

УДК 669.046.582.2

А.В. Харченко, доцент, к.т.н.

Д.А. Лаптев, аспирант

Д.А. Лупол, магистрант

С.В. Башлий, доцент, к.т.н.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И РАФИНИРОВАНИЯ

Запорожская государственная инженерная академия

Розроблено технологічну схему та проведено серію дослідницьких плавок на експериментальній установці, яка підтвердила доцільність застосування технології вторинного електротермічного легування та рафінування (ВЕЛР). Встановлено оптимальні електричні режими, а також закономірності впливу часу витримки, сили струму та напруги на хімічний склад металу та швидкість процесів, що відбуваються під час ВЕЛР. Показано, що застосування ВЕЛР для доведення сталі із вмістом кремнію до 0,75 % є економічно виправданим.

Ключові слова: метал, шлак, легування, рафінування, заряд

Разработана технологическая схема и проведена серия исследовательских плавок на экспериментальной установке, которая подтвердила целесообразность применения технологии вторичного электротермического легирования и рафинирования (ВЭЛР). Установлены оптимальные электрические режимы, а также закономерности влияния времени выдержки, силы тока и напряжения на химический состав металла и скорость процессов, происходящих при ВЭЛР. Показано, что применение ВЭЛР для доводки стали с содержанием кремния до 0,75 % является экономически оправданным.

Ключевые слова: металл, шлак, легирование, рафинирование, заряд

A technological scheme is elaborated and the series of the research melting are realized on the experimental setting which confirmed expediency of application of technology of the secondary electro-thermal alloying and affinage (SETAA). The optimal electric modes, and also conformities to law of influence of time of self-control, strengths of current and voltage on chemical composition of metal and speed of processes, what be going on at SETAA are defined. It is shown that application of SEAR for polishing steel with content of silicon to 0,75 % is economic justified.

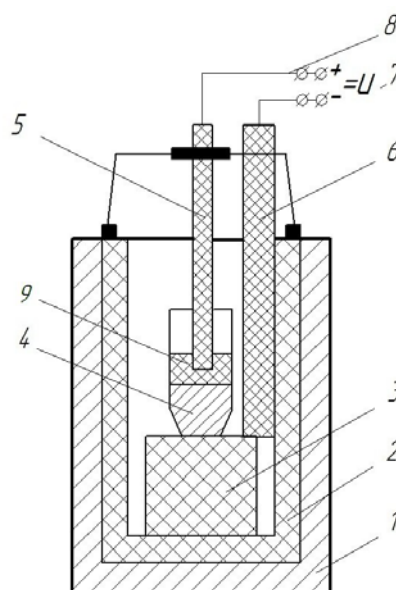
Keywords: metal, slag, alloying, affinage, charge

Введение. Анализ теоретических принципов и технологической схемы вторичного электротермического легирования и рафинирования (ВЭЛР) стали в установках «ковш-печь», выполненный в работе [1], показал перспективность данного метода внепечной обработки, направленного на экономию ферросплавов и дополнительное рафинирование расплава от серы и кислорода. В контексте многолетних исследований равновесия в системе «металл-шлак-газ» с использованием модели коллективизированных электронов [2-4], в частности, определения дифференциальных коэффициентов усвоения [5] для оптимального ведения плавки, раскисления-легирувания и внепечной обработки [6], данная технология приобретает особую значимость как один из вариантов практической реализации нового направления в теории металлур-

гических процессов.

Постановка задачи. В работе ставится задача проведения серии исследовательских плавов на экспериментальной установке с целью определения оптимальных параметров технологии ВЭЛР и изучения поведения отдельных элементов в данном процессе.

Основная часть исследований. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Для проведения плавов использовали флюс АНФ-28 следующего состава: CaF_2 – 44 %, CaO – 29 %, SiO_2 – 22 %, Al_2O_3 – 5 %. Шихту размещали в графитовые тигли (4) диаметром 40 и высотой 60 мм с коническим сужением в донной части. Состав шихты: 75 г стали Ст3, 75 г железного порошка (ЧДА) и 50 г флюса. Печь Таммана (1) предварительно прогревали на мощности 50...60 % от номинальной величины, а затем увеличивали ее до 90 % для достижения заданной температуры (1550 °С) в рабочем пространстве. Печь выдерживали 20 минут до полного расплавления шихты и приведения системы к равновесию. После этого подключали источник постоянного тока (7): «+» при помощи стальной проволоки (8) – к графитовому электроду-аноду (5), погруженному в шлаковый расплав, а «-» через графитовый электрод (6) и подставку (3) к токопроводящему графитовому тиглю (4). Для уменьшения попадания летучих компонентов шлака в воздух при проведении исследовательских плавов шахту печи накрывали листами асбеста.



1 - печь Таммана; 2 - шахта печи (графит); 3 - подставка (графит); 4 - тигель с расплавом (графит); 5 - электрод-анод (графит); 6 - электрод-катод (графит); 7 - источник постоянного тока; 8 - стальная проволока; 9 - шлаковый расплав

Рисунок 1 – Общий вид и схема экспериментальной установки ВЭЛР

Подаваемое напряжение варьировали от 12 до 30 В, а силу тока – от 1,5 до 5 А. Определяли вольт-амперную характеристику экспериментальной установки с расплавленным металлом и шлаком (рис. 2).

Как видно, зависимость силы тока от напряжения является нелинейной. При напряжении менее 8 В величина силы постоянного тока, протекающего в цепи «электрод-анод (5) - шлаковый расплав (9) - металлический расплав - графитовый тигель

(4) - электрод-катод (6)», была незначительной. Поэтому минимальное рабочее напряжение составило 12 В при силе тока 1,5 А.

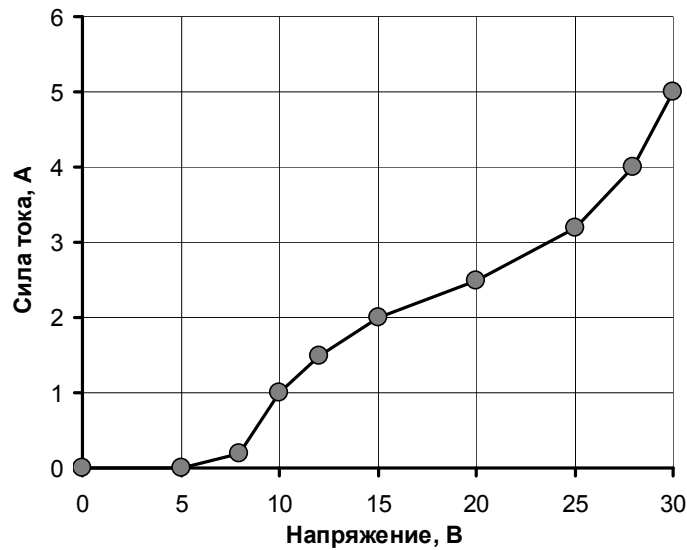


Рисунок 2 – Вольт-амперная характеристика экспериментальной установки с расплавленным шлаком

Расплав выдерживали под током от 20 до 35 мин. Заряд, который проходил через систему «металл-шлак», составил, таким образом, от 1800 до 10500 Кл при мощности от 18 до 150 Вт. После отключения напряжения от электродов печь Таммана выключали, извлекали графитовый электрод, а после охлаждения и образцы металла и шлака. Образцы металла зачищали с донной части на наждачном круге и направляли на химический анализ.

Результаты химического анализа образцов металла, выполненного на квантометрах «Spectrolab», приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты химического анализа, %

Содержание элементов	Номер плавки				
	1	2	3	4	5
углерод	2,20	2,15	1,67	1,55	1,30
марганец	0,17	0,19	0,22	0,22	0,24
кремний	0,088	0,570	0,640	0,840	0,980
алюминий	0	0,002	0,016	0,020	0,023
сера	0,043	0,035	0,027	0,019	0,018
фосфор	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005

Электрические параметры и технико-экономические показатели исследовательских плавов приведены в табл. 2. По данным табл. 1 построен график влияния заряда, пропущенного через шлак, на содержание элементов в металле (рис. 3).

Анализ полученных результатов. Поведение каждого элемента рассматривали согласно данным табл. 1 и рис. 3.

Углерод. При выдержке расплава в течение 20 мин. металл насыщается углеродом до уровня 2,2 % при взаимодействии с пористым графитовым тиглем. При пропускании тока через шлак содержание углерода в металле заметно снижается за счет

обратного процесса. Это объясняется позитивной валентностью углерода и положительной полярностью электрода, погруженного в шлак.

Марганец. Марганец при выдержке металла без тока (20 мин) частично окисляется и переходит в шлак в виде оксида MnO . При подаче тока этот же марганец восстанавливается. Однако из-за малого содержания оксида марганца в шлаке его изменения небольшие.

Таблица 2 – Электрические параметры и технико-экономические показатели опытных плавов

Параметры и показатели	Единица измерения	№ плавки				
		1	2	3	4	5
Выдержка	мин	20	20	30	30	35
Сила тока	А	-	1,5	2	4	5
Напряжение	В	-	12	15	28	30
Мощность	Вт	-	18	30	112	150
Сопротивление	Ом	-	8	7,5	7	6
Заряд	Кл	-	1800	3600	7200	10500
Использование электроэнергии	кВт·ч	-	0,006	0,015	0,056	0,088
Стоимость электроэнергии	коп	-	0,21	0,53	1,96	3,06
Выход кремния фактический	г	-	0,723	0,828	1,128	1,338
Выход кремния по Фарадею	г	-	0,131	0,261	0,522	0,762
Цена кремния (65 %)	грн/т	-	1888	4121	11294	14878

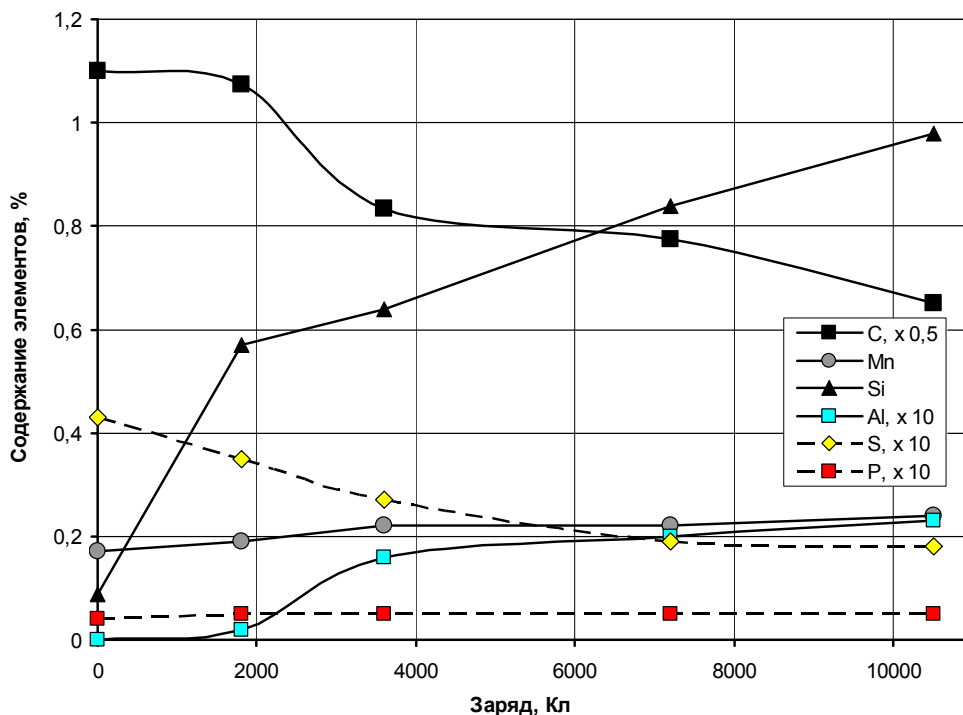


Рисунок 3 – Влияние заряда, пропущенного через шлак, на содержание элементов в металле

Алюминий. Алюминий начинает восстанавливаться до уровня порядка 0,02 % при пропущенном заряде более 3000 Кл. Однако на кривой электронейтральности алюминий находится ниже кремния [1] и количество восстановленного металла сравнительно невелико.

Сера. Сера имеет отрицательную валентность в шлаке, поэтому при пропуске через шлак тока положительной полярности она стремится перейти из металла в шлак. В результате содержание серы в металле в опытах 4 и 5 уменьшилось более чем в два раза. Следовательно, процесс восстановления элементов с положительной валентностью сопровождается дополнительной десульфурацией металла.

Фосфор. Изменение содержания фосфора в металле незначительно, так как, во-первых, на кривой электронейтральности он находится выше, чем кремний и алюминий, и смещение кривой электронейтральности при подаче положительного напряжения на электрод почти не влияет на данный элемент, а во-вторых, содержание фосфора в флюсе АНФ-28 очень низкое.

Кремний. Для детального рассмотрения поведения кремния рассмотрим график с нанесенной теоретической кривой в результате электролиза и согласно закону Фарадея (рис. 4):

$$m = \frac{M}{\nu} \cdot \frac{I \cdot \Delta\tau}{F}, \quad (1)$$

где m – масса выделившегося элемента, г; M – атомная масса элемента, г/моль; ν – валентность элемента; I – сила тока, А; $\Delta\tau$ – время выдержки, с; F – постоянная Фарадея, $F = 96485$ Кл·моль⁻¹.

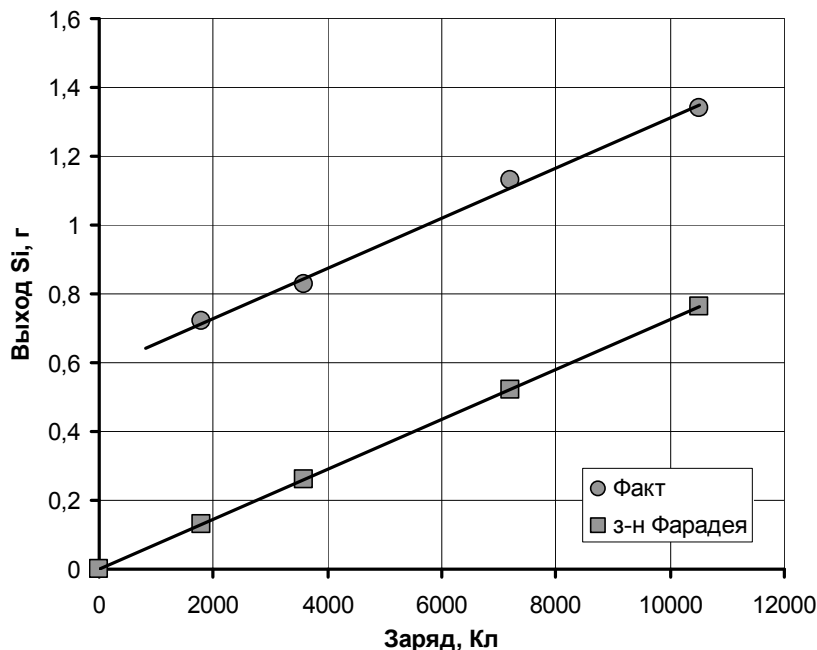


Рисунок 4 – График зависимости выхода восстановленного кремния от электрического заряда, пропущенного через шлак

Как и ожидалось, с увеличением заряда согласно закону Фарадея количество восстановившегося кремния, увеличивается. Однако, сравнение фактической кривой с теоретической, рассчитанной по закону Фарадея, показывает систематическое превышение восстановившегося количества кремния на 0,39 % по сравнению с теорети-

ческой величиной. Это указывает на то, что выход восстановившегося кремния имеет две составляющие: электролизную (по Фарадею) и равновесную в соответствии с кривой электронейтральности.

В табл. 2 на основании фактического количества восстановившегося кремния и фактического расхода электроэнергии приведена стоимость гипотетического материала с 65 % Si, который можно сопоставить с ферросилицием ФС65 по содержанию этого легирующего элемента. Как видно из приведенных данных, при конечном содержании кремния до 0,70 % цена такого материала значительно ниже цены ФС65, которая составила в сентябре 2013 г. \$ 950 (7790 грн) за одну тонну согласно данным Украинской ассоциации производителей ферросплавов [7].

Выводы. Серия экспериментальных плавов подтвердила, что применение вторичного электротермического легирования и рафинирования для доводки стали с содержанием кремния до 0,75 % является экономически оправданным. Более того, технология ВЭЛР и при более высоком содержании кремния в металле может быть экономически выгодной, если учитывать сопутствующую десульфурацию металла. Представляется целесообразным продолжение экспериментальных исследований технологии ВЭЛР для более детального изучения поведения других легирующих элементов и разработки основных параметров промышленной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харченко, А. В. Вторичное легирование и рафинирование стали в установках «печь-ковш» / А. В. Харченко, Н. В. Личконенко, Н. В. Горяйнова // *Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії.* – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2012. – Вип 1(26). – С. 17-21.
2. Пономаренко, А. Г. Вопросы термодинамики фаз переменного состава, имеющих коллективную электронную систему / А. Г. Пономаренко // *Журнал физической химии.* – 1974. – Т. 48, № 7. – С. 668-674; № 8. – С. 950-958.
3. Харченко, А. В. Экспериментальные основания термодинамической модели коллективизированных электронов [Текст] / А. В. Харченко, А. Г. Пономаренко // *Сборник научн. трудов ДонНТУ.* – Серия: *Металлургия.* – 2003. – Вып. 66. – С. 17-24.
4. Харченко, А. В. Термодинамическая модель многокомпонентной конденсированной фазы / А. В. Харченко, А. Г. Пономаренко, Е. Л. Корзун // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2004. – № 8 (237). – С. 135-139.
5. Харченко, А. В. Дифференциальные коэффициенты усвоения в компьютерных системах управления плавкой и внепечной обработкой стали / А. В. Харченко, А. Г. Пономаренко, С. В. Довгонюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2002. – № 10 (215). – С. 131-137.
6. Харченко, А. В. Термодинамическое моделирование системы «металл-шлак-газ» в системах управления раскислением, легированием и внепечной обработкой стали / А. В. Харченко, С. А. Будаква // *Труды IX конгресса сталеплавателей.* Старый Оскол, 17-19 октября, 2006 г. – М. : Черметинформация. – 2007. – С. 452-457.
7. Украинская ассоциация производителей ферросплавов. Аналитика. Обзор справочных и рыночных цен на ферросплавы [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.ukrfa.org.ua/analit.shtml>. – Загл. с экрана.

Стаття надійшла до редакції 19.12.2013 р.
Рецензент, проф. С.О. Гаврилко

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>