

## МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 669.168

## ВЫБОР ВОССТАНОВИТЕЛЕЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СИЛИКОМАРГАНЦА \*

*Кашлев И.М.<sup>1</sup>, к.т.н., главный инженер**Сидоров А.В.<sup>1</sup>, начальник цеха**Нохрина О.И.<sup>2</sup>, д.т.н., профессор (kafamsf@sibsibiu.ru)*<sup>1</sup>ООО «СГМК-ферросплавы»

(654041, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кутузова, 37а)

<sup>2</sup>Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Приведены результаты двух опытных кампаний выплавки силикомарганца марки MnC17 с использованием в качестве восстановителя коксового орешка и полукокса, произведенного из бурых углей Канско-Ачинского бассейна по технологии, в основу которой положен процесс слоевой газификации угля. Опытную кампанию по выплавке силикомарганца проводили с использованием марганцевых руд с содержанием марганца 42,7 и 38,44 % в соотношении в колоше 1:3. Содержание марганца в выплавленных сплавах составило 65,9 – 68,11 %, кремния – 17,47 – 18,3 %. Установлено, что при использовании восстановительной смеси из 80 % кокса и 20 % полукокса ухудшились технико-технологические показатели процесса, при введении в восстановительную смесь бурого угля в количестве 35 % при расходе полукокса 27 % и кокса 38 % стабилизировались электрические показатели работы печи, восстановилась газопроницаемость колошника. Лучшие показатели работы были достигнуты при введении в восстановительную смесь 32,5 % полукокса, дальнейшее увеличение его количества ухудшает показатели работы печи.

**Ключевые слова:** марганцевая руда, кокс, полукокс, удельный расход электроэнергии, восстановительная смесь.

При производстве марганцевых ферросплавов в рудотермических печах (РТП) углеродотермическим способом большое значение имеет выбор восстановительной смеси, состав которой влияет на электрическое сопротивление ванны. Этот показатель можно увеличить за счет использования углеродистых восстановителей с высоким исходным электросопротивлением [1, 2], отчего в результате зависит рабочее напряжение печи. Также немаловажное значение при выборе восстановителя имеют и экономические показатели.

Восстановительные процессы при использовании чистого кокса имеют ряд недостатков, хотя и значимость последних зависит от конкретно выбранного сплава. На подбор и поиск оптимального сочетания восстановителей при работе рудотермической электропечи может уйти не один месяц и не всегда расчетные показатели совпадают с результатами, полученными на практике. В состав восстановительной смеси могут входить несколько компонентов. Кроме того, предъявляются требования к гранулометрическому составу восстановителей и способу загрузки на колошник печи (центр либо периферия). Поиск оптимального состава восстановительной смеси, позволяющей максимально эффективно вести процесс (максимальное восстановление элементов, посадка электродов, электрические параметры электродов) при минимальных затратах,

является очень важным вопросом при производстве любого сплава.

Установлено, что углеродистый восстановитель в зависимости от величины поданного напряжения и своей природы уже в течение нескольких минут может нагреться до высокой температуры [3]. По данным авторов работы [4] обычный коксовый орешек при напряжении 80 – 100 В может повысить свою температуру до 2000 °С уже за 20 мин, что совершенно недопустимо при использовании в качестве сырья марганцевого агломерата, содержащего в своем составе 52 % MnO. Для снижения температуры в верхних горизонтах печи и для предотвращения раннего шлакообразования необходимы охладители поверхности колошника. В качестве рыхлителей и охладителей могут быть использованы компоненты восстановительной смеси, имеющие в своем составе достаточное количество летучих и влаги, такие как древесная щепка, длиннопламенный и бурый угли. Кроме того, эти же компоненты в верхних горизонтах колошника имеют высокое удельное электросопротивление и повышают сопротивление в зоне шихтовой проводимости [5, 6].

Для улучшения работы РТП, выплавляющей силикомарганец, проведена опытная кампания по частичной замене коксового орешка полукоksom. Из данных, представленных в табл. 1, видно, что полукокс по своим физико-химическим свойствам не уступает коксовому орешку, а по некоторым показателям превосходит его. Среднее содержание углерода в обоих восстановителях можно считать примерно одинаковым, при этом полу-

\* Работа выполнена в рамках проектной части государственно-го задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности на 2014 – 2016 гг.

**Физико-химические свойства углеродистых восстановителей**

Показатель	Значение показателя для		
	коксового орешка	полукокса	бурого угля
Технический анализ, %:			
W <sup>a</sup>	9,9	1 – 1,3	35,0
A <sup>d</sup>	12,9	8,6	6,9
V <sup>daf</sup>	2,3	3,8	46,5
S <sup>d</sup>	0,42	0,13 – 0,22	0,35
P <sup>d</sup>	0,047	0,026 – 0,038	0,003
Содержание углерода, % (по массе)	85,1	87,9	49,8
Содержание минеральных примесей на 100 кг углерода, кг	15,2	10,2	13,9
Химический состав золы по оксидам, %*:			
SiO <sub>2</sub>	47,98/7,29	54,29	17,6/2,45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,72/3,61	23,25	6,8/0,95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,12/1,99	9,53	24,2/3,36
CaO	5,56/0,85	3,93	33,2/4,61
MgO	1,88/0,29	1,67	4,7/0,65
TiO <sub>2</sub>	1,01/0,15	0,75	0,2/0,03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,68/0,10	0,48	0,1/0,01
Реакционная способность по CO <sub>2</sub> при 1000 °С, см <sup>3</sup> /(г·с)	0,47	2,39	5,47
Удельное электросопротивление по классу 6 – 3 мм, ρ = 0,2 кг/см <sup>2</sup> , Ом·см	3,9	19,7	–
Плотность, г/см <sup>3</sup> :			
действительная	1,952	1,833	1,697
кажущаяся	1,040	0,641	0,891
Пористость, %	46,7	65,0	47,5
Структурная прочность, %	87,4	73,1	55,7
Термическая стойкость, %	98,7	80,4	25,8

\* В числителе – содержание оксидов в золе, %, в знаменателе – то же, на 100 кг углерода, кг.

кокс имеет значительно более высокие реакционную способность и удельное электросопротивление. К положительным свойствам полукокса можно отнести и развитую пористую структуру [7].

Опытная кампания по выплавке силикомарганца марки МнС17 с заменой коксового орешка полукоksom была проведена в течение 25 дней. В качестве базового был взят месячный период работы печи при выплавке ферросиликомарганца марки МнС17 со следующим составом восстановительной смеси (на 600 кг марганцевой руды): 190 кг коксового орешка, 150 кг бурого угля. В течение базового периода работа печи была обычной и не имела существенных отклонений от нормального хода.

Во время опытной кампании испытаны три варианта шихтовки восстановительной смеси. Навеска полукокса составила в первом периоде 50 кг, во втором – 75 кг, в третьем – 100 кг.

Используемый полукокx произведен из бурых углей Канско-Ачинского бассейна, месторождение Итатское [8], технология разработана ООО «Сибтермо» (г. Красноярск). В основу технологии положен процесс

слоевой газификации угля на воздушном дутье в режиме «обратной тепловой волны». При этом собственно газификации подвергаются летучие компоненты угля, а скорость конверсии углерода регулируется подачей дутья. Посредством изменения режимных параметров можно вести как безостаточную газификацию топлива (остаток – только зола), так и газификацию только летучих компонентов угля, получая при этом твердый углеродсодержащий остаток – так называемый полукокx с низким (2 – 6 %) остаточным выходом летучих веществ, по данным сертификата SGS этот показатель составляет 3,8 % [4].

Опытную кампанию проводили с использованием марганцевой руды, химический состав которой следующий: для 150-кг колоши – 42,7 % Мn; 2,4 % Fe; 17,5 % SiO<sub>2</sub>; 6,94 % CaO; 0,211 % S; для 450-кг колоши – 38,44 % Мn; 3,28 % Fe; 5,68 % SiO<sub>2</sub>; 13,52 % CaO; 0,2 % S. Показатели работы печи опытной кампании приведены в табл. 2.

При проведении периода I была сделана попытка ведения технологии на восстановительной смеси, состоящей из 190 кг кокса и 50 кг полукокса в расчете на

## Показатели выплавки силикомарганца марки МнС17

Показатель	Значения показателя в период							
	Базовый		Опытный I		Опытный II		Опытный III	
Состав углеродистой части шихты, кг/колошу:								
кокс	190		190		110;		100	
полукокс	0		50		75		100	
уголь марки Б	150		0		100		100	
Производительность печи, баз.т/сут*	28,2/100,0		27,37/97		28,94/102,6		28,5/101	
Удельный расход электроэнергии, МВт·ч/баз.т*	5,18/100,0		5,42/104,6		5,22/100,7		5,04/97,2	
Удельный расход сырья, т/баз.т:								
марганцевая руда	2283,59		2031,27		2444,48		2238,12	
кварцит	617		920,46		1037,94		1074,61	
кокс	469,84		505,16		432,37		386,23	
уголь бурый	393,96		–		406,11		358,58	
полукокс	–		192,43		337,62		333,76	
Химический состав, %:	металла							
	Mn	Si	P	S	Mn	Si	P	S
	65,9	18,3	0,2	0,01	67,5	18,9	0,19	0,01
	Mn	Si	P	S	Mn	Si	P	S
	68,11	17,58	0,2	0,01	66,94	17,47	0,2	0,01
	шлака							
	MnO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	MnO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO
	14,2	46,27	24,55	3,45	18,17	47,42	25,23	3,02
	MnO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	MnO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO
	22,4	47,65	22,93	2,92	26,9	47,0	20,4	2,93

\* В числителе – абсолютное значение показателя, в знаменателе – относительное, в %-ном сравнении с базовым периодом.

600 кг марганцевой руды. Это в сравнении с базовым периодом привело к снижению на 3 % производительности печи и увеличению расхода электроэнергии на базовую тонну на 4,6 %, при этом значительно ухудшились электрические показатели работы печи (электроды поднялись вверх), также ухудшилась газопроницаемость колошника, в связи с чем в дальнейших опытных периодах к восстановительной смеси добавлялся бурый уголь.

По результатам периода II при работе на смеси из 110 кг кокса, 75 кг полукокса и 100 кг угля марки Б производительность печи возросла на 2,6 %, удельный расход электроэнергии на тонну практически не изменился в сравнении с базовым периодом (0,7 %), электрические показатели работы печи стабилизировались, газопроницаемость колошника восстановилась.

Итогами периода III (все составляющие шихты взяты по 100 кг) стало повышение производительности печи на 1 %, снижение удельного расхода электроэнергии на 2,8 %; электрические показатели работы печи не изменились, повысилась «запыленность» колошника, ухудшилась газопроницаемость.

По результатам проведенной кампании следует отметить, что с увеличением в навеске количества полу-

кокса возрастало содержание оксида MnO в шлаке, что указывает на неполное его восстановление (суммарное количество твердого углерода в восстановительной смеси не изменялось), увеличивалась «запыленность» колошника и дозировочного отделения.

По итогам первой опытной кампании с учетом всех факторов было определено, что оптимальная навеска полукокса в колоше составляет 70 кг. Во второй опытной кампании были проведены два периода: с использованием полукокса в количестве 70 кг и без него. Показатели работы печи этой кампании приведены в табл. 3. Усредненные показатели работы печи получены путем деления соответствующих расходных показателей на суммарную продолжительность кампании, массу выплаваемого металла, расход электроэнергии.

Из данных табл. 3 следует, что использование в навеске полукокса позволило повысить производительность печи на 8,85 % и снизить удельный расход электроэнергии на 3,3 %. Электрические параметры печи при использовании полукокса не изменились, химический состав металла соответствует ГОСТ.

**Выводы.** По результатам двух проведенных опытных кампаний установлено, что использование в восстановительной смеси полукокса положительно влияет

Показатели выплавки силикомарганца марки MnC17

Показатель	Значение показателя в опытный период							
	I	II						
Состав колоши, кг/колошу:								
марганцевая руда	600	600						
кварцит	125	125						
кокс	100	50						
полукокс	0	70						
уголь Б	130	130						
Производительность печи, баз.т/сут.	30,5	33,2						
Удельный расход электроэнергии, МВт·ч/баз.т	5,39	5,21						
Удельный расход сырья, т/баз.т:								
марганцевая руда	1969,5	2346,9						
кварцит	527,8	491,4						
кокс	304,8	183,5						
уголь бурый	459,7	454,8						
полукокс	–	271,4						
Химический состав, %:	металла							
	Mn	Si	P	S	Mn	Si	P	S
	68,92	17,24	0,2	0,01	69,89	16,5	0,2	0,01
	шлака							
	MnO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	MnO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO
	20,00	45,58	22,00	3,00	17,73	46,44	22,96	3,05

на технико-экономические показатели процесса получения силикомарганца марки MnC17, но при этом его количество в восстановительной смеси не должно превышать примерно 32,5 %. При увеличении этого количества технико-экономические показатели работы печи ухудшаются, снижаются электрические параметры работы печи, газопроницаемость колошника.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Электрические параметры и конструкции рудовосстановительных электропечей / В.И. Жучков, В.Л. Розенберг, К.С. Елкин, Б.И. Зельберг. – Челябинск: Металл, 1994. – 192 с.
2. Гасик М.И. Марганец. – М.: Металлургия, 1992. – 608 с.
3. Кулинич В.И., Пирогов В.И., Матвиенко В.А., Кожевников В.А. // Электротехнология. 2000. № 7. С. 19 – 22.
4. Степанов С.Г., Морозов А.Б., Исламов С.Р. // Красноярскэнергонадзор. 2003. Вып. 1.
5. Романенко Ю.Е., Рожихина И.Д. // Труды 16-й Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», Томск: САН ВШ; В-Спектр, 2010. С. 33 – 37.
6. Романенко Ю.Е., Рожихина И.Д., Нохрина О.И. // Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XIV Международной конференции / Под ред. В.Е. Рощина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. Ч. 1. С. 111 – 115.
7. Страхов В.М. – В кн.: Совершенствование производства ферросилиция на Кузнецком заводе ферросплавов. – Новокузнецк: изд. КЗФ, 1969. С. 74 – 81.
8. Еремин И.В., Боронец Т.М. Марочный состав углей и их рациональное использование: справочник. – М.: Недра, 1994. – 254 с.

© 2014 г. *Кашлев И.М., Сидоров А.В., Нохрина О.И.*  
Поступила 14 мая 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2014. Vol. 57. No. 12, pp. 11–15.

**THE CHOICE OF THE REDUCING AGENT IN THE MANUFACTURE OF SILICON-MANGANESE**

*Kashlev I.M.*<sup>1</sup>, *Cand. Sci. (Eng.), Chief Engineer*  
*Sidorov A.V.*<sup>1</sup>, *Foreman*  
*Nokhrina O.I.*<sup>2</sup>, *Dr. Sci. (Eng.), Professor*  
(kafamsf@sibsiiu.ru)

<sup>1</sup> LLC “SGMK Group” (37a, Kutuzova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654041, Russia)

<sup>2</sup> Siberian State Industrial University (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

**Abstract.** The paper presents the results of two experimental campaigns of silicon-manganese smelting brand MnS17 using coke nut and semi-coke as a reducing agent, produced from brown coal of Kansk-Achinsk basin on the technology, which is based on the slicing coal gasification process. The experienced campaign of silicon-manganese smelting was performed using a manganese ore containing 42.7 and 38.44 % of manganese in value in charge 1:3. The manganese content in the melted alloys were 65.9 – 68.11 %, silicon – 17.47 – 18.3 %. It was established that using restorative mixture of 80 % of coke and 20 % of semi-coke the technical and technological parameters of the process

deteriorated; with the introduction into restorative mixture of brown coal in the amount of 35 % at a flow rate of semi-coke of 27 % and coke of 38 % the electrical performance of the furnace stabilized, gas permeability of the furnace throat recovered. The best performance was achieved with the introduction into restorative mixture of semi-coke of 32,5 %, a further increase of its quantity affects the performance of the furnace.

**Keywords:** manganese ore, coke, semi-coke, specific energy consumption, reduction mix.

#### REFERENCES

1. Zhuchkov V.I., Rozenberg V.L., Elkin K.S., Zel'berg B.I. *Elektricheskie parametry i konstruksii rudovosstanovitel'nykh elektropetchei* [Electrical parameters and constructions of ore-reducing electric furnaces]. Chelyabinsk: Metall, 1994. 192 p. (In Russ.).
2. Gasik M.I. *Marganets* [Manganese]. Moscow: Metallurgiya, 1992. 608 p. (In Russ.).
3. Kulinich V.I., Pirogov V.I., Matvienko V.A., Kozhevnikov V.A. New approaches to melting technique management by slag and non-slag oxide reduction processes in conditions of working electric circuit. *Elektrometallurgiya*. 2000, no. 7, pp. 19–22. (In Russ.).
4. Stepanov S.G., Morozov A.B., Islamov S.R. New energy-saving ecologically pure receiving technology of carbonaceous sorbents in Krasnoyarsk. *Krasnoyarskenergonadzor*. 2003, Issue 1. (In Russ.).
5. Romanenko Yu.E., Rozhikhina I.D. Investigation of the electrical resistance of manganese ores. In: *Trudy 16-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Prirodnye i intellektual'nye resursy Sibiri"* [Proceedings of 16th International Academic and Research Conference "Natural and intellectual resources of Siberia"], Tomsk: SAN VSh; V-Spektr, 2010, pp. 33–37. (In Russ.).
6. Romanenko Yu.E., Rozhikhina I.D., Nokhrina O.I. Investigation of the softening temperature and the electrical resistivity of manganese ores. In: *Sovremennye problemy elektrometallurgii stali: materialy XIV Mezhdunarodnoi konferentsii* [Modern issues of electrometallurgy of steel: proceedings of XIVth International Conference]. Roshchin V.E. ed. Chelyabinsk: Izdatel'skii tsentr YuUrGU, 2010. Part 1, pp. 111–115. (In Russ.).
7. Strakhov V.M. The study of physical and chemical properties of mixtures of reducing agents for the smelting of ferroalloys. In: *Sovershenstvovanie proizvodstva ferrosilitsiya na Kuznetskom zavode ferrosplavov* [Improvement of ferrosilicon production at Kuznetsk ferroalloy plant]. Novokuznetsk: izd. KZF, 1969, pp. 74–81. (In Russ.).
8. Eremin I.V., Boronets T.M. *Marochnyi sostav uglei i ikh ratsional'noe ispol'zovanie: spravochnik* [Grade coal compositions and their rational usage: reference-book]. Moscow: Nedra, 1994. 254 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was performed within the frames of the project part of the state task of Russian Ministry of Education and Science in the sphere of research in 2014 / 2016.

Received May 14, 2014

УДК 621.771:621.74

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ВАЛКИ – ПОЛОСА ПРИ ПРОКАТКЕ ШИРОКОПОЛОЧНОЙ БАЛКИ В КЛЕТЯХ УНИВЕРСАЛЬНО-БАЛОЧНОГО СТАНА. СООБЩЕНИЕ 2

*Лехов О.С., д.т.н., профессор (MXLehov38@yandex.ru)*

Российский государственный профессионально-педагогический университет  
(620012, Россия, г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)

**Аннотация.** Изложена методика и результаты решения задачи определения поля температур и термоупругих напряжений в горизонтальных валках при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана. Поставлена и решена задача определения поля температур бандажированных валков. Представлен алгоритм определения термоупругих напряжений в горизонтальных валках известному полю температур. Приведены эпюры тангенциальных термоупругих напряжений по сечению горизонтального валка при прокатке балок в универсальной клетке. Показано влияние коэффициента теплоотдачи при охлаждении валков водой на уровень тангенциальных напряжений. Теоретическими исследованиями установлена величина растягивающих тангенциальных напряжений, снижающих стойкость горизонтальных валков универсальных клеток. Определено суммарное поле напряжений в горизонтальном бандажированном валке от усилия прокатки и циклического температурного воздействия с учетом остаточных напряжений. Приведены рекомендации для повышения стойкости бандажированных валков универсально-балочного стана.

**Ключевые слова:** широкополочная балка, прокатка, напряженно-деформированное состояние, вертикальные и горизонтальные валки, метод конечных элементов, модуль упругости, сопротивление пластической деформации, тангенциальные и радиальные напряжения.

В работе [1] были представлены результаты определения напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации, а также напряжения в валках от усилия прокатки.

Основными нагрузками, действующими на двухслойные горизонтальные валки, являются нагрузки, возникающие при посадке двухслойного бандажа на ось, циклическая нагрузка от усилия прокатки и циклическая температурная нагрузка, возникающая в процессе работы валка. Кроме указанных, в этих валках действуют еще остаточные напряжения, возникшие в области двухслойного бандажа при его изготовлении.

Используя аппарат линейной термической упругости, компоненты тензора напряжений, возникающие в горизонтальном бандажированном двухслойном валке, можно записать в виде суммы  $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{\delta} + \sigma_{ij}^{\Lambda} + \sigma_{ij}^P + \sigma_{ij}^T$ ,