



УДК 669.168.3:621.365.2

DOI 10.17073/0368-0797-2024-6-660-664

Оригинальная статья  
Original article

## ПОДЭЛЕКТРОДНЫЙ ПРОМЕЖУТОК И УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ ВАННЫ ФЕРРОСПЛАВНОЙ ПЕЧИ

А. П. Шкирмонтов

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Россия, 125167, Москва, Ленинградский пр., 49/2)

[aps-panor@yandex.ru](mailto:aps-panor@yandex.ru)

**Аннотация.** Для повышения энерготехнологической эффективности работы ферросплавной печи проведены исследования выплавки 45 %-ного ферросилиция углеродотермическим способом. Для исследования технологии выплавки ферросплавов в ряде случаев применяются способы замера и изменения удельного электросопротивления шихтовых материалов при температурах до 1900 К для выплавки марганцевых сплавов из различных руд, углеродистого феррохрома, ферросилиция, ферросиликомарганца и ферросиликоалюминия. Для серии плавов 45 %-ного ферросилиция проводили замеры полезного напряжения, силы тока электрода, коэффициента мощности. По мере выплавки рассчитывали сопротивление ванны и для реакционной плавильной зоны (плавильного тигля) определяли удельное электросопротивление в одноэлектродной печи при различных подэлектродных промежутках. Выплавка по технологии с увеличенным подэлектродным промежутком выполнена в крупномасштабной опытной электропечи мощностью 130 – 290 кВ·А. Увеличение подэлектродного промежутка от (0,6 ÷ 0,9) до 6,0 диаметров электрода приводит к эффекту повышения в 2,5 раза сопротивления, напряжения и мощности в ванне (каждого показателя), но при этом несколько снижается удельное электросопротивление плавильной зоны печи при неизменном диаметре (150 мм) электрода. Определен оптимальный подэлектродный промежуток (расстояние электрод – подина) в ванне одноэлектродной печи по изменению удельного электросопротивления. Оптимальным является значение 3,33 диаметра электрода. При допущении отклонений около ±5 % от этой величины возможно проводить эффективную выплавку 45 %-ного ферросилиция в диапазоне 3,2 – 3,5 диаметров электрода для подэлектродного промежутка при рудовосстановительном процессе с закрытой дугой.

**Ключевые слова:** ферросплавы, электропечь, подэлектродный промежуток, сила тока электрода, рабочее напряжение, сопротивление ванны, коэффициент мощности, степень извлечения

**Для цитирования:** Шкирмонтов А.П. Подэлектродный промежуток и удельное электросопротивление ванны ферросплавной печи. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(6):660–664. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-660-664>

## SUB-ELECTRODE GAP AND SPECIFIC ELECTRICAL RESISTANCE OF A FERROALLOY FURNACE BATH

A. P. Shkirmontov

Financial University under the Government of the Russian Federation (49/2 Leningradskii Ave., Moscow 125167, Russian Federation)

[aps-panor@yandex.ru](mailto:aps-panor@yandex.ru)

**Abstract.** To increase the energy-technological efficiency of a ferroalloy furnace, the author studied the smelting of 45 % ferrosilicon by a carbon-thermal method. In some cases, methods for measuring and changing the specific electrical resistance of charge materials at temperatures up to 1900 K are used to study the technology of smelting ferroalloys for smelting manganese alloys from various ores, carbonaceous ferrochrome, ferrosilicon, ferrosilicon manganese and ferrosilicon aluminum. For a series of heats of 45 % ferrosilicon, measurements of the useful voltage, electrode current, and power factor were carried out. As smelting progressed, the bath resistance was calculated and for the reaction melting zone (melting crucible), the specific electrical resistance in the single-electrode version of the furnace was determined at various sub-electrode gaps. Smelting using technology with an increased sub-electrode gap was performed in a large-scale experimental electric furnace with a capacity of 130 – 290 kV·A. As a result, it was found that an increase in the sub-electrode gap from (0.6 ÷ 0.9) to 6.0 of electrode diameters leads to the effect of a 2.5-fold increase in resistance, voltage and power in the bath (each indicator), but at the same time to a slight decrease in the specific electrical resistance of the melting zone of the furnace with a constant diameter (150 mm) of the electrode. The optimal sub-electrode gap (electrode – substrate distance) in the bath of a single-electrode furnace was determined by changing the specific electrical resistance. The optimal value is 3.33 of the electrode diameter. Assuming deviations of about ±5 % of this value, it is possible to efficiently smelt 45 % ferrosilicon in the range of 3.2 – 3.5 electrode diameters for the sub-electrode gap during the ore recovery process with a closed arc.

**Keywords:** ferroalloys, electric furnace, sub-electrode gap, electrode current, operating voltage, bath resistance, power factor, recovery rate

**For citation:** Shkirmontov A.P. Sub-electrode gap and specific electrical resistance of a ferroalloy furnace bath. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(6):660–664. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-660-664>

## ВВЕДЕНИЕ

Выплавка ферросплавов углеродотермическим методом относится к наиболее энергозатратным [1] и материалоемким производствам [2] черной металлургии. Эффективность работы ферросплавной электропечи зависит от многих факторов: технологических особенностей выплавки из рудных материалов [3; 4]; электрических параметров и режимов работы [5; 6]; теплотехнических параметров и особенно тепловой работы ванны ферросплавной печи; особенностей конструкции плавильных агрегатов.

Одним из основных параметров процесса производства ферросплавов является комплексная величина – подэлектродный промежуток (расстояние электрод – подина) в ванне печи. Для ферросплавных электропечей традиционных конструкций при выплавке углеродотермическим способом сплавов кремния, хрома, марганца подэлектродный промежуток в основном составляет около  $0,6 \div 0,9$  диаметра электрода печи [7]. Электропечь работает в комплексном режиме сопротивления и электрической дуги, при этом процесс характеризуется большими значениями силы тока электрода (десятки килоампер) и сравнительно невысоким напряжением, тем самым имеет место низкое активное сопротивление ванны.

Для улучшения энерготехнологических параметров и работы печи на повышенном напряжении была предложена технология выплавки с увеличенным подэлектродным промежутком (выше традиционных значений  $0,6 \div 0,9$  диаметра электрода) с улучшением энерготехнологических параметров. Благодаря значительному увеличению глубины ванны печи рассматриваемая технология выплавки ферросплавов позволяет обойтись без уменьшения заглубления электродов в шихту, увеличить активное сопротивление ванны, рабочее напряжение, коэффициент мощности, электрический и тепловой КПД [8]. При этом основным является вопрос, до какой оптимальной величины можно увеличивать расстояние электрод – подина, так как в результате повышаются размеры плавильной зоны, в том числе по вертикали в ванне ферросплавной печи, что требует значительного увеличения глубины ванны.

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы провести выплавку 45 %-ного ферросилиция углеродотермическим методом, обосновать и исследовать до какой оптимальной величины можно увеличивать подэлектродный промежуток (электрод – подина) в ванне одноэлектродной ферросплавной печи без уменьшения заглубления электрода в шихту и ухудшения парамет-

ров выплавки ферросилиция на базе крупномасштабной опытной электропечи.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования технологии выплавки ферросплавов в ряде случаев применяют способы замера и изменения удельного электросопротивления шихтовых материалов при температурах до 1900 К: для марганцевых сплавов из казахстанских руд [9]; для углеродистого феррохрома и ферромарганца, 75 %-ного ферросилиция и ферросиликомарганца MnC17 [10]; для ферросиликоалюминия [11]; для сплавов хрома [12]; для углеродистых восстановителей [13]. Большая часть исследований посвящена замерам удельного электросопротивления нетрадиционных углеродистых восстановителей для ферросплавов [14; 15] и кремния [16; 17].

В настоящей работе были проведены серии плавов 45 %-ного ферросилиция, замеры полезного напряжения, силы тока электрода, коэффициента мощности и расчеты сопротивления ванны или реакционной плавильной зоны (плавильного тигля) для определения удельного электросопротивления в одноэлектродной печи для различных подэлектродных промежутков.

Предварительно перед выплавкой футеровку ванны печи медленно разогревали под током на коксе в течение не менее одних суток. В конце прогрева увеличивали токовую нагрузку и подавали первые порции шихты для выплавки с закрытой дугой. Первый выпуск ферросилиция через летку проводили не менее чем через 2 ч работы печи с постепенным наращиванием уровня колошника небольшими партиями подачи шихты. Затем выпуск ферросилиция проводили каждый час работы печи с периодической загрузкой шихты. При этом поддерживали силу тока электрода (плотность тока электрода) в неизменных пределах значений, близких к предельно допустимым для рассматриваемого диаметра графитированного электрода 150 мм. При хорошем ходе печи медленно увеличивали рабочее напряжение и подэлектродный промежуток без изменения заглубления электрода в шихту от выпуска к выпуску и без снижения температуры ферросилиция на выпуске из электропечи [18].

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В качестве плавильного агрегата использовали одноэлектродную шахтную печь с подводом переменного тока с частотой 50 Гц к рабочему графитированному электроду и к электропроводной углеродистой подине. Печь оборудована леткой выпуска для ферро-

силиция, диаметр электрода 150 мм, сила тока около 4,7 кА. Теплоизолирующая часть футеровки состояла из шамотного кирпича и шамотной крупки, рабочий слой стен – из хромомagneзитового кирпича. Для лучшей стойкости горн печи (нижняя часть) выложен на высоту одного диаметра электрода углеродистыми блоками. Футеровка подины состояла из листового асбеста, шамотной крупки, четырех слоев шамотного кирпича, двух слоев углеродистых блоков и набивки из электродной массы. Сечение ванны и электропроводной подины составляло 500×500 мм, глубина ванны – 1200 мм. Используемая мощность электропечной установки при выплавке составляла 130 – 290 кВ·А [8].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выплавку 45 %-ного ферросилиция проводили на традиционных шихтовых материалах (кварцит, коксик, железная стружка). Заглубление электродов в шихту было не менее 1,5 – 1,7 диаметра электрода. В качестве базового варианта сравнения выплавку проводили при традиционном подэлектродном промежутке (0,6 ÷ 0,9 диаметра электрода). Затем в процессе длительной выплавки повышали расстояние электрод – подина, что достигалось постепенным увеличением рабочего напряжения и поддержанием силы тока электрода. Наибольшая величина подэлектродного промежутка составила 6,0 диаметров электрода. Активное сопротивление ванны возросло от 4,8 до 12 мОм (увеличилось в 2,5 раза). Аналогичным образом возросли мощность в печи и напряжение при таком расстоянии

электрода – подина без уменьшения заглубления электрода в шихту и благодаря значительному увеличению глубины ванны печи. При этом следует отметить, что при повышении расстояния электрод – подина сопротивление ванны печи изменялось не линейно. В результате отмечено снижение удельного электросопротивления плавильной зоны [19], несмотря на значительный рост сопротивления ванны ферросплавной печи (см. рисунок).

Коэффициент мощности печи увеличился от 0,905 до 0,976; электрический КПД – от 0,904 до 0,942. Сравнительно небольшой тепловой КПД для малых печей возрос от 0,309 до 0,374. Удельный расход электроэнергии снизился от 9020 до 7168 кВт·ч/т из-за введения дополнительной мощности в ванну печи. Для всей кампании выплавки извлечение кремния в сплав составило 91,9 – 92,1 %, температура сплава на выпуске – 1650 – 1720 °С. Содержание кремния в получаемом сплаве было на уровне 42,3 – 45,6 % Si, что соответствовало требованиям стандарта.

На основании исследований по изменению сопротивления ванны и удельного электросопротивления плавильной зоны от увеличения подэлектродного промежутка при выплавке в ферросплавной печи получены следующие соотношения:

$$R = 5,61(h/d_3)^{0,40}; \quad (1)$$

$$\rho/d_3 = 18,69(h/d_3)^{-0,60}, \quad (2)$$

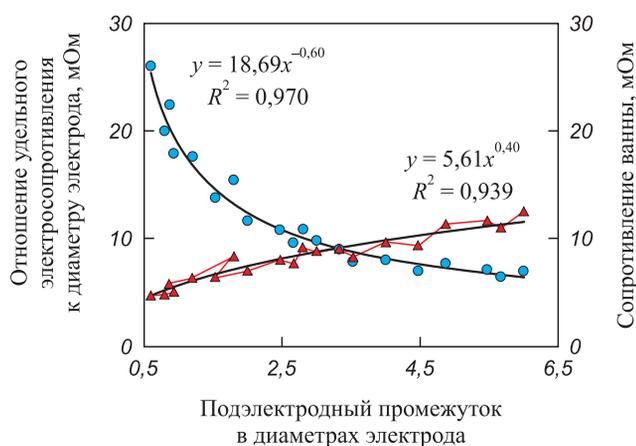
где  $R$  – сопротивление ванны печи;  $h/d_3$  – подэлектродный промежуток в диаметрах электрода;  $\rho/d_3$  – отношение удельного электросопротивления плавильной зоны печи к диаметру электрода печи.

Несмотря на значительный рост сопротивления ванны при выплавке 45 %-ного ферросилиция, отмечено существенное снижение удельного электросопротивления плавильной зоны печи при увеличении подэлектродного промежутка (расстояние электрод – подина) от 0,6 ÷ 0,9 до 6,0 диаметров электрода (см. рисунок).

По данным монографий Б.М. Струнского [20; 21], в которых приведены обобщения результатов работ П.В. Сергеева [22], W.H. Kelly, M.J. Morkramer и других исследователей по выплавке ферросплавов в электропечах, были отмечены значительные диапазоны изменения удельного электросопротивления:

- 0,60 ÷ 0,95 Ом·см для 45 %-ного ферросилиция;
- 0,50 ÷ 1,25 Ом·см для 75 %-ного ферросилиция;
- 0 ÷ 2,00 Ом·см для углеродистого феррохрома;
- 0,20 ÷ 0,55 Ом·см для углеродистого ферромарганца;
- 0,25 ÷ 0,38 Ом·см для ферросиликомарганца.

Если учитывать, что относительный подэлектродный промежуток для выплавки массовых ферросплавов составляет 0,6 ÷ 0,9 диаметра электрода, то изменение удельного сопротивления ванны тоже



Изменение активного сопротивления ванны и удельного электросопротивления плавильной зоны печи при выплавке 45 %-ного ферросилиция в зависимости от подэлектродного промежутка:

- – отношение удельного электросопротивления к диаметру электрода; ▲ – сопротивление ванны печи

Changes in the bath active resistance and specific electrical resistance of the furnace melting zone depending on increase in sub-electrode gap when smelting 45 % ferrosilicon:

- – ratio of specific electrical resistance to the electrode diameter; ▲ – resistance of the furnace bath

значительно, что оказывает определенное влияние на регулирование пещью.

В соответствии с решением системы уравнений, состоящей из выражения (1) относительно роста сопротивления ванны печи и уравнения (2) по снижению удельного электросопротивления плавильной зоны, при одновременном увеличении подэлектродного промежутка получен оптимальный вариант решения. В результате расчета подэлектродный промежуток при выплавке равен 3,33 диаметра электрода. При этом параметры электропечи при выплавке ферросилиция в оптимальном режиме имели достаточно неплохие значения: коэффициент мощности до 0,939; электрический КПД до 0,921; тепловой КПД до 0,364. При допущении отклонений  $\pm 5\%$  от этой величины подэлектродного промежутка возможно оптимально проводить выплавку ферросплавов в диапазоне  $3,2 \div 3,5$  диаметра электрода. При работе с большим подэлектродным промежутком потребуется дополнительно увеличить глубину ванны печи.

## Выводы

Выплавка 45 %-ного ферросилиция углеродотермическим методом с увеличенным подэлектродным промежутком от  $0,6 \div 0,8$  до  $6,0$  диаметров электрода приводит к общему эффекту повышения сопротивления в 2,5 раза, напряжения и мощности в ванне при определенном снижении удельного электросопротивления плавильной зоны печи. В результате оптимальной величиной является подэлектродный промежуток 3,33 диаметра электрода. При допущении отклонений  $\pm 5\%$  от этой величины возможно проводить выплавку ферросплавов в диапазоне  $3,2 \div 3,5$  диаметра электрода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Syvachenko V., Yemchytysky V., Nezhurny V. Direction of saving energy resources in the technology of electrothermal processes. In: *Proceedings of the XIV Int. Ferroalloys Congress: INFACON XIV. Kiev, Ukraine. 31 May – 4 June 2015*. Kiev; 2015:700–702.
- Degel R., Lux T., Joubert H. Furnace integrity of ferroalloy furnaces – symbiosis of process, cooling, refractory lining and furnace design. In: *Proceedings of the XV Int. Ferroalloys Congress: INFACON XV. Cape Town, South Africa. 25-28 February*. Cape Town; 2018:269–282.
- Grishchenko S.G., Kutsin V.S., Kravchenko P.A. Ferroalloy industry of Ukraine: Current status, development trends and future prospects. In: *Proceedings of the XIV Int. Ferroalloys Congress: INFACON XIV. Kiev, Ukraine. 31 May – 4 June 2015*. Kiev; 2015:1–5.
- Degel R., Frihling C., Koneke M. History and new milestones in submerged arc furnace technology for ferroalloy and silicon production. In: *Proceedings of the XIV Int. Ferroalloys Congress: INFACON XIV. Kiev, Ukraine. 31 May – 4 June 2015*. Kiev; 2015:7–16.
- Gasik M. Handbook of Ferroalloys. Theory and Technology. Elsevier Ltd.; 2013:520.  
<https://doi.org/10.1016/C2011-0-04204-7>
- Gasik M., Dashevskii V., Bizhanov A. Ferroalloys. Theory and Practice. Springer Nature Switzerland; 2020:328.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-57502-1>
- Шкирмонттов А.П. Роль подэлектродного промежутка в ферросплавной печи в улучшении энерготехнологических параметров выплавки углеродотермическим процессом. *Электрометаллургия*. 2017;(6):24–31.  
Shkirmontov A.P. The role of sub-electrode gap in a ferroalloy furnace in improving the energy-technological parameters of smelting by carbon-thermal process. *Elektrometallurgiya*. 2017;(6):24–31. (In Russ.).
- Шкирмонттов А.П. Энерготехнологические параметры выплавки ферросплавов в электропечах. Москва: НИТУ МИСиС; 2018:216.
- Жунусов А.К., Толымбеков А.Б. *Металлургическая переработка марганцевых руд месторождения «ГУР» и Западный Камыс*. Павлодар: Керееску; 2016:209.
- Воробьев В.П. *Электротермия восстановительных процессов*. Екатеринбург: УрО РАН; 2009:370.
- Бакиров А.Г., Жунусов А.К., Чекимбаев А.Ф., Шошай Ж. Исследование удельного электрического сопротивления шихтовых смесей для выплавки ферросиликоалюминия. *Наука и Техника Казахстана*. 2008;(2):14–19.  
Bakirov A.G., Zhunusov A.K., Chekimbaev A.F., Shoshai Zh. Investigation of the electrical resistivity of charge mixtures for smelting ferrosilicoaluminium. *Nauka i Tekhnika Kazakhstan*. 2008;(2):14–19. (In Russ.).
- Кожевников Г.Н., Зайко В.П. *Электротермия сплавов хрома*. Москва: Наука; 1980:188.
- Нурмуханбетов Ж.У., Ким В.А., Толымбеков М.Ж. Электросопротивление углеродистых восстановителей. *Новости науки Казахстана*. 2005;(2):35–40.  
Nurmukhanbetov Zh.U., Kim V.A., Tolymbekov M.Zh. Electrical resistance of carbon reducing agents. *Novosti nauki Kazakhstan*. 2005;(2):35–40. (In Russ.).
- Воробьев В.П. Получение и применение карборундсодержащих углеродистых восстановителей в технологии кремния и ферросплавов. *Сталь*. 2015;(6):22–25.  
Vorob'ev V.P. Carborundum-bearing carbon reducing agents in silicon and silicon-ferroalloy production. *Steel in Translation*. 2015;45(6):439–442.  
<https://doi.org/10.3103/S0967091215060157>
- Ульева Г.А. Исследование физико-химических свойств специальных видов кокса и его применения для выплавки высококремнистых сплавов: автореф. дисс. канд. техн. наук. Екатеринбург; 2013:23.
- Исин Д.К., Байсанов С.О., Мехтиев А.Д., Байсанов А.С., Исин Б.Д. Технология получения кристаллического кремния с применением нетрадиционных восстановителей. *Металлург*. 2013;(11):88–93.  
Isin D.K., Baisanov S.O., Mekhtiev A.D., Baisanov A.S., Isin B.D. Technology for the production of crystalline silicon using non-traditional reducing agents. *Metallurg*. 2013;(11):88–93. (In Russ.).
- Ким В.И. Новые виды углеродистых восстановителей для выплавки технического кремния. *Сталь*. 2017;(2):25–27.

- Kim V.I. New types of carbon reducing agents for smelting of technical silicon. *Stal'*. 2017;(2):25–27. (In Russ.).
18. Shkirmontov A.P. Establishing the theoretical foundations and energy parameters for the production of ferroalloys with a larger-than-normal gap under the electrode. *Metallurgist*. 2009;53(5–6):300–308.  
<https://doi.org/10.3103/s0967091222120117>
19. Шкирмонтов А.П. Изменение активного сопротивления ванны и удельного электросопротивления реакционной зоны выплавки ферросилиция при увеличении подэлектродного промежутка. В кн.: *Физико-химические основы металлургических процессов: Международная научная конференция: Сборник трудов*. Москва: ИМЕТ РАН; 2019:69.
20. Струнский Б.М. Расчеты руднотермических печей. Москва: Металлургия; 1982:192.
21. Струнский Б.М. Руднотермические плавильные печи. Москва: Металлургия; 1972:368.
22. Сергеев П.В. Энергетические закономерности руднотермических электропечей, электролиза и электрической дуги. Алма-Ата: Изд-во АН Казахской ССР; 1963:251.

### Сведения об авторе

### Information about the Author

**Александр Прокопьевич Шкирмонтов**, д.т.н., директор Центра Редакции научных журналов, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации

**E-mail:** [aps-panor@yandex.ru](mailto:aps-panor@yandex.ru)

**Aleksandr P. Shkirmontov**, Dr. Sci. (Eng.), Director of the Editorial Center of Scientific Journals, Financial University under the Government of the Russian Federation

**E-mail:** [aps-panor@yandex.ru](mailto:aps-panor@yandex.ru)

Поступила в редакцию 26.04.2024  
После доработки 22.05.2024  
Принята к публикации 17.10.2024

Received 26.04.2024  
Revised 22.05.2024  
Accepted 17.10.2024