

# Целесообразность использования электрошлакового тигельного переплава для изготовления отливок из специальных среднелегированных сталей мелкими сериями

А.Н. Жигалов, В.А. Логвин<sup>а</sup>, А.Д. Мешков, И.О. Сазоненко  
Институт Технологии Металлов Национальной Академии Наук Беларуси  
E-mail: <sup>а</sup>logvinvladim@yandex.ru

**Аннотация.** Обоснована целесообразность использования электрошлакового тигельного переплава для изготовления отливок из среднелегированных сталей мелкими сериями. Апробирована конструкция плавильного узла, учитывающая особенности проведения процесса электрошлакового тигельного переплава. Представлены результаты испытаний работоспособности конструкции привода плавильного узла и технологической оснастки для отливки в металлическую форму двухфазным потоком.

**Ключевые слова:** электрошлаковый тигельный переплав, среднелегированная сталь.

## The Expediency of Using Electroslag Crucible Remelting for the Production of Castings from Special Middle-Alloy Steels in Small Batches

A. Jigalov, V. Logvin<sup>a</sup>, A. Meshkov, I. Sazonenko  
Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus  
E-mail: <sup>a</sup>logvinvladim@yandex.ru

**Annotation.** The expediency of using electroslag crucible remelting for the manufacture of castings from medium-alloy steels in small batches is substantiated. The design of the melting unit has been developed, taking into account the peculiarities of the electroslag crucible remelting process. The results of tests of the operability of the design of the drive of the melting unit and technological equipment for casting into a metal mold with a two-phase laminated flow for the manufacture of castings of a given shape and size are presented.

**Key words:** electroslag crucible remelting, medium alloy steel, kinetics.

### ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения отечественного машиностроения отливками и поковками из среднелегированных сталей и повышения его конкурентоспособности в рамках решения задачи импортозамещения актуальным ставится использование электрошлакового тигельного переплава (ЭШТП) отходов производства и переработки стального лома. Востребованными в настоящее время становятся технологии и оборудование позволяющие реализовывать процессы ЭШТП для малотонажного производства.

ЭШТП относительно новый процесс изготовления отливок особо высокого качества. Отличие данной технологии заключается в электрошлаковом процессе, протекающем в условиях контакта расплава

металла и шлака с огнеупорной футеровкой плавильного оборудования и в совместной заливке в литейную форму жидкого металла со шлаком [1–12].

В ИТМ НАН Беларуси проводятся экспериментальные работы целью которых является обоснование целесообразности использования ЭШТП для изготовления плоских литых заготовок из среднелегированной стали мелкими сериями.

Задачами исследовательской работы являются:

1. Разработка оборудования для реализации процесса ЭШТП, обеспечивающего изготовление плоских литых заготовок из среднелегированной стали требуемой формы и размеров мелкими сериями.

2. Разработка технологической оснастки, обеспечивающей минимальный температурный пере-

грев расплав и заливку двух фазным потоком металлической формы исключая из производственного цикла использование промежуточного ковша.

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭШТП ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК ИЗ СПЕЦИАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ МЕЛКИМИ СЕРИЯМИ**

Особенность ЭШТП состоит:

- в переплаве расходуемого электрода в электрошлаковой печи за счет тепла, выделяющегося в слое жидкого шлака при прохождении через него электрического тока;
- капельном переносе через слой шлака электродного металла;
- рафинировании жидкого металла нагретым до высокой температуры шлаком.

В установках ЭШТП элементом сопротивления является расплав шлака. При прохождении тока через расплав шлака, обладающего большим электрическим сопротивлением, он сильно разогревается и погруженный в него торец металлического электрода нагревается и оплавляється. В результате переплава металл очищается от серы и неметаллических вклю-

чений. Высокая технологическая гибкость процесса ЭШТП, а также хорошее качество переплавляемого металла способствуют его быстрому внедрению в производство. Имеется много разновидностей конструкций печей ЭШТП, большинство из которых работает на переменном токе промышленной частоты [1–12].

Электрошлаковые тигельные технологии производства стали – отличный способ переработки различного металлического лома, включая немерные обрезки, изношенные детали. При этом эффективно решаются задачи ресурсо- и энергосбережения. Технологии легко масштабируются, обеспечивая высокое качество стали, за счёт эффективного раскисления и рафинирования, не требуется послепечная обработка стали чем обеспечивается минимальное время между плавкой и разливкой.

В процессе ЭШТП (рис. 1) и последующей заливки двухфазным потоком металлической формы, на поверхности слитка формируется гарнисаж, который изолирует слиток от кокиля формируя ровную и гладкую поверхность слитка, не требующую дополнительной механической обработки.

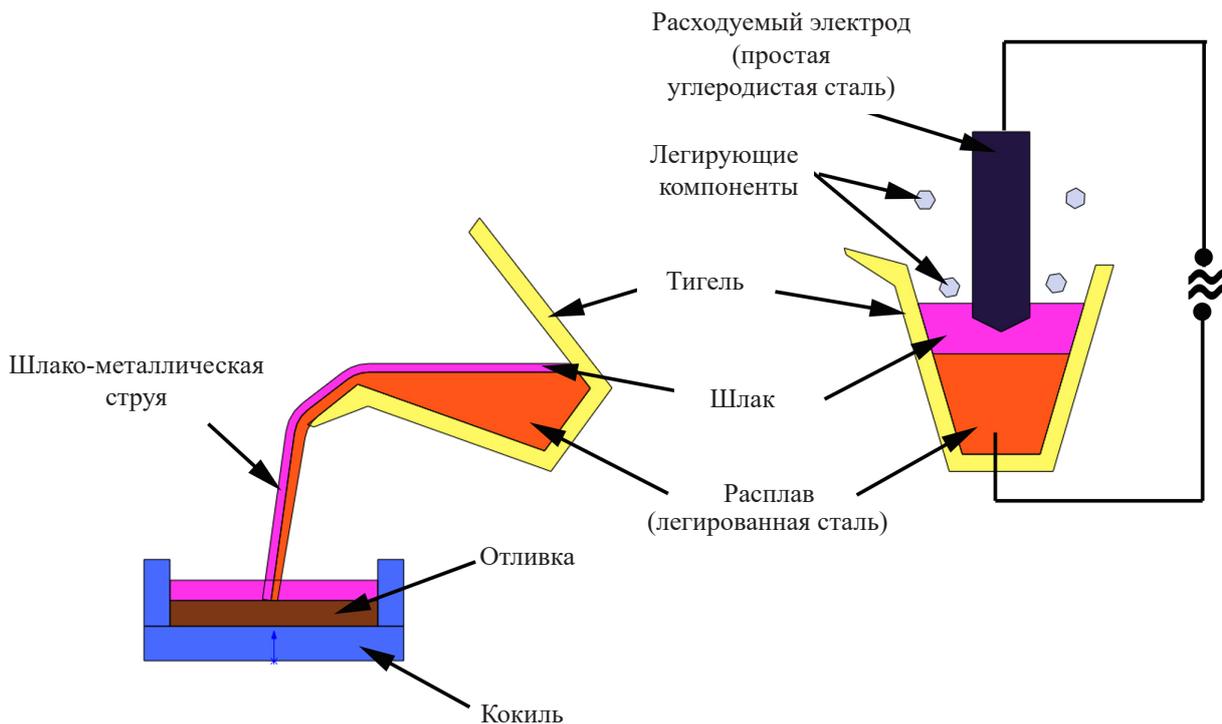


Рисунок 1 – Схема процесса ЭШТП

Использование данной схемы изготовления отливок, допускает минимальный температурный перегрев расплава и обеспечивает защиту металла от атмосферного кислорода в процессе перелива [1–12]. Эффективность ЭШТП зависит от конструкции и технических возможностей плавильного узла.

**КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАВИЛЬНОГО УЗЛА, РЕАЛИЗУЮЩЕГО ПРОЦЕСС ЭШТП ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК МЕЛКИМИ ПАРТИЯМИ**

Для проведения исследовательских работ по получению плоских литых заготовок способом ЭШТП,

разработана конструкция и изготовлен плавильный узел (рис. 2). Конструкция плавильного узла позволяет реализовывать особенности ЭШТП по совмещению в себе функции емкости для накопления жидкого металла и заливочного ковша.

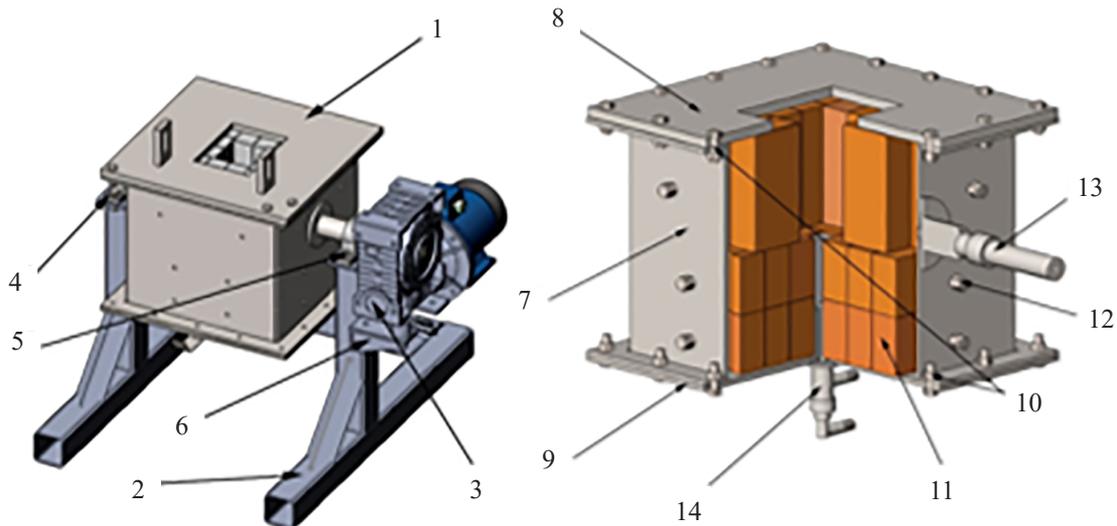


Рисунок 2 – Установка для ЭШТП

Плавильный узел представляет собой металлическую ёмкость 1 футерованную внутри магнезитовым кирпичом и установленную на сварной раме 2 посредством шарнирных опор 4 и 5 (рис. 3).

Мотор-редуктор 3 обеспечивает поворот плавильной ёмкости 1 в прямом и обратном направлении на 180° относительно горизонтальной оси при плавном бесступенчатом регулировании частоты вращения при повороте плавильного узла с технологической оснасткой от 2 до 7 мин<sup>-1</sup> исключая инерционные толчки при переходных процессах пуск-останов. Ограничение угла поворота обеспечивается концевыми выключателями. Компенсация инерционных нагрузок при повороте плавильной ёмкости возникающих при работе мотор редуктора 3, в результате приложения крутящегося момента осуществляется рамой 2 через кронштейн 6 и далее основанием пола. Плавильная ёмкость выполнена в виде сварного корпуса 7 к которому при помощи болтовых соединений 10 крепятся верхняя крышка 8 и нижняя крышка 9. На боковых стенках корпуса используя сварку смонтированы валы 13 при помощи которых осуществляется поворот плавильной ёмкости.

С внутренней стороны корпус, а также верхняя и нижняя крышки обклеены листовым асбестом толщиной 4 мм, образуя сплошной теплоизоляционный слой. Внутренний объем плавильной ёмкости футерован магнезитовым кирпичом 11, таким образом, чтобы образовалась ёмкость необходимого объёма для плавления и накопления расплава металла. Для исключения смещения магнезитовых кирпичей при повороте они фиксируются болтами 12.



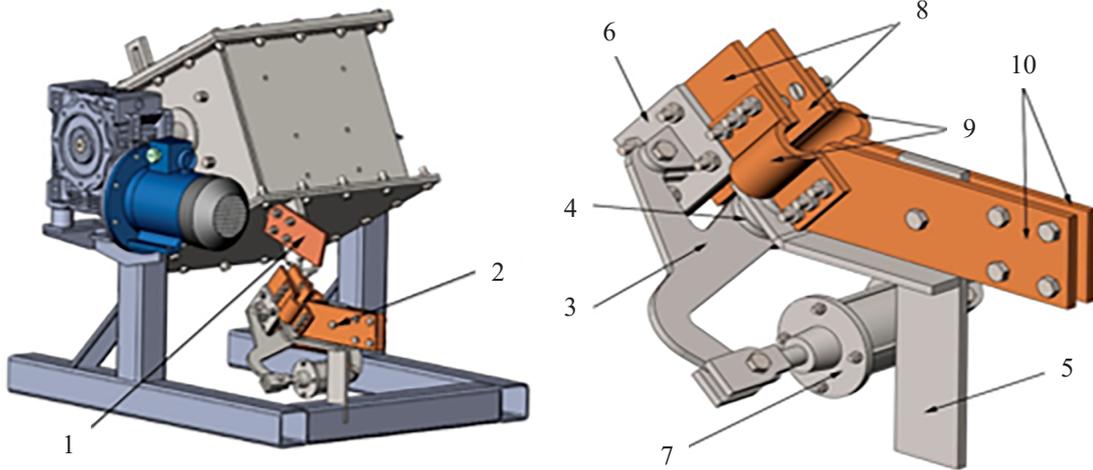
1 – металлическая емкость; 2 – рама; 3 – мотор-редуктор; 4 – шарнирная опора; 5 – шарнирная опора; 6 – кронштейн; 7 – корпус; 8 – верхняя крышка; 9 – нижняя крышка; 10 – болтовое соединение; 11 – магнезитовый кирпич; 12 – болт; 13 – горизонтальный вал; 14 – подовый электрод

Рисунок 3 – Плавильный узел

На нижней крышке 9 крепится водоохлаждаемый подовый электрод 14, который обеспечивает подвод электрического тока к расплаву металла. Конструктивно, водоохлаждаемый подовый электрод 14 выполнен по схеме труба в трубе. Он состоит из квадратного корпуса, с внутренней полостью, профиль которого обеспечивает корректную укладку футеровочного кирпича в подовой части плавильной ёмкости. Вода непосредственно подводится во внутреннюю полость с помощью патрубка и штуцера. Отвод

воды осуществляется по патрубку, находящемуся в нижней части корпуса. Предлагаемая конструкция подового электрода 14 допускает работу плавильного узла с рабочим током до 2500 А.

Подвод напряжения к подовому электроду 14 (рис. 4) осуществляется через медную контактную пластину 1, установленную на днище плавильной ёмкости, которая замыкается посредством подвижного электрического контакта 2 от пневматического привода в виде пневмоцилиндра 7.



1 – контактная пластина; 2 – подвижный электрический контакт; 3 – рычажная система; 4 – изолятор; 5 – основание; 6 – губки; 7 – пневмоцилиндр; 8 – пластина; 9 – гибкий токоподвод; 10 – шины

**Рисунок 4 – Система подвода напряжения к подовому электроду плавильной ёмкости**

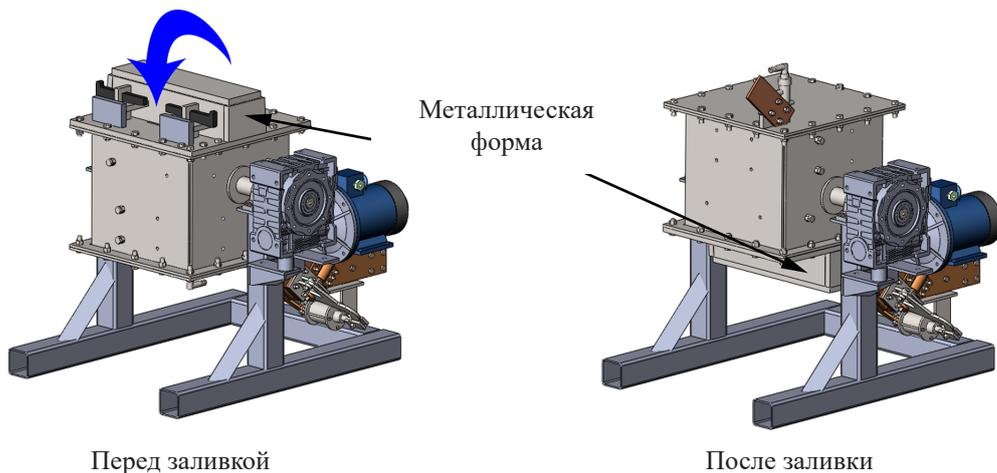
Подвижный разъемный электрический контакт 2 включает рычажную систему 3 и переходной изолятор 4 установленный на основании 5. Замыкание и размыкание электрического контакта обеспечивается пневмоцилиндром 7. При выдвигении штока пневмоцилиндра 7 усилие передается через рычажную систему на губки 6. На губках 6 установлены медные контактные пластины 8, которые непосредственно обеспечивают электрический контакт с медной контактной пластиной 1, установленной на нижней крышке плавильной ёмкости. Медные контактные пластины 8 подключены к контактным шинам 10 посредством гибких медных шин 9, что обеспечивает возможность свободного перемещения их в процессе подключения и отключения плавильной емкости к источнику питания.

Развитие ЭШТП представляется в использовании одновременной заливки в металлическую форму шлака и расплава металла двухфазным потоком. Данная схема обеспечивает заливку жидкого металла в металлическую форму непосредственно из плавильной ёмкости минуя раздаточный ковш. Заполнение формы расплавом металла проходит при плавном повороте плавильной ёмкости с установленной на ней металлической формой на угол 180° вокруг го-

ризонтальной оси (рис. 5). Плавная регулировка частоты вращения призвана обеспечить стабилизацию двухфазного потока при заливке.

Предлагаемый технологический цикл имеет ряд преимуществ перед классической схемой заливки жидкого металла в литейные формы через промежуточный ковш. В первую очередь сокращается путь жидкого металла из плавильной ёмкости до литейной формы. Сокращение времени операции заливки жидкого металла в металлическую форму позволяет работать с минимально возможным его перегревом. При этом сокращается производственный цикл и соответственно себестоимость получаемых отливок. Также обеспечивается минимальный контакт жидкого металла с атмосферой в процессе заливки, что уменьшает вероятность образования неметаллических включений вследствие окисления жидкого металла кислородом воздуха.

В ходе проведения холодного пуска плавильного узла проводилась проверка на соответствие реальных технических параметров, заложенных в конструктивное исполнение. Основной характеристикой, обеспечивающей качественное проведения процесса заливки металлической формы, является плавных старт и останов плавильной ёмкости по завершению пово-



**Рисунок 5 – Расположение металлической формы перед и после заливки**

рота и минимальные колебания частоты вращения от 1 до 3 мин<sup>-1</sup> с нагрузкой на валу вращения до 520 Нм при повороте. Для имитации необходимой инерционной нагрузки, которую должен преодолевать крутящий момент привода, к верхней крышке плавильной ёмкости механически крепился чугунный противовес с габаритными размерами 250x250x500 мм массой 230 кг. Регулировка частоты вращения мотор-редуктора осуществлялась частотным преобразователем с векторным управлением модели CIMR-F7Z47P5. Контроль частоты вращения электродвигателя проводили с помощью тахометра часового типа ТЧ10-Р. Частоту вращения плавильной ёмкости определяли по показаниям частоты вращения электродвигателя с учетом передаточного отношения кинематической цепи.

Установлено, что разработанный и изготовленный плавильный узел, и его привод обеспечивает все прогнозируемые параметры как по объёму плавильной камеры, так и кинематическим характеристикам работы привода поворота. Во всем диапазоне рабочих частот вращения электродвигателя была подтверждена стабильная работа привода поворота, при этом колебательных явлений, замедлений и рывков не наблюдалось.

В ходе горячего испытания была проведена плавка расходуемого электрода из стали 45ХН2МФА массой 25 кг, при электрической мощности, задействованной в процессе ЭШТП на уровне 58 ± 2 кВА. По окончании плавки расходуемого электрода на плавильную ёмкость устанавливали предварительно подогретую до 120 ± 5° С металлическую форму и фиксировали её с помощью металлических клиньев. Заливку металлической формы проводили двухфазным потоком путем поворота плавильной ёмкости на 180° относительно горизонтальной оси. Для затвердевания шлака длительность выдержки формы в нижнем положении составляла 15 минут. После выдержки, установку приводили в исходное положение

и с плавильного узла снимали металлическую форму с отливкой. Лёгкое извлечение отливки из формы обеспечивается благодаря гарнизажу, который покрывает всю поверхность отливки (рис. 6).



**Рисунок 6 – Установка для ЭШТП**

В результате контроля отливки установлено: поверхность по всем граням гладкие; раковин, трещин, окалины не обнаружено; геометрические размеры соответствуют восьмому классу размерной точности по ГОСТ Р 53464-2009.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что использование ЭШТП, совмещенного с заливкой металлической формы двухфазным потоком, является рациональным способом при малотоннажном производстве плоских отливок из среднелегированных сталей мелкими сериями.

Разработанный и апробированный в условиях холодного и горячего пуска плавильный узел, совмещающий в себе функции ёмкости для накопления жидкого металла и заливочного ковша, при реализации процесса ЭШТП показал свою целесообразность для изготовления отливок мелкими сериями.

Предложенная схема одновременной заливки в металлическую форму шлака и расплава металла двухфазным потоком позволяет осуществлять плав-

ку с минимальным температурным перегревом расплава, обеспечивает максимальную защиту расплава металла от воздействия атмосферного кислорода.

Отработанные технологические параметров реализации процесса разлива металла при ЭШТП, а именно минимальные колебания частоты вращения от 1 до 3 мин<sup>-1</sup> с нагрузкой на валу вращения до 520 Нм при повороте, предварительный подогрев до 120 ± 5° С металлической формы и проведение её заливки двухфазным потоком путем поворота плавильной ёмкости на 180° относительно горизонтальной

оси, а также выдержка формы в нижнем положении в течение 15 минут, позволили изготовить отливки с гладкими поверхностями по всем граням, без раковин, трещин и окалины, при этом их геометрические размеры соответствовали восьмому классу размерной точности по ГОСТ Р 53464-2009.

В тоже время, необходимо проведение дополнительных исследований химического состава, микроструктуры, наличия неметаллических включений, физико-механических свойств по всему объёму отливок при ЭШТП.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов, В. А. Спецэлектрометаллургия сталей и сплавов: учебное пособие / В. А. Павлов, Е. Ю. Лозовая, А. А. Бабенко. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 168 с.
2. Производство стальных отливок : учебник для вузов / Л. Я. Козлов, В. М. Колокольцев, К. Н. Вдовин [и др.] / под ред. Л. Я. Козлова. – М. : МИСИС, 2003. – 352 с.
3. Поволоцкий, Д. Я. Электрометаллургия стали и ферросплавов : учебник для вузов / Д. Я. Поволоцкий, М. А. Рощин, М. А. Рысс, А. И. Строганов, М. А. Ярцев. – М.: Metallurgy, 1984. – 568 с.
4. Казачков, Е. А. Электрошлаковый переплав. Раздел курса «Специальные процессы электроплавки» / сост. Е. А. Казачков, А. Д. Чепурной. – Мариуполь : ПГТУ, 1995. – 82 с.
5. Клюев, М. М. Metallurgy электрошлакового переплава / М. М. Клюев, А. Ф. Каблуковский. – М.: Metallurgy, 1969. – 259 с.
6. Клюев, М.М. Электрошлаковый переплав / М.М. Клюев., С.Е. Волков. – М.: Metallurgy, 1984. – 207 с.
7. Клюев, М. М. Плазменно-дуговой переплав / М. М. Клюев. – М. : Metallurgy, 1980. – 256 с.
8. Латаш, Ю. В. Электрошлаковый переплав / Ю. В. Латаш, Б. И. Медовар. – М. : Metallurgy, 1970, – 239 с.
9. Лейбензон, С. А. Производство стали методом электрошлакового переплава / С. А. Лейбензон, А. Ф. Трегубенко. – М. : Metallurgizdat, 1962. – 238 с.
10. Луценко, В. Т. Специальные процессы электроплавки стали: учеб. пособие / В. Т. Луценко, В. А. Павлов, С.П. Бурмасов. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2009. – 67 с.
11. Электрошлаковая тигельная плавка и разлива металла / Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, В. М. Мартын [и др.] / под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. – Киев : Наук. думка. – 1988. – 216 с.
12. Медовар, Б.И. Электрошлаковый переплав / Б. И. Медовар, Ю. В. Латаш [и др.]. – М.: Metallurgy, 1963. – 170 с.

## REFERENCES

1. Pavlov, V. A. Special Electrometallurgy of steels and alloys : a textbook / V. A. Pavlov, E.Yu. Lozova, A. A. Babenko. – Yekaterinburg: Ural Publishing House. un-ta, 2018. – 168 p.
2. Production of steel castings: textbook for universities / L. Ya. Kozlov, V. M. Kolokoltsev, K. N. Vdovin [et al.] / Edited by L. Ya. Kozlov. – M. : MISIS, 2003. – 352 p.
3. Povolotsky, D. Ya. Electrometallurgy of steel and ferroalloys: textbook for universities / D. Ya. Povolotsky, M. A. Roshchin M. A. Ryss, A. I. Stroganov, M. A. Yartsev. – M. : Metallurgy, 1984. – 568 p.
4. Kazachkov, E. A. Electroslag remelting. Section of the course "Special processes of electric melting" / comp. E. A. Kazachkov, A. D. Chepurnoy. – Mariupol : PSTU, 1995. – 82 p.
5. Klyuev, M. M. Metallurgy of electroslag remelting / M. M. Klyuev., A. F. Kablukovsky. – M. : Metallurgy, 1969. – 259 p.
6. Klyuev, M. M. Electroslag remelting / M. M. Klyuev, S. E. Volkov. – M. : Metallurgy, 1984. – 207 p.
7. Klyuev, M. M. Plasma-arc remelting / M. M. Klyuev. – M.: Metallurgy, 1980. – 256 p.
8. Latash, Yu. V. Electroslag remelting / Yu. V. Latam, B. I. Medovar. – M. : Metallurgy, 1970, – 239 p.
9. Leibenzon, S. A. Steel production by electroslag remelting / S. A. Leibenzon, A. F. Tregubenko. – M. : Metallurgizdat, 1962. – 238 p.

10. Lutsenko, V. T. Special processes of electric steel melting: textbook. manual / V. T. Lutsenko, V. A. Pavlov, S. P. Burmasov. – Yekaterinburg: UGTU-UPI, 2009. – 67 p.
11. Electroslag crucible melting and casting of metal / B. I. Medovar, V. L. Shevtsov, V. M. Martin [et al.]; Edited by B. E. Paton, B. I. Medovar. – Kiev: Nauk. dumka, 1988. – 216 p.
12. Medovar, B. I. Electroslag remelting / B. I. Medovar, Yu. V. Latash [et al.]. – M. : Metallurgy, 1963. – 170 p.

#### SPISOK LITERATURY

1. Pavlov, V. A. Specelektrometallurgiya staley i splavov: uchebnoe posobie / V. A. Pavlov, E. Yu. Lozovaya, A. A. Babenko. – Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2018. – 168 s.
2. Proizvodstvo stal'nyh otlivok: uchebnik dlya vuzov / L. Ya. Kozlov, V. M. Kolokol'cev, K. N. Vdovin [i dr.] / pod red. L. Ya. Kozlova. – M. : MISIS, 2003. – 352 s.
3. Povolockij, D. YA. Elektrometallurgiya stali i ferrosplavov : uchebnik dlya vuzov / D. Ya. Povolockij, M. A. Roshchin M. A. Ryss, A. I. Stroganov, M. A. Yarcev. – M. : Metallurgiya, 1984. – 568 s.
4. Kazachkov, E. A. Elektroshlakovyj pereplav. Razdel kursa «Special'nye processy elektroplavki» / sost. E. A. Kazachkov, A. D. СHepurnoj. – Mariupol' : PGTU, 1995. – 82 s.
5. Klyuev, M. M. Metallurgiya elektroshlakovogo pereplava / M. M Klyuev, A. F. Kablukovskij. – M. : Metallurgiya, 1969. – 259 s.
6. Klyuev, M. M. Elektroshlakovyj pereplav / M. M Klyuev., S. E Volkov. – M.: Metallurgiya, 1984. – 207 s.
7. Klyuev, M. M. Plazmenno-dugovoj pereplav / M. M. Klyuev. – M.: Metallurgiya, 1980. – 256 s.
8. Latash, Yu. V. Elektroshlakovyj pereplav / Yu. V. Latam, B. I. Medovar. – M.: Metallurgiya, 1970, – 239 s.
9. Lejbenzon, S A. Proizvodstvo stali metodom elektroshlakovogo pereplava / S. A. Lejbenzon, A. F. Tregubenko. – M. : Metallurgizdat, 1962. – 238 s.
10. Lucenko, V. T. Special'nye processy elektroplavki stali: ucheb. posobie / V. T. Lucenko, V. A. Pavlov, S. P. Burmasov. – Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2009. – 67 s.
11. Elektroshlakovaya tigel'naya plavka i razlivka metalla / B. I. Medovar, V. L. SHevcov, V. M. Martyn [i dr.]; pod red. B. E. Patona, B. I. Medovara. – Kiev: Nauk. dumka, 1988. – 216 s.
12. Medovar, B. I. Elektroshlakovyj pereplav / B. I. Medovar, YU. V. Latash [i dr.]. – M. : Metallurgiya, 1963. – 170 s.

Статья поступила в редакцию 13.03.2024.