

*Проценко М.Ю.,
к.т.н. Куберский С.В.,
к.т.н. Эссельбах В.С.
(ДонГТУ, Алчевск, Украина)*

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕГИРОВАНИЯ МЕТАЛЛА ФЕРРОСПЛАВАМИ И МЕТОДОМ ДУГОВОГО ГЛУБИННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Проведено аналіз основних статей витрат, що мають місце при легуванні рідкого металу методом дугового глибинного відновлення й показана його досить висока ефективність у порівнянні з використанням традиційних феросплавів.

Ключові слова: *дугове глибинне відновлення, шлак силікомарганця, марганець, кремній, витрати, феросплави, легування.*

Проведен анализ основных статей затрат, имеющих место при легировании жидкого металла методом дугового глубинного восстановления и показана его достаточно высокая эффективность в сравнении с использованием традиционных ферросплавов.

Ключевые слова: *дуговое глубинное восстановление, шлак силикомарганца, марганец, кремний, затраты, ферросплавы, легирование.*

При производстве продукции из черных металлов образуется значительное количество шлаковых отвалов, занимающих большие площади и оказывающих негативное влияние на экологическую обстановку. Переработка и утилизация шлаков является актуальным и обязательным элементом безотходной технологии, так как способствует ресурсосбережению, а также снижению загрязнений водного и воздушного бассейнов. Особого внимания заслуживают отходы ферросплавного производства, которые содержат значительное количество ценных компонентов, используемых для рафинирования и легирования железоуглеродистых расплавов [1].

Актуальным вопросом, на сегодняшний день, является использование ферросплавных отходов в технологических схемах производства чугуна и стали, что может способствовать снижению расхода основных сырьевых ресурсов и повышению конкурентоспособности металлопродукции на внутреннем и мировом рынках.

На данный момент проведено достаточно большое количество исследований по изучению целесообразности использования ферросплавных шлаков в агломерационном, доменном и сталеплавильном процессах.

При замене марганцевой руды (Mn 27,6%; Fe 3,6%; SiO_2 32,9%; CaO 5,08%) шлаком (Mn 15,97%; Fe 2,06%; SiO_2 33,06%; CaO 34,08%) в количестве 45,5 кг/т агломерата имеет место к снижению расхода марганцевой руды на 32,7 кг/т и флюса на 12,1 кг/т готового агломерата. Выход мелкой фракции 0-5 мм при этом сокращается с 14,7 до 13,8%, а удельная производительность агломашины увеличивается на 3,5%. Выплавка чугуна на таком агломерате дает положительный экономический эффект за счет снижения расхода марганцевой руды, флюса и улучшения качества агломерата.

Ввод в агломерационную шихту гранулированных шлаков ферромарганца и силикомарганца при любом количестве концентрата в шихте улучшает качество агломерата, снижая в нем содержание мелочи фракции 0-5 мм на 1,0-2,8%, что не только компенсирует перерасход кокса от увеличения выхода шлака, но и позволяет получить некоторую его экономию.

При использовании в доменной плавке шлака силикомарганца, содержащего 7% сплава снижается себестоимость выплавки чугуна.

Достаточно перспективным направлением является использование марганцевых шлаков в сталеплавильном производстве. Наибольший интерес в этом плане представляют ковшовые остатки шлаков, содержащие до 20-30% марганца. Часть ковшовых остатков перерабатывается вместе с жидкой частью шлака на щебень и отгружается металлургическим предприятиям для выплавки чугуна. Однако большое количество шлаковых коржей от производства ферромарганца и силикомарганца вывозят в отвал. Введение 1 кг ковшовых остатков шлака заменяет 0,273 кг ферромарганца [2].

Высокий экономический эффект получается при использовании ферросилициевых шлаков для раскисления и внепечной обработки стали [2]. Шлаки от выплавки ферросиликохрома по свойствам и составу аналогичны шлакам производства ферросилиция. Они содержат до 30-40% включений сплава, 10% карбида кремния и практически полностью используются при выплавке передельного феррохрома. Кроме того, шлаки ферросиликохрома могут эффективно использоваться для легирования стали и сплавов.

Промышленные испытания показали принципиальную возможность применения в конвертерной плавке ковшовых остатков шлака при выплавке всего сортамента стали практически из безмарганцовистого

(Mn менее 0,05%) углеродистого полупродукта, а также для легирования стали в ковше взамен стандартных марганцевых ферросплавов.

Таким образом, анализ различных видов отходов производства ферросплавов показал, что достаточно ценным металлургическим сырьем могут быть шлаки от производства марганцевых и кремневых ферросплавов содержащие более 10% марганца и около 25% кремния, широко используемых для раскисления и легирования железоуглеродистых расплавов.

В предыдущих работах [1,3] предложен метод переработки отходов ферросплавного производства с использованием дугового глубинного восстановления (ДГВ), входящих в их состав полезных элементов непосредственно в железоуглеродистый расплав. Однако в данных работах проанализирована эффективность процесса только лишь с точки зрения затрат основных шихтовых материалов и электроэнергии. На проведенных экспериментах, при легировании чугуна Mn и Si, затраты на электроэнергию составили 43-66% (среднее 55,6%) от стоимости выпечной обработки, что свидетельствует о достаточно высокой конкурентоспособности предложенного способа.

Такой вывод авторами этих работ был сделан на основании анализа калькуляций себестоимости процесса производства марганцевых и кремневых ферросплавов. Доля затрат на шихтовые материалы в себестоимости марганцевых и кремневых ферросплавов составляет 35-40% и такая же доля затрат связана с расходом технологической электроэнергии. 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%.

Цель данной работы заключалась в проведении анализа основных статей затрат имеющих место при обработке жидкого металла методом ДГВ и с использованием традиционных ферросплавов.

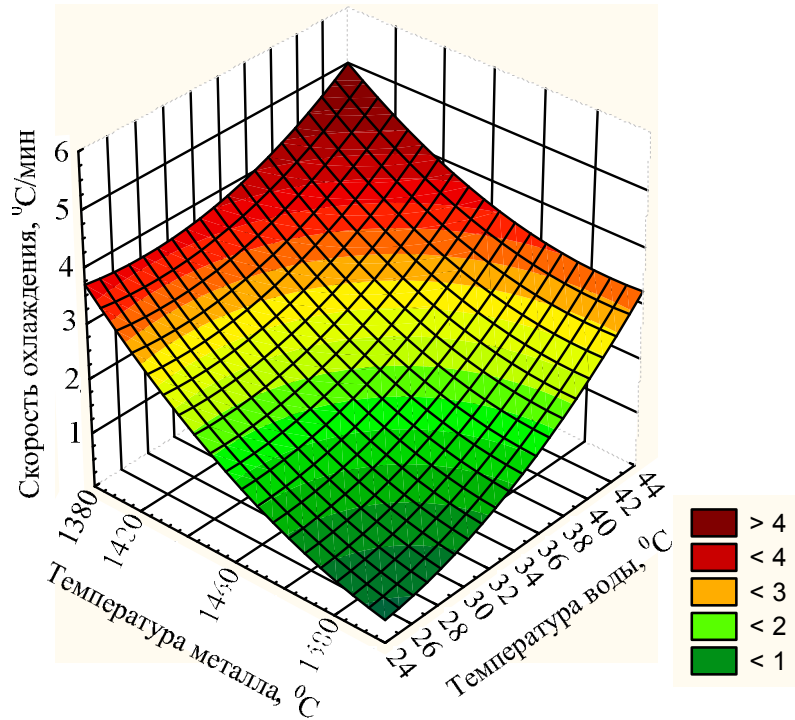
Сущность предложенного метода ДГВ заключается в восстановлении полезных элементов из определенного вида сырья в зоне электрической дуги с использованием различных восстановителей. В настоящих исследованиях использовался наиболее распространенный, доступный и дешевый карботермический метод восстановления с использованием в качестве восстановителя боя графитовых электродов. Для дугового глубинного восстановления марганца и кремния из металлургических отходов была проведена серия опытов с использованием жидкого расплава. В качестве основного сырья в рудновосстановительной смеси блоков использовали шлак производства силикомарганца и шлам доменного ферромарганца с различными добавками (FeSi, магнезит, доломит и известь) [3].

Практически все процессы доводки металлических расплавов до заданных параметров производят в ковше, поэтому для объективного сравнения данных технологий обработки были определены и учтены в сравнительных расчетах потери энергии в индукторе (сопротивление индуктора и потери с охлаждающей водой), а также на нагрев расплава в процессе обработки методом ДГВ. Это обусловлено отсутствием данных статей энергетических затрат при традиционной обработке расплава ферросплавами в ковше.

Для анализа рентабельности процесса дугового глубинного восстановления элементов в сравнении с технологией раскисления и легирования металлических расплавов ферросплавами было проанализировано 11 серий плавов с обработкой чугуна методом ДГВ в 60 кг индукционной печи (в общей сложности было израсходовано 42 рудно-восстановительных блока). В ходе проведенных исследований были отработаны технологические параметры обработки, усовершенствована конструкция рудно-восстановительных блоков, а также их химический состав.

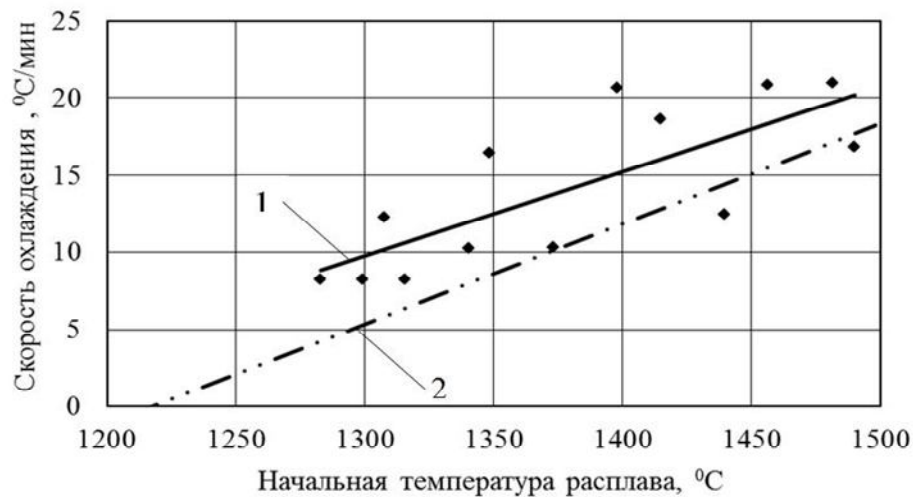
Потери электроэнергии на водяное охлаждение индуктора определялись как функция от начальной температуры расплава t_m и охлаждающей воды t_w (рисунок 1), а дополнительные энергозатраты на нагрев расплава по фактическим замерам его температуры до и после обработки методом ДГВ с использованием экспериментально установленной зависимости охлаждения расплава от начальной его температуры (рисунок 2). Полученные в ходе проведения опытных плавов результаты представлены в таблице 1.

При проведении опытных плавов масса металла в индукционной печи составляла $M_{мет} = 27,5-33,0$ кг, время обработки соответствовало $\tau_{ДГВ} = 4,53-15,55$ мин, за время обработки на разных опытах было израсходовано от 0,250 до 1,036 кг рудно-восстановительной смеси и 0,117-0,283 кг токоподводящих электродов (в т.ч. 0,099-0,239 кг стальной трубки), а общие затраты электроэнергии колебались в пределах $\Sigma Q_{ДГВ} = 0,760-1,914$ кВт·ч. Потери температуры при ДГВ составляли $\Delta t_m^{ДГВ} = 17-165$ °С, а определенные по зависимости, представленной на рисунке 2 для случая, если бы отсутствовал дополнительный нагрев металла электрической дугой (т.е. без ДГВ) находились в пределах $\Delta t_m = 38-229$ °С. На отдельных плавках наблюдалось остывание металла в процессе ДГВ, что свидетельствует о недостатке подводимой в зону дуги энергии.



$$\omega_m^{ДГВ} = 383,067 - 0,482956 \cdot t_m - 1,172772 \cdot t_e + 0,000153 \cdot t_m^2 + 0,000625 \cdot t_m \cdot t_e + 0,00552 \cdot t_e^2$$

Рисунок 1 – Зависимость скорости охлаждения чугуна в процессе ДГВ от начальной температуры расплава и охлаждающей воды



$$\omega_m = 0,0547 \cdot t_m - 61,321, R = 0,77; \omega_m^{без\ в.} = 0,0648 \cdot t_m - 78,886, R = 0,94.$$

Рисунок 2 – Зависимость скорости охлаждения расплава в индукционной печи от его начальной температуры:
 1 – экспериментальная с учетом потерь на водяное охлаждение;
 2 – расчетная за вычетом доли потерь с охлаждающей водой

Таблица 1 – Показатели проведенных опытных плавов процесса ДГВ

№ п/п	Начальная температура расплава, °С	Изменение температуры расплава при ДГВ (охлаждение “-“ и нагрев “+”), °С	Время обработки, мин	Затраты эл. эн. кВт·ч	Степень извлечения, %		Восстановлено, г		Затраты при обработке расплава, грн.		Снижение “-”, увеличение “+” себестоимости обработки, %
					Mn	Si	Mn	Si	ДГВ	ФС	
1	1275	2	4,53	0,760	24	83	9,0	33,0	0,532	1,024	-48,1
2	1365	47	7,58	1,206	31	25	27,0	24,0	0,827	1,234	-32,9
3	1498	84	6,83	1,047	21	15	15,0	12,0	0,482	1,067	-54,8
4	1340	40	7,3	1,073	24	22	16,5	16,5	0,695	0,797	-12,8
5	1440	99	12,25	1,426	59	-	62,0	-	0,576	1,533	-62,4
6	1381	53	7,30	1,376	45	12	43,4	16,1	2,286	1,392	64,3
7	1357	100	8,00	1,914	38	-	21,7	-	0,979	0,595	64,3
8	1415	70	9,53	1,243	38	24	39,0	24,0	3,977	1,574	152,8
9	1406	32	8,33	1,042	-	-	-	-	1,291	0,337	283,7
10	1415	25	6,75	0,879	21	4	26,5	5,9	0,856	0,941	-9,1
11	1431	37	7,25	1,037	23	3	20,6	2,9	0,935	0,810	15,3
12	1398	102	12,92	1,022	23	14	18,0	12,0	0,264	0,897	-70,6
13	1390	73	15,55	1,281	22	8	30,0	12,0	0,900	1,082	-16,8
14	1406	118	14,32	1,167	26	14	30,0	18,0	0,377	1,263	-70,2
15	1398	54	10,87	1,187	18	3	15,0	3,0	0,353	0,643	-45,2
16	1481	50	7,67	1,349	51	31	29,7	23,01	0,943	1,597	-41,0
17	1490	81	9,42	1,618	42	9	36,2	9,9	1,310	1,416	-7,5
18	1490	-11	5,58	1,183	82	-	34,0	-	1,108	1,107	0,1

В ходе проведения плавки снижение температуры расплава в процессе обработки за счет воды, охлаждающей индуктор, находилось в пределах 9-65 °С, что составляет более 20% общих потерь тепла, и можно ожидать повышения эффективности обработки на эту величину при реализации процесса в ковше, где нет водяного охлаждения.

Рассмотрим отдельный пример плавки № 2 и произведем сравнительный анализ эффективности легирования металла методом дугового глубинного восстановления и ферросплавами. Фактические изменения температуры в ходе процесса ДГВ, которые необходимо учитывать при сравнительной оценке разных технологий, будут определяться разностью потерь температуры при ДГВ и обработке ферросплавами с учетом потерь на водяное охлаждение. Для данной плавки общие потери температуры расплава за время обработки составили 66 °С, причем 40 °С (рисунок 1) теряется за счет воды, охлаждающей индуктор. На потери при обработке расплава в футерованной емкости (ковше) без водяного охлаждения приходится 26 °С. При отсутствии дугового нагрева в соответствии с рисунком 2 остывание расплава за время опыта могло составить 73 °С. Т.е. в результате легирования расплава методом ДГВ часть энергии расходовалась на нагрев металла, составивший $\Delta t = 47$ °С. Тогда общие потери энергии на дополнительный нагрев 30 кг металла

$$Q_{\text{эл-энерг.}} = M_{\text{мет}} \cdot C_{\text{мет}} \cdot \Delta t = 30 \cdot 0,2 \cdot 47 / 860 = 0,322 \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

где $C_{\text{мет}}$ – теплоемкость жидкого чугуна 0,2 ккал/кг·град.

При общих затратах электроэнергии 1,206 кВт·ч на весь процесс обработки, затраты электроэнергии на метод ДГВ составят 0,883 кВт·ч или 0,706 грн. при стоимости 1 кВт·ч 0,80 грн.

Затраты на материалы для изготовления рудно-восстановительных блоков рассчитывали в соответствии с расходом их на обработку, долей в составе шихты и стоимостью. Доля шлака в рудно-восстановительной смеси составляет 0,69, восстановителя – боя графитовых электродов 0,23, а связующего – жидкого стекла 0,08. Стоимость 1 т шлака была принята 80 грн.; боя графитовых электродов 2000 грн., а жидкого стекла 1747 грн. Затраты на израсходованные основные материалы блоков составят 0,390 грн.

Кроме того необходимо учесть стоимость сгоревшего комбинированного электрода, состоящего из металлической трубки (127 г) набитой внутри электродной смесью (23 г). В свою очередь доля измельченного боя графитовых электродов в электродной смеси составляет 0,71, (цена 2000 грн./т), доля каменноугольного пека в качестве связки 0,18 (цена 3500 грн./т) и доля балластной добавки в виде пудры магнезита 0,11 (цена 1000 грн./т). Таким образом общие затраты на материалы для изготовле-

ния комбинированных электродов составили 0,367 грн. Суммарные затраты на электроэнергию для ДГВ и материалы для изготовления рудно-восстановительных блоков составят 1,464 грн. Кроме того, был учтен прирост массы металла в процессе ДГВ за счет переходящей в расплав металлической трубки и восстановившихся элементов, который мы можем реализовать по цене готовой продукции (~4000 грн./т) и затраты на изготовления рудно-восстановительных блоков (приняты 10% от общих затрат на весь процесс обработки ДГВ), составляющие соответственно 0,712 грн. и 0,075. Таким образом, общие затраты на процесс обработки расплава в ковше методом ДГВ, для условий рассматриваемой плавки, составят 0,827 грн.

При доводке металла ферросплавами их расход рассчитывали по формуле (1)

$$Q_{\text{ФС}} = (M_{\text{эл.}} / \varepsilon_{\text{ФС}} / \gamma_{\text{эл.}}) \cdot C_{\text{ФС}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{эл.}}$ – масса восстановленного элемента, т;

$\varepsilon_{\text{ФС}}$ – доля основного элемента в ферросплаве;

$\gamma_{\text{эл.}}$ – доля усвоения элемента раскислителя, Mn = 0,85, Si = 0,75.

При условии, что стоимость 75% ферромарганца 14500 грн./т и 65% ферросилиция 15000 грн./т затраты на ферросплавы составят 1,334 грн. Однако ввод 1% ферромарганца охлаждает металл на 16-17 °С, а при окислении 0,1% Mn расплав нагревается на 8-10 °С [4], что в конечном счете приведет к снижению его температуры на 2,3 °С и увеличению стоимости обработки ферросплавами на 0,013 грн.

В расчетах теплового баланса процесса раскисления ферросилицием учитывали затраты тепла на его нагрев до температуры плавления и плавление

$$t_{\text{FeSi}}^{\text{охл.}} = \frac{C_{\text{FeSi}} / m_{\text{FeSi}} \cdot M_{\text{FeSi}} \cdot T_{\text{пл.}}}{M_{\text{мет}} \cdot 0,2} + \frac{S_{\text{превр.}} / m_{\text{FeSi}} \cdot M_{\text{FeSi}}}{M_{\text{мет}} \cdot 0,2} = 4,63 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где C_{FeSi} – теплоемкость 19,06 кал /моль·К;

m_{FeSi} – масса одного моля силицида железа, кг;

M_{FeSi} – масса ферросилиция, кг;

$T_{\text{пл.}}$ – температура плавления ферросилиция 1693 К;

$S_{\text{превр.}}$ – теплота превращения $\text{FeSi}_{\text{ТВ}}$ в $\text{FeSi}_{\text{жид.}}$ ккал/моль·К;

а также выделение тепла при растворении кремния в железе и его окислении

$$t_{FeSi}^{нагр.} = \frac{M_{Si} \cdot \Delta H_{Si \rightarrow Fe}}{M_{мет} \cdot 0,2} + \frac{Y_{Si} \cdot \Delta H_{Si \rightarrow SiO_2}}{M_{мет} \cdot 0,2} = 10,25 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где M_{Si} – масса несвязанного с железом кремния ферросилиция, кг;
 $\Delta H_{Si \rightarrow Fe}$ – энтальпия реакции растворения Si в Fe – 1022 ккал/кг Si [5];
 $\Delta H_{Si \rightarrow SiO_2}$ – энтальпия реакции окисления Si – 4888 ккал/кг Si [5];
 Y_{Si} – масса окисленного кремния при введении ферросилиция, кг.

Общий нагрев металла за счет растворения и окисления кремния ферросилиция за вычетом потерь на его нагрев и плавление составит 5,62 °С. Также учитывалось изменение затрат на обработку в результате прироста массы металла при раскислении ферросплавами которые составили 0,308 грн. (0,077 кг). Однако при минимальной длительности обработки ферросплавами в ковше 5 мин [4] снижение температуры металла составит 35 °С (40,6 °С охлаждение расплава за 5 мин (таблица 1) и 5,62 °С нагрев за счет ферросилиция), что потребует дополнительных затрат на нагрев 0,196 грн. Таким образом, суммарные затраты на обработку металла ферросплавами составили 1,234 грн., что на 0,406 грн. (32,9 %) выше расходов на внепечную обработку методом ДГВ.

Полученные результаты аналогичных расчетов, для опытных плавок, проведенных при переработке шлака силикомарганца, представлены в таблице 1.

При анализе опытных и расчетных данных таблицы 1 видно, что не на всех плавках был получен экономический эффект при использовании данной технологии для обработки металла в ковше. Анализ технологических параметров отдельных плавок позволил установить, что для плавок №6 и №8 характерна высокая стоимость восстановителя – ферросилиция. В опыте №7 и №11 в состав рудно-восстановительной смеси блока были введены соответственно известь и доломит, что требует больших энергетических затрат на обработку. Для увеличения основности рудной смеси за счет MgO в опыте №9 использовали магнетит, что могло привести к образованию шпинелей, препятствующих процессу восстановления и соответственно дополнительным потерям энергии. Опыт №18 показал, что ввод в рудную смесь CaO в виде извести способствует улучшению степени восстановления марганца за счет протекания реакций замещения, однако требует больших энергетических затрат.

Результаты, проведенной работы свидетельствуют о достаточно высокой эффективности процесса легирования металла марганцем и кремнием, восстанавливаемыми из шлака силикомарганца в зоне заглубленного в расплав дугового разряда. Такая технология может быть

вполне конкурентоспособной в сравнении с традиционным использованием ферросплавов.

Учитывая нестабильность степени извлечения элементов методом ДГВ довольно перспективным может быть получение жидких кремне-марганцевых лигатур с использованием их для обработки металла, особенно в ковшах малой емкости. В этом случае после определения химического состава жидкой лигатуры ее можно использовать для обработки расплава, что значительно повысит точность определения ее расхода, улучшит условия растворения при контакте двух жидких фаз и обеспечит минимальные теплотери.

Дальнейшие исследования будут направлены на стабилизацию энергетических параметров процесса и степени восстановления полезных элементов, восстанавливаемых из ферросплавных шлаков и отходов металлургического производства, а также разработку технологии получения жидких лигатур методом ДГВ и обработки ими железуглеродистых расплавов.

Библиографический список

1. Проценко М.Ю. Оценка эффективности использования электродугового легирования железуглеродистых расплавов марганецсодержащими отходами / М.Ю. Проценко, С.В. Куберский, С.Б. Эссельбах // Сборник научных трудов ДонГТУ. - 2010. - Вып. №30. – С.202–214.

2. Панфилов М.И. Переработка шлаков и безотходная технология в металлургии / М.И. Панфилов, Я.Ш. Школьник, Н.В. Орининский, В.А. Коломиец, Ю.В. Сорокин, А.А. Грабеклис. – М.: Металлургия, 1987. – 238 с.

3. Проценко М.Ю. Исследование параметров электродугового восстановления марганца и кремния из ферросплавных отходов/ Проценко М.Ю., Куберский С.В., Семирягин С.В. // Металлургическая и горно-рудная промышленность. – 2010. - №7. – С.169–170.

4. Бигеев А.М. Металлургия стали: [учебник для вузов, –2-е изд., перераб. и доп.] / А.М. Бигеев. – М.: Металлургия, 1988. - 480 с.

5. Зубов В.Л. Электрометаллургия ферросилиция / В.Л. Зубов, М.И. Гасик. – Днепропетровск: Системные технологии, 2002. –704 с.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Петрушовым С.Н.