

Материаловедение и технология материалов Materials science and materials technology

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 669.187.66.045

doi: 10.30987/2782-5957-2023-3-30-36

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОПЛАВКИ В ДУГОВОЙ ПЕЧИ И В АГРЕГАТЕ КОВШ-ПЕЧЬ (АКП) С НЕПРЕРЫВНОЙ ПОДАЧЕЙ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕТАЛЛИЗОВАННОГО СЫРЬЯ (ЖМС) В СВАРОЧНУЮ ЗОНУ

Денис Александрович Харламов

Губкинский филиал Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, Губкин, Россия
docktn@bk.ru

Аннотация

В статье представлены энерготехнологические показатели и конструкции усовершенствованных электросталеплавильных агрегатов для выплавки стали из металлизированного железорудного сырья (ЖМС). Предложен способ управления ДСП с непрерывной подачей ЖМС, позволяющий оперативно контролировать и регулировать активную мощность печи, тепловые процессы в сварочной ванне зоны электрических дуг, а также в агрегате в

целом. Представлена конструкция ковшевого агрегата для внепечной обработки расплава, позволяющая вести выплавку качественной электростали с одновременной обработкой ее инертными газами. При этом возможно уменьшение угара металла и сокращение длительности плавления ЖМС.

Ключевые слова: печь ванна, железорудное металлизированное сырье (ЖМС), управление, электроды, ковш-печь.

Благодарности: Автор выражает благодарность научному руководителю, проф., д.т.н. Меркеру Э.Э.

Ссылка для цитирования:

Харламов Д.А. Управление процессом электроплавки в дуговой печи и в агрегате ковш-печь (АКП) с непрерывной подачей железорудного металлизированного сырья (ЖМС) в сварочную зону / Д.А. Харламов // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 03. – С. 30 – 36. doi: 10.30987/2782-5957-2023-3-30-36.

Original article

Open Access Article

ELECTROSMELTING CONTROL IN ARC FURNACE AND LADLE FURNACE WITH CONTINUOUS SUPPLY OF IRON RAW MATERIALS INTO THE WELD POOL

Denis Aleksandrovich Kharlamov

Gubkin Branch of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Gubkin, Russia
docktn@bk.ru

Abstract

The paper presents energy and technological indicators and designs of improved electric furnace units for melting steel from iron ore raw materials (IOR). A method of controlling an arc furnace with a continuous IOR supply is proposed, which gives the opportunity to control and regulate the active power of the furnace, thermal processes in the welding bath of the electric arc, as well as in the unit as a whole. The design of a

ladle unit for out-of-furnace melt treatment is presented, which allows the melting of high-quality electrical steel and simultaneous treatment with inert gases. At the same time, it is possible to reduce the metal carbon monoxide and IOR melting time.

Keywords: bath furnace, iron ore raw materials (IOR), control, electrodes, ladle furnace.

Acknowledgement: The author expresses the gratitude to his scientific supervisor Professor Dr. Merker E.E.

Reference for citing:

Kharlamov DA. Electromelting control in arc furnace and ladle furnace unit with continuous supply of iron raw materials into the welding pool. *Transport Engineering*. 2023; 3:30-36. doi: 10.30987/2782-5957-2023-3-30-36.

Введение

Технология плавки стали из ЖМС в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) предусматривает [1, 2] подачу сырья одним потоком через загрузочное окно. При этом сырье, например, окатыши, направляют через свод печи в центр ванны на шлак для последующего их расплавления.

Металлургические процессы, протекающие в сварочной ванне зоны электрических дуг весьма разнообразны, характеризуются локальным наличием высоких температур (3000-6000 К). В этой связи, актуальным является снижение температур в сварочной ванне для предотвращения

испарения железа и других элементов из этих зон, т.к. это приводит к уменьшению выхода годного и требует применения пылеулавливающих аппаратов.

Анализ научно-технической литературы и результаты проведенных исследований [3, 4] показали возможную перспективность применения метода подачи ЖМС через полые электроды (рис. 1) в сварочную ванну зоны электрических дуг сталеплавильных агрегатов [5]. При этом необходимо контролировать некоторые важные параметры по ходу электроплавки.

Результаты

Для управления процессом электроплавки в целом (рис. 1) предложены зависимости содержания углерода в металле, окисленности шлака и скорости нагрева металла.

В результате статистического анализа данных, полученных в 150-т ДСП [1,2], установлена зависимость текущего содержания углерода в металле ($[C]$, %) от времени (τ , мин) и расхода окатышей ($v_{ок}$, кг/с):

$$[C] = 0,4561e^{-0,058\tau}, R^2 = 0,98 \text{ (для } v_{ок} = 40 \text{ кг/с),}$$

$$[C] = 0,4356e^{-0,039\tau}, R^2 = 0,97 \text{ (для } v_{ок} = 30 \text{ кг/с),}$$

$$[C] = 0,4501e^{-0,028\tau}, R^2 = 0,98 \text{ (для } v_{ок} = 20 \text{ кг/с),}$$

откуда следует, что по ходу электроплавки содержание углерода в металле уменьшается с течением времени, с ростом расхода окатышей, что связано с разбавлением

расплава расходом на реакции обезуглероживания.

Зависимости окисленности шлака от времени и расхода окатышей имеют вид:

$$(\Sigma FeO) = 2,0137e^{0,0448\tau}, R^2 = 0,99 \text{ (для } v_{ок} = 40 \text{ кг/с),}$$

$$(\Sigma FeO) = 1,8608e^{0,0321\tau}, R^2 = 0,97 \text{ (для } v_{ок} = 30 \text{ кг/с),}$$

$$(\Sigma FeO) = 1,8525e^{0,0225\tau}, R^2 = 0,98 \text{ (для } v_{ок} = 20 \text{ кг/с).}$$

Окисленность шлака возрастает по ходу электроплавки и с увеличением расхода окатышей, что связано с поступлением оксидов железа из ЖМС.

Скорость нагрева металла при обезуглероживании ($V_{t,c}$, °С/мин) от времени и расхода окатышей имеют вид:

$$V_{t,c} = 1,1603e^{-0,052\tau}, R^2 = 0,99 \text{ (для } v_{ок} = 40 \text{ кг/с),}$$

$$V_{t,c} = 0,8098e^{-0,035\tau}, R^2 = 0,99 \text{ (для } v_{ок} = 30 \text{ кг/с),}$$

$$V_{t,c} = 0,5847e^{-0,026\tau}, R^2 = 0,99 \text{ (для } v_{ок} = 20 \text{ кг/с).}$$

Величина $V_{t,c}$ уменьшается по ходу плавки, в начальный период имеет большие значения при более высоких значениях $v_{ок}$, что связано с интенсивным выделением тепла от реакции обезуглероживания, однако, примерно после 40 мин находится на одинаковом уровне.

В этом случае регулирование электрического режима работы печи осуществляют на основе таких исходных данных как текущая температур металла (t_m , °С) и скорость загрузки ЖМС ($G_{ок}$, т/ч) в печь, с соблюдением условия

$$\frac{Q_B}{\Delta H \cdot G_{ок}} > 1,2 \quad (1)$$

При плавании ЖМС в ванне ДСП важнейшую роль играет энерготехнологический режим и способ управления ходом плавки [5].

где ΔH – изменение энтальпии расплава, кВт·ч/т; Q_B – теплосодержание расплава, кВт, определяемое следующим образом:

$$Q_B = \Sigma Q_{эл}^д - (Q_{изл}^ф + Q_{изл}^{шл}), \quad (2)$$

где $\Sigma Q_{эл}^д$ – тепловая мощность излучения дуг, кВт; $Q_{изл}^ф$ – тепловая мощность излучения дуг на внутренние элементы печи, кВт; $Q_{изл}^{шл}$ – мощность тепловых потерь излучением в рабочее пространство ДСП от поверхности шлака, кВт.

Тогда, на основе этих данных находим текущее значение t_m :

$$t_m = \frac{Q_B}{M_B \cdot c_B} \quad (3)$$

где M_B – текущее значение массы металла по ходу электроплавки, т, определяемое:

$$M_B = M_0 + (G_{ок} \cdot \tau),$$

где M_0 – начальная масса металла в ДСП, т; τ – текущее время плавки, час; c_B – теплоемкость металла в ванне печи, Дж/(кг·К).

Общий вид системы [5] непрерывной подачи ЖМС в ванну печи с новизной элементов имеет вид (рис. 1). Система [2,6] с управляющей ЭВМ выполнена с возможностью определения текущего или периодического расхода ЖМС или брикетов:

$$G_{ок}(i, k, j) = v_{ок} \cdot \tau_{пл}(i, k, j), \quad (4)$$

расчетный расход окатышей

$$v_{ок} = (Q_B / (c_B V_t) - M_0) / \tau, \quad (5)$$

где V_t – скорость нагрева металла, °С/с; $\tau_{пл}(i, k, j)$ – время плавления данной порции ЖМС, с.

Система управления электроплавкой (рис. 1) включает контроль массы загружаемого ЖМС и шлакообразующих материалов, активной мощности, силы тока и напряжения, температуры расплава с помощью ЭВМ. При этом ведется расчет по формулам (1-5).

Принцип рассредоточенной подачи ЖМС в ванну печи можно осуществлять (рис. 2) в агрегате ковш-печь (АКП), а после плавки стали осуществлять продувку ее такими газами как азот или аргон в трех зонах расплава.

В таком случае в АКП возможна электроплавка стали из ЖМС, а затем (рис. 2) внепечная обработка расплава [6] перед разливкой на МНЛЗ.

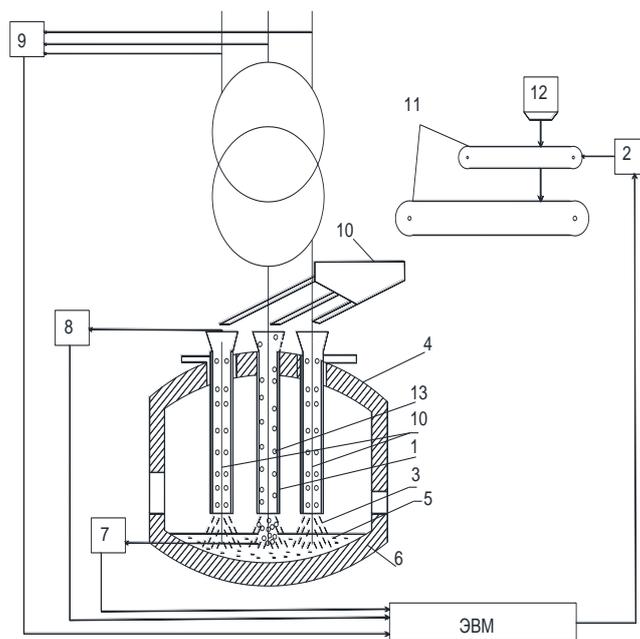


Рис. 1. Схема контроля плавки в ДСП с загрузкой ЖМС: 1 – полые электроды, 2 – исполнительный механизм, 3 – электрические дуги, 4 – свод печи, 5 – расплав, 6 – ДСП, 7 – измерение температуры расплава, 8 – система контроля расхода ЖМС, 9 – приборы контроля электрических параметров плавки, 10 – изолированное устройство подачи окатышей, 11 – конвейерная система, 12 – подача окатышей, 13 – поток ЖМС
 Fig. 1. Control scheme of melting in EAF with metallized iron ore raw materials loading:
 1 – hollow electrodes, 2 – actuator, 3 – electric arcs, 4 – furnace arch, 5 – melt, 6 – EAF, 7 – melt temperature measurement, 8 – flow control system of metallized iron ore raw materials, 9 – devices for monitoring electrical parameters of melting, 10 – isolated pellet feeding device, 11 – conveyor system, 12 – pellet feeding, 13 – flow of metallized iron ore raw materials

Использование усовершенствованной конструкции электросталеплавильного агрегата ковш-печь (ЭСА-КП) для выплавки стали из ЖМС с последующей внепечной обработкой [7] позволяет также проводить дожигание отходящих газов кислородом и увеличить приходную часть теплового баланса агрегата на 12 %, что приведет к соответствующему сокращению электроэнергии на процесс [3].

Для совершенствования режимов внепечной обработки расплава разработали блок-схему алгоритма управления продувкой

аргоном (рис. 3). Алгоритм функционирует следующим образом. После установки ковша в рабочее положение вводятся исходные данные – толщина шлака ($H_{шл}$, см), количество наливов в ковш (N), масса металла (M_b , т), начальная его температура и длительность обработки (T_0 , $\tau_{обр}$), с учетом передачи ковша на МНЛЗ. По ходу обработки контролируется также величина флуктуаций фазовых токов (ΔI , кА) и скорость охлаждения металла в ковше ($V_{охл}$, °С/мин).

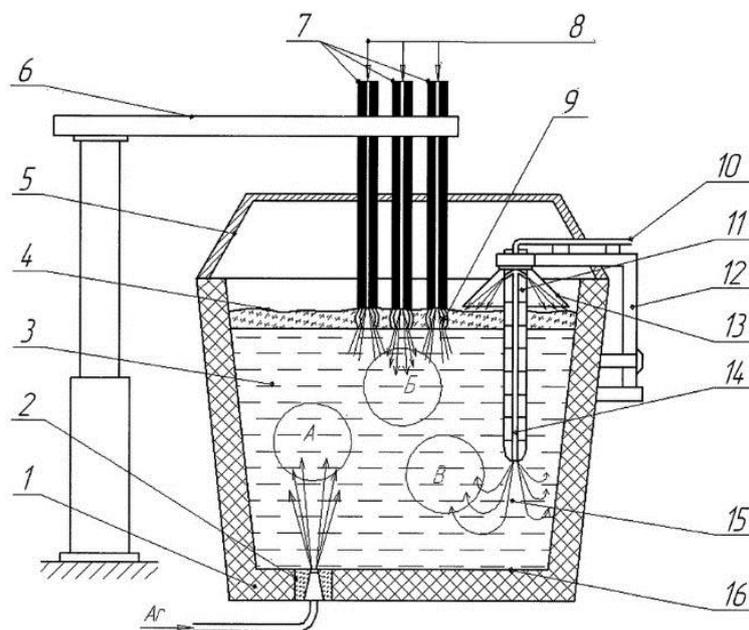


Рис. 2. Конструкция ковшевого агрегата при внепечной обработке расплава комбинированным методом с применением полых электродов:

- 1- ковш, 2-пористая огнеупорная пробка для продувки аргоном,
- 3 – металлический расплав, 4 – шлак, 5 – водоохлаждаемый свод,
- 6 – токопровод и электрододержатель, 7- полые электроды,
- 8 – система подачи инертных газов и сыпучих материалов,
- 9 - электрические дуги, 10 – система подача инертного газа,
- 11 - футерованная фурма, 12 – механизм держателя фурмы,
- 13 - защитный металлический конус, 14 - труба, 15 – перемешивание расплава, 16 -футеровка; зоны (А, Б, В) наилучшего перемешивания расплава при подаче инертных газов

Fig. 2. The design of the ladle unit during the secondary treatment of the melt by a combined method using hollow electrodes:

- 1 - ladle, 2 - porous refractory plug for argon purging, 3 – metal melt,
- 4 – slag, 5 – water-cooled vault, 6 - current line and electrode holder, 7- hollow electrodes, 8 - inert gases and bulk materials supply system, 9 – electric arcs, 10 - inert gas supply system, 11 - lined tuyere, 12 – tuyere holder mechanism, 13 - protective metal cone, 14 - pipe,
- 15 – melt mixing, 16 -lining; zones (A, B, B) of the best mixing of the melt when inert gases are supplied

После этого, в зависимости от периода внепечной обработки, рассчитывается

расход аргона ($Q_{ар}$, м³/час), исходя из целей и задач, решаемых в данном периоде. При

этом выбирается наименьшее значение расхода из рассчитанных по представленным выражениям.

Энерготехнологические показатели обработки стали по существующему и предлагаемому режимам представлены в таблице

Таблица

Усредненные данные продувки расплава аргоном

Table

Averaged data of argon melt purging

Показатель	Существующий режим	Предлагаемый режим
Расход аргона, м ³ /т	11	8
Расход электроэнергии, кВт·ч/т	38,6	37,7
Количество плавов	32	32

Анализ таблице показывает, что по сравнению с существующим режимом продувки предотвращается оголение поверхности зеркала металла и уменьшается расход аргона (по данным более 30 плавов)

примерно на 2-5 м³/ч или 0,05 м³/т стали, а также снижается расход электроэнергии на 2,5% за счет уменьшения уровня флуктуаций фазовых токов и увеличения вводимой активной мощности.

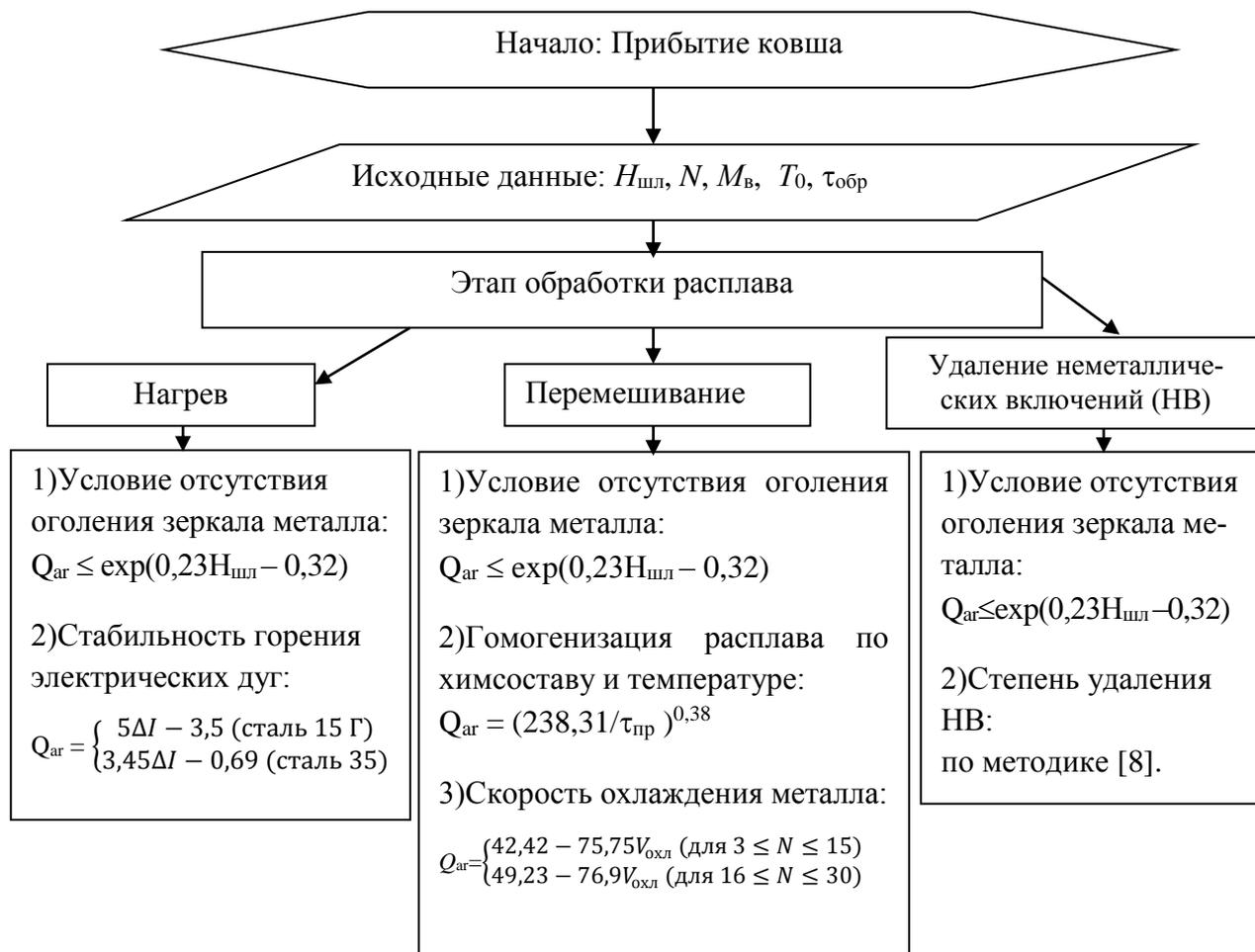


Рис. 3. Блок-схема управления режимом продувки расплава аргоном в АКП

Fig. 3. Flowchart for controlling the argon melt purge mode in the LF

Применение аргона для перемешивания расплава по ходу обработки будет способствовать увеличению температуры дуг в сварочной ванне, т.к. потенциал ионизации аргона (U_{Ar}) составляет 15,75 В, что в несколько раз выше, чем потенциалы ионизации кальция ($U_{Ca} = 6,1$ В) и железа ($U_{Fe} = 7,87$ В). Это позволяет увеличить

Заключение

В результате опытов установлено, что использование предлагаемой системы непрерывной загрузки через полые электроды способствует уменьшению угара металла в высокотемпературной сварочной ванне зоны электрических дуг и ускоре-

расход ЖМС в сварочную ванну зоны электрических дуг с целью уменьшения испарения железа и повысить производительность ЭСА-КП.

Эффективность подачи ЖМС через полые электроды при электроплавке в дуговой печи исследовали в лабораторных условиях [9].

нию процесса плавления ЖМС на 10%. Управление процессами электроплавки и внепечной обработки позволяет также уменьшить расход электроэнергии и материальных ресурсов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эффективность получения и электроплавка железорудного металлургического сырья в агрегатах бездоменной металлургии: монография / Л.Н. Крахт, Э.Э. Меркер, В.М. Рассолов, Королькова Л.Н., А.А. Кожухов, Д.А. Харламов. - Ст. Оскол: «ТНТ», 2017. - 448 с.
2. Меркер, Э.Э., Харламов, Д.А. Энергосбережение при электроплавке стали в дуговых печах. Старый Оскол: ТНТ, 2013. - 308 с.
3. Меркер, Э. Э., Харламов, Д. А., Крахт, Л. Н. Об эффективности применения совмещенных процессов дуговой плавки и внепечной обработки стали в электросталеплавильных агрегатах ковш-печь с использованием локально распределенной системы дожигания горючих газов // ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ. Бюллетень научнотехнической и экономической информации Том 76, № 9 (2020) С. 920-925.
4. Merker, E. E., Sazonov, A. V., Stepanov, V. A., Krakht, L. N., Kharlamov, D. A. Melting of Pellets during Arc Heating with an Analysis of the Metal Loss in the Subelectrode Space in a Steelmaking Bath. Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2016, No. 12, pp. 1129-1134.

5. Патент - 2567424 С1 РФ, МПК С21С 5/52. Способ плавки стали из железорудных металлургических окатышей в дуговой сталеплавильной печи / Меркер Э.Э. и др.; ФГАОУ ВПО НИТУ МИСиС; опубл. 27.05.2013.
6. Патент - 2532243 С1 РФ, МПК С21С 7/00 Агрегат комплексной обработки жидкой стали (АКОС) / Меркер Э.Э., Карпенко Г.А., Черменев Е.А.; ФГАОУ ВПО НИТУ МИСиС. - № 2013111288/02; заяв. 2013.03.14; опубл. 27.10.2014, Бюл. № 30.
7. Патент - 2645858 С21С 7/00. Электросталеплавильный агрегат ковш-печь (ЭСА-КП) / Меркер Э.Э., Харламов Д.А. и др.; ФГАОУ ВПО НИТУ МИСиС; - № 2016119779, заяв. 2016.05.23; опубл. 2017.11.28, Бюл. №34.
8. Меркер Э.Э., Харламов Д.А., Кочетов А.И. Энергосберегающая технология внепечной обработки стали в агрегате ковш-печь. Ст. Оскол: «ТНТ», 2007. - 224 с.
9. Меркер Э.Э., Черменев Е.А., Сазонов А.В. Исследование эффективности электроплавки металлургических окатышей при их непрерывной подаче в ванну дуговой печи // Известия Вузов. Черная металлургия. - 2012. - №5. - С. 14-17.

REFERENCES

1. Krakht LN, Merker EE, Rassolov VM, Korolkova LN, Kozhukhov AA, Kharlamov DA. The efficiency of obtaining and electric melting of iron ore raw materials in direct ore-reduction metallurgy units: monograph. St. Oskol: TNT; 2017.
2. Merker EE, Kharlamov DA. Energy saving during electric steel melting in arc furnaces. Stary Oskol: TNT; 2013.
3. Merker EE, Kharlamov DA, Krakht LN. About efficiency of application combined processes of arc melting and ladle treatment of steel in an electric steelmaking aggregate ladle-furnace with use of lo-

cally distributed system of combustible gases afterburning. FERROUS METALLURGY. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information. 2020;76(9):920-925.

4. Merker EE, Sazonov AV, Stepanov VA, Krakht LN, Kharlamov DA. Melting of pellets during arc heating with an analysis of the metal loss in the subelectrode space in a steelmaking bath. Russian Metallurgy (Metallically). 2016;12:1129-1134.
5. Merker EE. Patent - 2567424 C1 РФ, МПК С21С 5/52. Method of melting steel from iron ore metallized pellets in an arc steelmaking furnace. The Na-

- tional University of Science and Technology MISIS. 2013 May 27.
6. Merker EE, Karpenko GA, Chermenev EA. Patent - 2532243 C1 РФ, МПК C21C 7/00 Liquid steel complex processing unit (AKOS The National University of Science and Technology MISIS. No. 2013111288/02. 2014 Oct 27.
 7. Merker EE, Kharlamov DA. Patent – 2645858 C21C 7/00. Electric steelmaking unit ladle furnace (ЭСА-КП). The National University of Science

and Technology MISIS. No. 2016119779. 2017 Nov 28.

8. Merker EE, Kharlamov DA, Kochetov AI. Energy-saving technology of out-of-furnace steel processing in the bucket-furnace unit. St. Oskol: TNT; 2007.
9. Merker E.E., Chermenev E.A., Sazonov A.V. Prereduced pellets electric melting efficiency study at their continuous handling into arc furnace bath. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2012;5:14-17.

Информация об авторе:

Харламов Денис Александрович – доцент, кандидат технических наук, тел. 89102285071, 309516 Россия, Белгородская обл. г. Старый Оскол, м-н Северный 34, 137.

Kharlamov Denis Aleksandrovich – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences; phone: 89102285071, 309516 Russia, Belgorod region, Stary Oskol, m-on Severny micro district 34, 137.

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 01.12.2022; одобрена после рецензирования 19.01.2023; принята к публикации 27.02.2023. Рецензент – Макаренко К.В., доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 01.12.2022; approved after review on 19.01.2023; accepted for publication on 27.03.2023. The reviewer is Makarenko K.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Material Science at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.