

УДК 669.18.04:669.89

*к.т.н. Куберский С. В.,  
к.т.н. Проценко М. Ю.,  
Воронько М. И.,  
Заведия В. С.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)*

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ ПРОЦЕССА ДУГОВОГО ГЛУБИННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

*Проведен анализ различных методов определения затрат электроэнергии на процесс дугового глубинного восстановления элементов с точки зрения достоверности регистрируемых величин. Предложена схема, обеспечивающая наиболее высокую точность измерений.*

**Ключевые слова:** *дуговое глубинное восстановление, затраты электроэнергии, электрические параметры, себестоимость, внепечная обработка расплава.*

В металлургии и ряде других отраслей техники для раскисления-легирования стали, получения легированного чугуна и различных сплавов широко используют ферросплавы, а также технически чистые металлы. Улучшение качества и обеспечение специальных свойств конструкционных, коррозионностойких, жаропрочных, жаростойких, прецизионных и электротехнических сталей, специальных литейных чугунов и самых разнообразных сплавов достигается легированием их различными элементами.

Ферросплавная промышленность производит более 100 различных видов и марок простых и сложных ферросплавов.

Среди отраслей промышленности ферросплавное производство является одним из наиболее энерго- и ресурсозатратных и в значительной степени зависит от наличия дешевых сырьевых материалов и источников электрической энергии. В настоящее время исключительно перспективными являются разработка, исследование и внедрение замкнутых технологических схем получения ферросплавов при комплексном использовании минерального сырья, а также промежуточных и конечных продуктов выплавки ферросплавов, что обеспечивает рациональное использование минеральных богатств недр и защиту окружающей среды [1].

Расход электроэнергии при производстве основных видов ферросплавов в зависимости от вида и состава используемой шихты, а также технологии составляет [2, 3]:

– для 78 % ферромарганца 2,6÷6,7 кВт·ч/кг марганца;

– для 17 % и 20 % ферросиликомарганца 3,6÷4,4 кВт·ч/кг и 4,4÷6,1 кВт·ч/кг суммы марганца и кремния соответственно;

– для 45 %, 65 % и 75 % ферросилиция 10,0÷11,2 кВт·ч/кг, 10,9÷11,9 кВт·ч/кг и 11,3÷13,5 кВт·ч/кг кремния соответственно.

Филиал № 13 «Стахановский завод ферросплавов» ЗАО «Внешторгсервис» специализируется на производстве ферросилиция различных марок, в частности ферросилиция с содержанием кремния 45 %, 65 %, 75 % в сплаве. Производство ферросилиция является наиболее энергоемким, а чем больше содержание кремния в сплаве, тем выше энергоемкость его производства. Доля электроэнергии в себестоимости 65 % и 75 % ферросилиция составляет 60 % и 70 % от общих затрат на производство соответственно. Поэтому постоянный рост стоимости на электроэнергию особенно сильно влияет на технико-экономические показатели производства этих сплавов.

В работе [4] предложен метод переработки отходов ферросплавного производства с использованием дугового глубинно-

го восстановления (ДГВ) входящих в их состав полезных элементов непосредственно в железоуглеродистый расплав.

Основная сущность метода ДГВ заключается в восстановлении полезных элементов из определенного вида сырья в зоне электрической дуги с использованием различных восстановителей. Для ДГВ марганца и кремния из металлургических отходов была проведена серия опытов с использованием жидкого расплава. В качестве основного сырья в рудно-восстановительной смеси блоков использовали шлак производства силикомарганца [4].

На проведенных экспериментах, при легировании чугуна марганцем и кремнием, затраты на электроэнергию составили 43–66 % (среднее — 55,6 %) от стоимости внепечной обработки, что свидетельствует о достаточно высокой конкурентоспособности предложенного способа. Такой вывод авторами работы [5] был сделан на основании анализа калькуляций себестоимости процесса производства марганцевых и кремниевых ферросплавов.

Доля затрат на шихтовые материалы в себестоимости марганцевых и кремниевых ферросплавов составляет 30÷40 %. При дуговом восстановлении доля шихты в себестоимости не превышает 10÷15 %, и процесс будет рентабельным, если затраты на электроэнергию будут находиться в пределах 55÷70 %.

Новым направлением исследований по усовершенствованию процесса ДГВ является разработка технологии по извлечению кремния из песка, в котором его содержание может быть больше 97 % [6].

Для описанных выше процессов ДГВ важной является достоверность величины получаемых затрат электроэнергии при таком способе внепечной обработки, так как ее доля в производственной себестоимости достаточно велика, что оказывает значительное влияние на конкурентоспособность и рентабельность процесса ДГВ.

**Основная цель данной работы** предусматривала анализ различных методов оп-

ределения затрат электроэнергии на процесс дугового глубинного восстановления элементов с точки зрения достоверности регистрируемых величин.

**Объект исследования** — процесс внепечной обработки железоуглеродистых расплавов.

**Предмет исследования** — анализ энергетических затрат на процесс ДГВ.

**Основная задача**, решаемая в исследованиях, заключалась в объективной оценке затрат электроэнергии при реализации метода ДГВ. Данная оценка энергозатрат основывалась на анализе трех способов определения расхода электроэнергии на процесс ДГВ.

**Методики исследования.** При проведении исследований использовали стандартные методики подготовки сырья, измерения температуры, отбора и подготовки проб для химического анализа металла. Для оценки затрат электроэнергии использовали различные методы их определения, основанные на расчетах и регистрации электрических параметров процесса. Полученные результаты экспериментальных данных обрабатывали на ПЭВМ с использованием стандартных пакетов прикладных программ Statistica 64 Version 10 и Microsoft Excel.

Для решения поставленных задач в работе были проанализированы затраты электроэнергии на процесс ДГВ с использованием визуально-аналитической оценки затрат, схемы с двумя счетчиками типа СО-И449, а также схемы с анализатором параметров сети ДМК-62.

При визуально-аналитической оценке (ВАО) производили видеофиксацию показаний вольтметра и амперметра, установленных на ТИР-630, с последующим расчетом фактических затрат электроэнергии по величине силы тока и напряжения.

Данный способ показал себя как довольно трудоемкий, не позволяющий достигнуть достаточной точности измерений вследствие присутствия человеческого фактора. Для более точного определения

затрат электроэнергии наиболее рационально использовать стандартные приборы регистрации и учета электрической энергии. В условиях лабораторного комплекса кафедры «Металлургия черных металлов» для этих целей использовали электрические счетчики.

Внепечная обработка методом ДГВ в лабораторных условиях характеризовалась малыми объемами потребляемой энергии ( $0,5 \div 2$  кВт·ч) и небольшой длительностью процесса (до 12 мин) при величине потребляемого тока до 70 А и напряжении 380 В, а также предусматривала применение трансформаторов тока совместно с приборами учета электроэнергии, что уменьшает показания приборов учета в разы (коэффициент уменьшения может составлять 20–40 раз). Показания прибора учета в этом случае составят  $0,0125$ – $0,1$  кВт·ч, что может быть меньше минимального разряда шкалы прибора. Нелинейность нагрузки вызвана применением источника питания электрической дуги ТИР-630, в состав которого входят полупроводниковые приборы и дроссели насыщения, генерирующие высшие гармоники тока, способствующие частичной рекуперации энергии в сеть, что не обеспечивает требуемую точность измерения энергозатрат. Данные электрические параметры накладывают ограничения на выбор приборов учета и способы измерения энергозатрат в процессе ДГВ.

Для измерения количества электроэнергии с помощью приборов регистрации изначально был использован трехфазный индукционный счетчик типа СА4У-И672М класса точности 2, с трансформаторами тока с коэффициентом трансформации, равным 20. Такой счетчик обеспечивает 450 оборотов диска на 1 кВт·ч измеряемого счетчиком количества электроэнергии. Таким образом, минимальная регистрируемая величина — 1 оборот диска (дискретность) — составляет  $0,044$  кВт·ч потребленной электроэнергии. При небольших величинах потребленной в процессе

ДГВ электроэнергии (2 кВт·ч) полученная дискретность не обеспечивала достаточной точности измерений, которая составляла не более  $\pm 0,1$  кВт·ч при общих затратах на процесс  $0,8 \div 2,1$  кВт·ч.

Кроме того, процесс измерения требует визуального подсчета количества оборотов диска счетчика, что доставляет неудобства и зависит от влияния человеческого фактора, а уменьшенные в 20 раз показания существенно снижают точность измерения.

Для повышения точности и удобства измерений была предложена схема на основе двух однофазных прямоточных счетчиков типа СО-И449, класса точности 2, показанная на рисунке 1 (блок А).

Токовая обмотка такого счетчика рассчитана на номинальный ток 40 А, что позволило исключить использование трансформаторов тока. Для согласования обмотки напряжения счетчика с питающей сетью был использован трансформаторный делитель напряжения с коэффициентом деления 2. Помимо обычной цифровой шкалы для повышения дискретности измерений счетчик имеет дополнительную шкалу на 80 делений, которая соответствует  $0,1$  кВт·ч измеряемой счетчиком электроэнергии. С учетом делителя напряжения минимальная регистрируемая одним счетчиком величина — 1 деление дополнительной шкалы — составляет  $0,0025$  кВт·ч потребленной электроэнергии.

Таким образом, дискретность измерений в предложенной схеме повышается в 17,6 раз по сравнению с дискретностью измерений трехфазным счетчиком, что приводит к повышению точности измерений в 2 раза. Точность измерений в этом случае составит  $\sim 2,1$  %.

Недостатком данного метода измерения является наличие трансформаторного делителя напряжения, который не является метрологически поверенным измерительным прибором и требует калибровки, что снижает достоверность полученных результатов измерения.

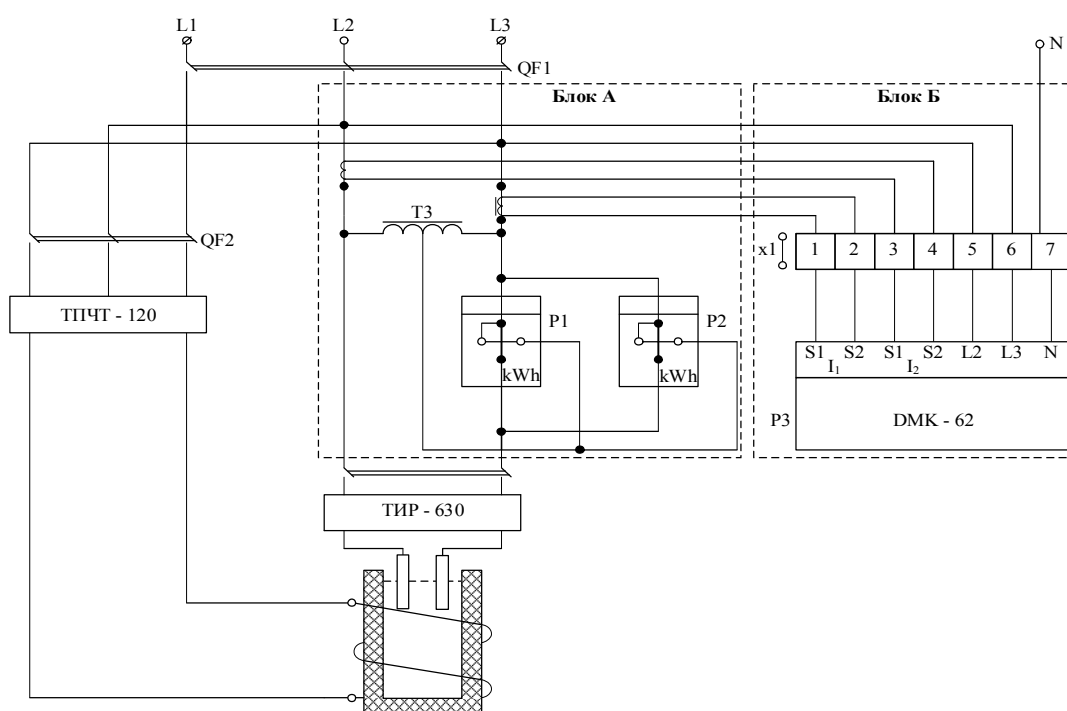


Рисунок 1 Схема измерений затрат электроэнергии при ДГВ с двумя счетчиками СО-И449 (блок А) и ДМК-62 (блок Б)

Для подтверждения достоверности полученных результатов измерения при использовании двух однофазных прямооточных счетчиков типа СО-И449 предложен способ измерения количества электричества с помощью анализатора параметров сети ДМК-62 (рис. 1, блок Б).

ДМК-62 — современный цифровой прибор, сертифицированный в Российской Федерации, имеет класс точности 1 [7]. При помощи установки (ввода) величины коэффициента трансформации по измеряемому току 2000 получена дискретность измерений 0,002 кВт·ч с учетом применения согласующих трансформаторов тока с коэффициентом трансформации 40. Точность измерений прибора ДМК-62 составила  $\pm 1,1\%$ .

Проведенные экспериментальные измерения количества электричества при работе на активную линейную нагрузку зафиксировали, что показания ДМК-62 выше показаний схемы с двумя счетчиками примерно на 2 %, что находится в пределах класса точности прибора.

Следует отметить, что при внепечной обработке железоуглеродистых расплавов методом ДГВ используется источник питания ТИР-630, питающий электрическую дугу, в котором используются дроссели насыщения. Такой комплекс является нелинейной нагрузкой и источником высших гармоник тока.

Согласно данным, представленным в работе [8], нелинейные нагрузки являются генераторами высших гармоник. Получая энергию из энергосистемы по каналу первой гармоники, они частично ее преобразуют в энергию высших гармоник, которая возвращается обратно в сеть и распределяется между другими потребителями. В данных условиях счетчики электрической энергии, рассчитанные на учет электроэнергии, передаваемой с частотой 50 Гц, имеют в 1,5–2,5 раза большую погрешность по отношению к обозначенной классом точности.

Для оценки достоверности определения затрат электроэнергии по различным методам в лабораторных условиях были прове-

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

дены четыре серии экспериментальных плавок по обработке чугуна методом ДГВ. Обработку чугуна производили в индукционной сталеплавильной тигельной печи ёмкостью 60 кг (ИСТ-0,06) с использованием источника питания ТИР-630. Для исследований были изготовлены рудно-восстановительные блоки (РВБ) Ø55 мм и Ø50 мм, имеющие различный состав рудно-восстановительной смеси (РВС). В качестве связующих использовали жидкое стекло (ж.с.), цемент и камен-

ноугольный пек (к.п.). РВБ были снабжены комбинированными токопроводящими электродами, состоящими из стальной трубки Ø18 мм, набитой внутри электродной смесью (MgO 11,1 %, графит 71,1 % и к.п. 17,8 %).

Основные технологические параметры и энергетические затраты внепечной обработки железоуглеродистого расплава методом ДГВ с использованием различных способов определения энергозатрат приведены в таблице 1.

Таблица 1

Технологические параметры обработки металла методом ДГВ

Технологические параметры ДГВ	№ РВБ*			
	1	2	3	4
Ø РВБ, мм	55	50	55	55
Вид связки	ж.с.	ж.с.	цемент	к.п.
Состав РВС, %:				
песок	65,5	65,5	45,01	60,40
кокс	27,5	27,5	22,02	12,60
связка	7,00	7,00	23,84	27,00
Масса металла, кг	35,0	34,8	40	39,9
Начальная температура металла, °С	1530	1541	1501	1507
Время обработки, мин	4,02	5,35	1,82	3,35
Сила тока, А	263,8	252,0	295,6	226,8
Напряжение, В	56,3	54,5	53,8	59,1
Подводимая мощность, кВт	14,8	13,7	15,9	13,4
Затраты электроэнергии, кВт·ч:				
ВАО	0,994	1,225	0,481	0,748
два счетчика	0,666	0,857	0,535	0,738
DMK-62	0,710	0,924	0,594	0,802
Масса сгоревшей РВС, кг	0,314	0,215	0,720	0,035
Удельные затраты электроэнергии, кВт·ч/кг РВС	2,261	4,298	0,825	25,063
Прирост кремния в металле, %	0,100	0,080	0,022	0,0220
Степень извлечения кремния, %	34	28	6	82

\*Каждый эксперимент проводили 3 раза и величину исследуемых параметров усредняли.

При внепечной обработке металла методом ДГВ с использованием ВАО полученные затраты электроэнергии составили  $0,481 \div 1,225$  кВт·ч, что в среднем на 21 % выше схемы с двумя счетчиками ( $0,535 \div 0,857$  кВт·ч) и на 13 % выше, чем при использовании прибора DMK-62 ( $0,594 \div 0,924$  кВт·ч). Кроме того, показания, полученные при использовании DMK-62, выше показаний, полученных по схеме с двумя счетчиками, примерно на 8 %.

При проведении измерений прибором DMK-62 были зарегистрированы третья и пятая гармоники тока, а также частичная рекуперация энергии в сеть, что подтверждает нелинейный характер нагрузки. Влияние нелинейности нагрузки отразилось на увеличении различий в показаниях прибора DMK-62 и схемы с двумя счетчиками.

Таким образом, для определения энергозатрат процесса ДГВ могут быть использованы как схема с двумя счетчиками, так

и прибор ДМК-62, причем последний обеспечивает более высокую точность измерений. Снижение показаний индукционных счетчиков по сравнению с показаниями прибора ДМК-62 в сетях с нелинейной нагрузкой вызвано тем, что высшие гармоники тока, возникающие при нелинейных нагрузках, оказывают «тормозящее» действие на вращающийся диск счетчика, поскольку возвращают часть энергии обратно в сеть. Однако для ком-

мерческого учета электроэнергии это не имеет существенного значения, поскольку возвращенная в сеть энергия будет распределена между другими потребителями. Прибор ДМК-62 имеет возможность учитывать отдельно потребляемую и отдаваемую в сеть электроэнергию.

В ходе последующих исследований предполагается продолжить работу с точки зрения повышения точности измерения энергетических параметров.

### Библиографический список

1. Гасик, М. И. Теория и технология производства ферросплавов [Текст] : учебник для вузов / М. И. Гасик, Н. П. Лякишев, Б. И. Емлин. — М. : Металлургия, 1988. — 784 с.
2. Зубов, В. Л. Электрометаллургия ферросилиция [Текст] / В. Л. Зубов, М. И. Гасик. — Днепропетровск : Системные технологии, 2002. — 704 с.
3. Гаврилов, В. Л. Силикотермия марганца [Текст] / В. Л. Гаврилов, М. И. Гасик. — Днепропетровск : Системные технологии, 2001. — 512 с.
4. Проценко, М. Ю. Разработка ресурсосберегающей технологии дугового глубинного восстановления марганца из шлака силикомарганца в железоуглеродистые расплавы [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.16.02 / Проценко Михаил Юрьевич ; ДонГТУ. — Лисичанск, 2017. — 191 с.
5. Проценко, М. Ю. Сравнение эффективности легирования металла ферросплавами и методом дугового глубинного восстановления [Текст] / М. Ю. Проценко, С. В. Куберский, В. С. Эссельбах // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2011. — Вып. № 35. — С. 211–220.
6. Куберский, С. В. Использование метода дугового глубинного восстановления для извлечения кремния из песка в железоуглеродистые расплавы [Текст] / С. В. Куберский, М. Ю. Проценко, М. И. Воронько, И. А. Белан // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — Вып. № 14 (57). — С. 37–45.
7. Официальный сайт LOVATO Electric [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.lovatoelectric.com> (10.02.2020).
8. Кириллов, С. В. Снижение погрешности учета электроэнергии в системах электроснабжения с преобладающей нелинейной нагрузкой [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.09.03 / Кириллов Сергей Викторович ; РГБ ОД. — Мичуринск, 2006. — 154 с.

© Куберский С. В., Проценко М. Ю., Воронько М. И., Заведия В. С.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТУ Должиковым В. В., зам. нач. ЦЛК Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» Тарасовым В. Н.*

Статья поступила в редакцию 01.06.20.

**PhD in Engineering Kuberskiy S. V. PhD in Engineering Protsenko M. Yu., Voron'ko M. I., Zavediya V. S. (DonSTU, ALchevsk, LPR)**  
**IMPROVING THE METHODOLOGY FOR DETERMINING THE ENERGY COSTS OF THE ARC DEEP RECOVERY PROCESS**

*The analysis of various methods has been performed for determining power cost on the process of arc deep recovery of elements, in term of reliability of readout. The scheme providing the highest accuracy of measurements is given.*

**Key words:** arc deep recovery, power costs, electrical parameters, cost value, out-of-furnace melt treatment.