopidvidnij kristalizator : pat. 25605 Ukrayina, MKI B 22 D 19/00. № 98042026; zayavl. 22.04.98; opubl. 25.12.98, byul. № 6
56. Strumopidvidnij kristalizator : pat. 25607 Ukrayina, MKI B 22 D 19/00. № 98031384; zayavl. 19.03.98; opubl. 25.12.98, byul. № 6
57. <https://profitmark.ua/#word:CSM;country:UA;classes:;tm:208395> (data zvernennya: 22.05.2020)
58. Issledovanie vliyaniya parametrov dvuhkonturnoj shemy EShP na razmery i formu metalli-cheskoj vanny / L.B. Medovar i dr.; Problemy specialnoj elektrometallurgii. 2000. №4. S. 3-7.
59. O formirovanii poverhnosti slitkov iz nikel'nykh supersplavov pri EShP v tokopodvodya-shem kristallizatore / L.B. Medovar i dr.; Problemy specialnoj elektrometallurgii. 2000. №4. S. 7-14.
60. Medovar L.B., Stovpchenko A.P., Golovachev A.N., Fedorovskij B.B. EShP i sovremennyye podho-dy k upravleniyu zatverdevaniem krupnogo kuznechnogo slitka. Sovremennaya elektrometal-lurgiya. 2013. №3. 12-18
61. Ganna Polishko, Ganna Stovpchenko, Lev Medovar, Lyudmila Kamkina Physicochemical comparison of electroslag remelting with consumable electrode and electroslag refining with liquid metal. Ironmaking & Steelmaking. 2019. Vol. 46. No. 8. R. 789–793 <https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1428419>

*Стаття поступила 17.12.2019*