

УДК 669.04: 669.054.8

*к.т.н. Куберский С. В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)*

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МЕТОДА ДУГОВОГО ГЛУБИННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ РАСПЛАВА ДВУМЯ РУДНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫМИ БЛОКАМИ

Впервые исследованы параметры метода дугового глубинного восстановления элементов при одновременной обработке железоуглеродистого расплава двумя рудно-восстановительными блоками. Показано, что в случае использования двух блоков повышается степень и скорость извлечения полезных элементов, а также скорость нагрева расплава заглубленным в его объем дуговым разрядом, что наряду со снижением расхода электроэнергии способствует значительному снижению себестоимости обработки в сравнении с базовыми технологиями.

Ключевые слова: *железоуглеродистый расплав, дуговое глубинное восстановление, рудно-восстановительный блок, эффективность, раскисление, легирование, нагрев, себестоимость.*

В настоящее время созданы теоретические основы и разработана технология дугового глубинного восстановления (ДГВ) элементов в железоуглеродистые расплавы для их рафинирования, раскисления, легирования, гомогенизации и нагрева [1, 2]. Данный метод был успешно реализован для десульфурации чугуна магнием и кальцием, восстанавливаемыми непосредственно в жидкий металл из их оксидов, входящих в состав различных отходов производства, вторичных материалов и недефицитного сырья (магнезит, бой магнезитовых огнеупоров, доломит, известь, известняк и др.). Кроме того, на нескольких машиностроительных и литейных предприятиях для раскисления и легирования железоуглеродистых расплавов опробована технология ДГВ Mn и Si из шлака от производства силикомарганца (MnС), которая показала свою достаточно высокую эффективность в сравнении с традиционной технологией, предусматривающей использование для этих целей дорогостоящих ферросплавов и лигатур. Одним из основных преимуществ метода ДГВ является ресурсосбережение вследствие использования в качестве шихты бедных руд, шлаков, шламов, отходов и вторичных материалов для замены дорогостоящего первичного рудного сырья. Кроме того, более низкая себестоимость такого

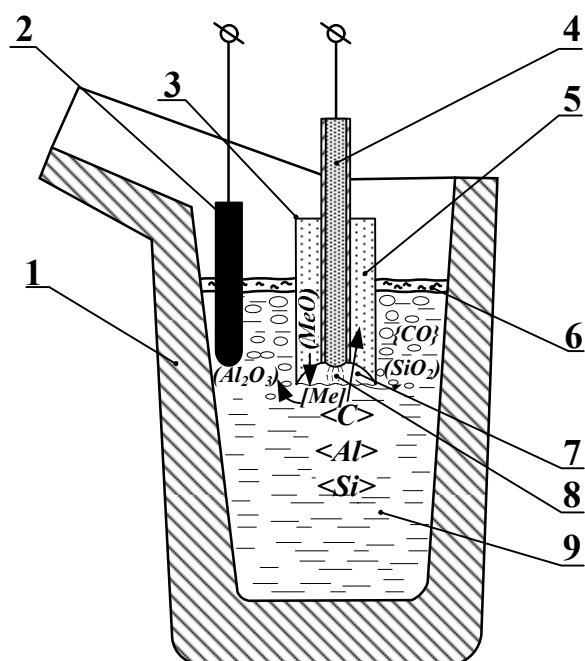
вида обработки позволяет получить значительный экономический эффект [3–5].

Принципиальная схема реализованных в настоящее время технологий обработки расплавов по методу ДГВ, в индукционной сталеплавильной тигельной печи (ИСТ), представлена на рисунке 1 и предусматривает использование одного рудно-восстановительного блока (РВБ), а для зажигания дуги в расплав дополнительно вводится графитовый контактный элемент в виде цилиндрического стержня или параллелепипеда.

Наиболее важными технологическими параметрами метода ДГВ являются степень и скорость извлечения элементов, расход электроэнергии как основной затратной статьи в себестоимости процесса, скорость и эффективность нагрева расплава заглубленной дугой, себестоимость обработки и др.

Одним из недостатков, выявленных при реализации метода, является невысокая скорость восстановления элементов, что в первую очередь обусловлено относительной бедностью по их содержанию использованных отходов. При переработке шлака от производства MnС, содержащего 8–30 % MnO, этот показатель находился в среднем на уровне 0,01 %/мин для каждого из извлекаемых элементов. Поэтому за 10–30 мин внепечной обработки расплав дополнитель-

но насыщался Mn и Si на величину 0,1–0,3 %. Такого содержания отмеченных элементов в стали вполне достаточно для ее раскисления, а для обеспечения более высоких концентраций Mn и Si в металле необходимо усовершенствование технологии с целью увеличения скорости извлечения полезных элементов в расплав, что и явилось основной задачей исследований.



- 1 — тигель ИСТ; 2 — графитовый контактный электрод; 3 — рудно-восстановительный блок;
4 — комбинированный токоподводящий электрод;
5 — рудно-восстановительная смесь; 6 — шлак;
7 — пусковая полость; 8 — электрическая дуга;
9 — обрабатываемый расплав

Рисунок 1 Схема обработки расплавов по методу ДГВ в ИСТ

Анализ используемой технологической схемы показал, что эффективным решением отмеченного недостатка может быть замена применяемого для образования дуги графитового контактного элемента на второй РВБ. В случае использования технологии ДГВ на предприятиях, имеющих в составе технологического оборудования дуговые печи, для обработки может использоваться их система электродержателей, в которую вместо графитовых электродов

устанавливается три РВБ для обработки расплава с целью его раскисления, легирования, рафинирования, нагрева и перемешивания.

Для подтверждения выдвинутой гипотезы в лабораторных условиях была проведена серия экспериментов по одновременной обработке железоуглеродистого расплава в ИСТ методом ДГВ двумя РВБ (рис. 2).



- 1 — ИСТ; 2 — устройства для погружения РВБ в расплав; 3 — РВБ; 4 — отходящие в процессе обработки газы

Рисунок 2 РВБ в резервной позиции (а, б) и обработка расплава двумя РВБ в ИСТ (в, г)

Базовым компонентом рудно-восстановительной смеси (РВС) в использованных РВБ был шлак от производства MnC. Состав РВС, конструкция и состав комбинированных электродов (КЭ) и самого РВБ, а также основные температурные и энергетические параметры обработки были выбраны на основании оптимальных значений технологических и конструктивных параметров метода ДГВ, установленных в ходе предыдущих исследований [1, 2, 6–8] и рекомендованных для обеспечения максимальной степени и эффективности извлечения Mn. Кремний в технологии переработки шлака от производства MnC мето-

дом ДГВ является побочным продуктом, и создание условий для его эффективного извлечения не входило в перечень решаемых задач. Тем не менее было отмечено, что эффективность нового метода существенно возрастает при увеличении степени извлечения Si, так как создаются условия для сокращения расхода дорогостоящих кремниевых ферросплавов.

Для сравнительного анализа ТЭП обработки расплава по методу ДГВ с использованием различного количества РВБ было проведено 4 опытных плавки, на которых для насыщения металла Mn и Si в него одновременно погружалось два РВБ. При проведении экспериментов температура расплава перед обработкой была больше 1500°C (1524–1645°C), диаметр РВБ составлял 55 мм, отношение площади поперечного сечения РВБ к площади поперечного сечения КЭ 9,4, сила переменного тока 250 А, удельная мощность, подводимая в зону горения электрической дуги, 4,1–5,7 Вт/мм² площади поперечного сечения РВБ (39–53 Вт/мм² площади поперечного сечения КЭ), основность РВС 1,4, содержание магнезита в электродной смеси 12,5 %, скорость расходования РВБ 0,37–0,50 мм/с.

Практически все рекомендованные в работах [1, 2, 6–8] параметры были выдержаны, за исключением скорости расходования РВБ и величины удельной мощности, подводимой в зону горения электрической дуги (Вт/мм² площади поперечного сечения КЭ), значения которых имели незначительные отклонения.

Полученная на плавке № 4 скорость расходования РВБ 0,37 мм/с обусловлена более плотной формовкой блока, а на плавке № 3 — 0,50 мм/с — более высокой начальной температурой обработки расплава (1645°C). Однако отклонение этого параметра не оказало существенного влияния на экономическую эффективность процесса, и снижение суммарных затрат на этих плавках в сравнении с обработкой ферросплавами (ФС) составило 45,2 % и 65,54 % соответственно.

Рекомендуемая в выше отмеченных работах удельная мощность, подводимая в зону горения электрической дуги, составляет 40–45 Вт/мм² площади поперечного сечения КЭ. Однако в соответствии с установленной в работах [1, 2] зависимостью влияния подводимой мощности на размеры откалывающихся фрагментов ЭС повышение мощности способствует уменьшению их размеров, что является позитивным фактором для исследуемой технологии. Уменьшение размеров откалывающихся фрагментов электродной смеси будет способствовать стабилизации режима горения электрической дуги, обеспечивая меньшие колебания ее длины и более плавный переход дугового разряда на стальную трубку, что немаловажно для организации автоматизированного управления процессом. Кроме того, большая мощность на дуге способствует увеличению степени извлечения элементов (рис. 3), и на рассматриваемой плавке эта величина составила 95 % и 13 % для Mn и Si соответственно, что в конечном итоге компенсировало повышенный расход электроэнергии в калькуляции себестоимости обработки и позволило получить снижение суммарных затрат в сравнении с обработкой ФС на 32,3 %.

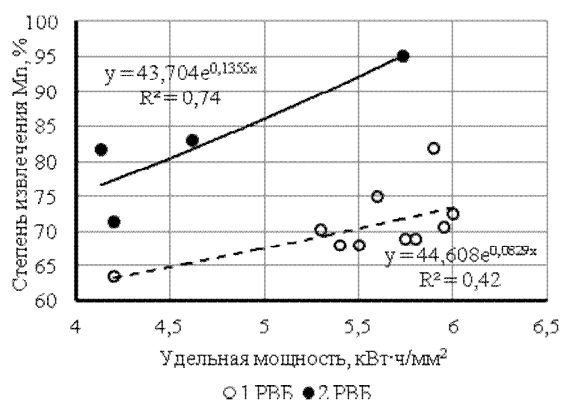


Рисунок 3 Зависимости степени извлечения Mn от удельной мощности на дуге при обработке одним и двумя РВБ

Результаты рисунка 3 свидетельствуют о том, что повышение мощности на дуге оказывает положительное влияние на степень извлечения Mn как при обработке одним РВБ, так и двумя.

Более высокие значения степени извлечения Mn при обработке двумя РВБ можно объяснить улучшением тепло- и массообмена в результате увеличения интенсивности перемешивания и объемов расплава вовлеченных в него за счет газообразных продуктов реакций, выделяющихся в ходе реализации метода ДГВ с реакционных поверхностей двух РВБ, и, соответственно, обеспечения более благоприятных кинетических условий для протекания восстановительных процессов.

Этим же можно объяснить и более высокие значения степени извлечения Mn, максимальное значение которой при обработке одним блоком составило 82 %, тогда как при использовании двух блоков эта величина находилась в пределах 71,4–95 % при среднем значении 82,8 % (рис. 4).

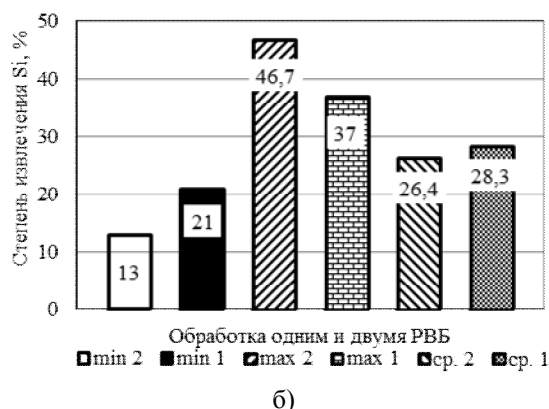
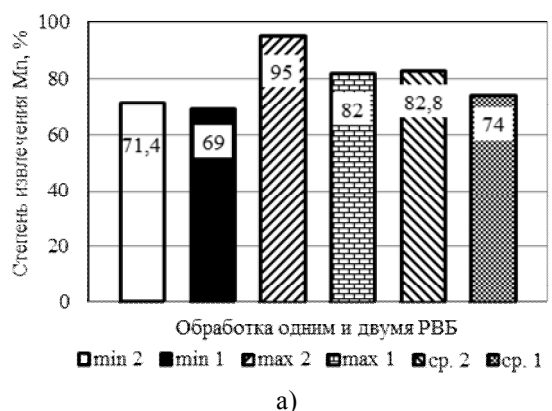


Рисунок 4 Пределы и средние значения степени извлечения Mn (а) и Si (б) при обработке одним и двумя РВБ

Как было отмечено выше, для эффективного извлечения Mn температура расплава перед обработкой должна быть не ниже температуры восстановления его из силиката с учетом протекания процесса в объеме обрабатываемого расплава. Повышение температуры увеличивает степень извлечения, однако требует больших энергетических затрат. Тем не менее для увеличения степени извлечения Si этот параметр может быть одним из основных управляющих факторов.

Так, при начальной температуре расплава 1645°C, очень близкой к температуре восстановления Si в условиях заглубленного в объем металла дугового разряда (1653°C), отмечена высокая степень его извлечения из РВС (46,7 %) со скоростью 0,04 %/мин (рис. 5), а степень извлечения Mn для этих условий составила 83 %. При этом удельный расход электроэнергии на процесс составил 0,496 кВт·ч/моль, что практически в 3 раза меньше среднего значения этой величины, характерного для обработки одним РВБ, которое составляет 1,419 кВт·ч/моль, и в 2,5 раза меньше удельного расхода электроэнергии, характерного для обработки двумя РВБ при начальной температуре обрабатываемого расплава в пределах 1524–1562°C, средняя величина которого имеет значение 1,245 кВт·ч/моль (рис. 6).

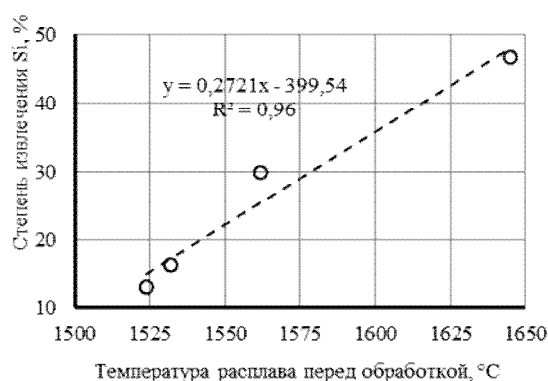


Рисунок 5 Влияние температуры расплава перед обработкой на степень извлечения Si

На основании вышеизложенного можно утверждать, что расплавы, в которых необходимо иметь большее содержание Mn, нужно обрабатывать при меньшей начальной их температуре и, наоборот, в случае необходимости обеспечения высокого содержания Si в металле начальная температура расплава должна быть не менее 1650°C.

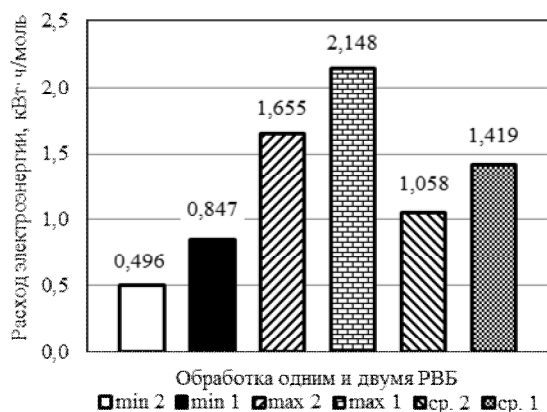


Рисунок 6 Пределы и средние значения удельного расхода электроэнергии на извлечение суммарного количества Mn и Si при обработке одним и двумя РВБ

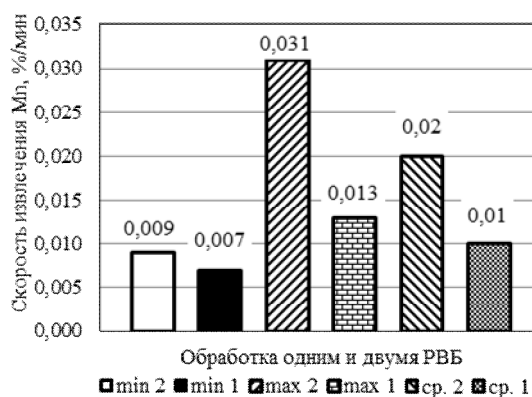
На рисунке 7 представлены значения скорости извлечения Mn и Si в расплав.

Как и ожидалось, замена графитового контакта вторым РВБ позволила в 2 раза увеличить величину этого параметра, что является важным фактором в случае необходимости обеспечения высокого содержания легирующих элементов в расплаве в условиях ограниченного времени внепечной обработки.

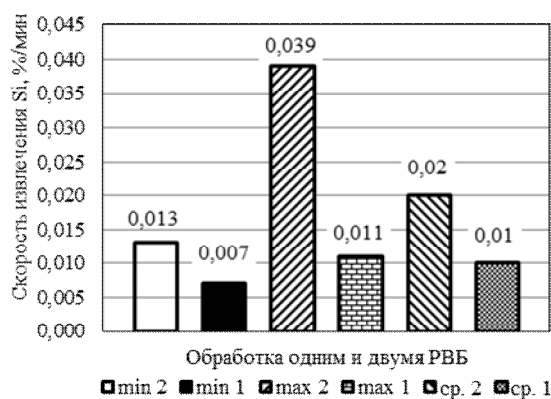
Согласно данным рисунка 7, скорости извлечения Mn и Si практически одинаковы, несмотря на тот факт, что степень извлечения Mn почти в 3 раза превышает степень извлечения Si. Однако это легко объясняется составом РВС, в которой содержание SiO₂ в 4–7 раз превышает содержание MnO.

Следующим важным параметром, исследованным в данной работе, является скорость нагрева расплава. Данные рисунка 8 свидетельствуют о значительном улучше-

нии теплового баланса при обработке металла двумя РВБ, при которой средняя скорость нагрева ванны возрастает практически на 30 %.



а)



б)

Рисунок 7 Пределы и средние значения скорости извлечения Mn (а) и Si (б) при обработке одним и двумя РВБ

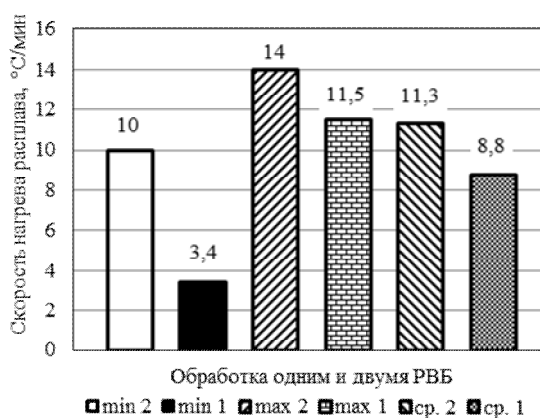


Рисунок 8 Пределы и средние значения скорости нагрева расплава при обработке одним и двумя РВБ

Это может быть связано с отмеченным выше усилением барботажа ванны отходящими из реакционной зоны газами, когда улучшаются условия переноса тепла к нижним объемам расплава и меньшее его количество теряется через зеркало металла. Кроме того, больший экранирующий эффект оказывает второй РВБ в сравнении с используемым ранее контактным электродом.

Экономическую эффективность нового способа обработки железоуглеродистого расплава оценивали сравнением разницы между затратами, имеющими место при реализации внепечного раскисления и легирования по методу ДГВ с использованием одного и двух РВБ, а также базовой технологии, предусматривающей применение ФС, содержащих Mn и Si. На рисунке 9 показана экономическая эффективность различных технологических схем обработки железоуглеродистых расплавов.

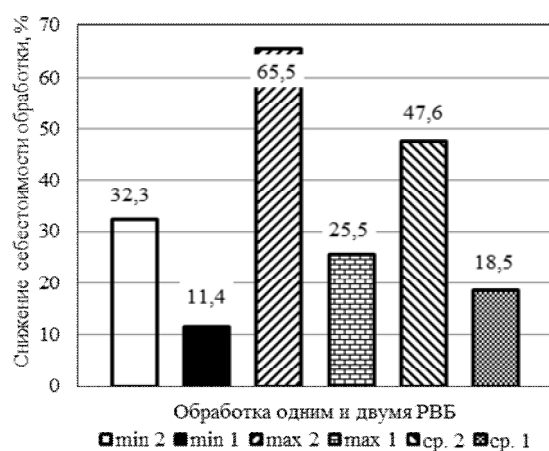


Рисунок 9 Пределы и средние значения снижения себестоимости обработки при использовании одного и двух РВБ

Библиографический список

1. Электродуговая и электромагнитная обработка расплавов [Текст]: монография / А. Н. Смирнов и др. — Алчевск: ДонГТУ, 2013. — 320 с.
2. Куберский, С. В. Внепечная обработка расплавов методом дугового глубинного восстановления [Текст]: монография / С. В. Куберский, А. Н. Смирнов, М. Ю. Проценко. — LAMBERT Academic Publishing, Германия, 2014. — 116 с.
3. Проценко, М. Ю. Сравнение эффективности легирования металла ферросплавами и методом дугового глубинного восстановления [Текст] / М. Ю. Проценко, С. В. Куберский, В. С. Эссельбах // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск: ДонГТУ, 2011. — № 35. — С. 211–220.

Данные, представленные на рисунке 9, свидетельствуют о значительных преимуществах способа обработки железоуглеродистых расплавов двумя РВБ не только в сравнении с базовой технологией, но и с технологией ДГВ, предусматривающей использование одного РВБ.

Снижение затрат на обработку расплава по методу ДГВ с одновременным использованием двух РВБ обусловлено значительным улучшением практически всех параметров обработки, исследованных в ходе проведенных экспериментов.

Таким образом, впервые исследованы параметры метода ДГВ при одновременной обработке железоуглеродистого расплава двумя РВБ. В результате проведенных экспериментов и обработки их результатов показано, что в случае использования двух РВБ повышается степень и скорость извлечения полезных элементов, а также скорость нагрева расплава заглубленным в его объем дуговым разрядом, что наряду со снижением расхода электроэнергии способствует значительному уменьшению затрат на обработку в сравнении с базовыми технологиями.

В ходе последующих исследований предполагается исследовать параметры процесса ДГВ при использовании двух РВБ, состоящих из различных РВС, для решения задач одновременного насыщения металла несколькими полезными элементами или параллельного выполнения операций по раскислению и легированию, а также рафинированию железоуглеродистых расплавов.

4. Проценко, М. Ю. Использование отходов ферросплавного производства для легирования металла методом дугового глубинного восстановления [Текст] / М. Ю. Проценко и др. // *Металл и литье Украины*. — 2010. — № 9–10. — С. 54–57.

5. Проценко, М. Ю. Сравнительный анализ эффективности легирования металла методом дугового глубинного восстановления и ферросплавами [Текст] / М. Ю. Проценко и др. // *Сборник научных трудов конференции «Инновационные технологии внепечной металлургии чугуна и стали»*. — Донецк : ДонНТУ, 2011. — С. 143–151.

6. Куберский, С. В. Анализ технологических параметров обработки металла методом дугового глубинного восстановления марганца [Текст] / С. В. Куберский и др. // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. серія «Металургія»*. — Донецьк : ДонНТУ, 2013. — № 1(16)–2(17). — С. 96–106.

7. Куберский, С. В. Влияние состава рудно-восстановительной смеси на эффективность дугового глубинного извлечения элементов из силикомарганцевого шлака [Текст] / С. В. Куберский, М. Ю. Проценко // *Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції*. — К. : НТУУ «КПІ», 2015. — С. 497–507. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.science-community.org/en/system/files/Conference_Info_21_04_2015.pdf

8. Куберский, С. В. Влияние состава рудно-восстановительных смесей на основе силикомарганцевого шлака на степень извлечения марганца и кремния [Текст] / С. В. Куберский // *Металл и литье Украины*. — 2015. — № 12. — С.3–6.

© Куберский С. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М., старшим мастером ОНРС ККЦ ПАО «АМК» Максаевым Е. Н.

Статья поступила в редакцию 10.10.17.

к.т.н. Куберський С. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ МЕТОДУ ДУГОВОГО ГЛИБИННОГО ВІДНОВЛЕННЯ ЗА ОДНОЧАСНОЇ ОБРОБКИ РОЗПЛАВУ ДВОМА РУДНО-ВІДНОВНИМИ БЛОКАМИ

Вперше досліджено параметри методу дугового глибинного відновлення елементів за одночасної обробки залізовуглецевого розплаву двома рудно-відновними блоками. Показано, що у разі використання двох блоків підвищується ступінь і швидкість вилучення корисних елементів, а також швидкість нагріву розплаву заглибленим в його об'єм дуговим розрядом, що поряд зі зниженням витрат електроенергії сприяє значному зниженню вартості обробки в порівнянні з базовими технологіями.

Ключові слова: залізовуглецевий розплав, дугове глибинне відновлення, рудно-відновний блок, ефективність, розкислення, легування, нагрів, собівартість.

PhD Kuberskiy S. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF THE ARC DEEP REDUCTION METHOD AT THE SIMULTANEOUS PROCESSING OF MELT WITH TWO ORE-REDUCING BLOCKS

For the first time, the parameters of the arc deep reduction method have been studied at simultaneous processing the iron-carbon melt with two ore-reducing blocks. It is shown that if two blocks are used, the degree and the rate of extraction of useful elements increases, as well as the heating rate of the melt by buried arc discharge in its volume, that along with the reduction of power consumption, significantly reduces the cost of processing in comparison with basic technologies.

Key words: iron-carbon melt, arc deep reduction, ore-reducing block, efficiency, deoxidation, alloying, heating, cost price.