

*к.т.н. Куберский С.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА МАГНИЕМ, ВОССТАНОВЛЕННЫМ ПОД СЛОЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА

Наведено результати лабораторних досліджень процесу дугового глибинного відновлення магнію у рідкому чавуні та складено його матеріальний баланс. Результатами хімічного та металографічного аналізу підтверджено рафінування та модифікування чавуну відновленим магнієм

Ключові слова: *дугове глибинне відновлення, рафінування, магnezит, алюміній, дуговий блок, матеріальний баланс.*

Приведены результаты лабораторных исследований процесса дугового глубинного восстановления магния в жидком чугуна и составлен его материальный баланс. Результатами химического и металлографического анализа подтверждено рафинирование и модифицирование чугуна восстановленным магнием.

Ключевые слова: *дуговое глубинное восстановление, рафинирование, магnezит, алюминий, дуговой блок, материальный баланс.*

Определенный интерес при исследовании технологии десульфурации чугуна магнием, восстановленным под слоем металлического расплава представляет материальный баланс процесса.

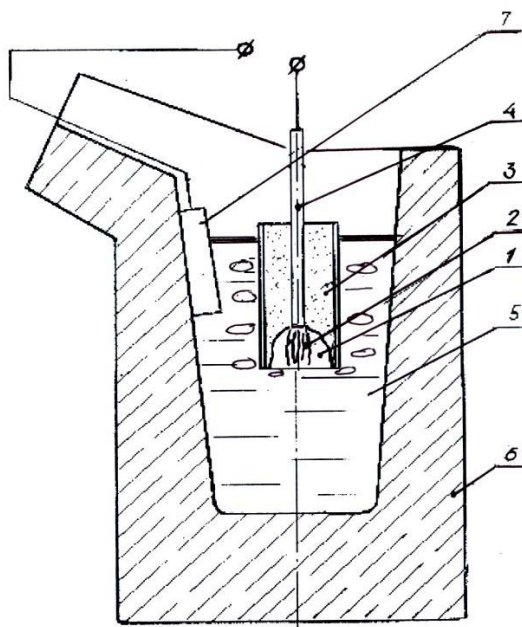
Как отмечалось в работах [1,2] для обработки чугуна по методу дугового глубинного восстановления (ДГВ) используется магnezит, алюминий, глинозем, токоподводящий графитовый электрод помещенный в металлическую трубку, каменноугольный пек, жидкое стекло и т.д. Расход материалов зависит от количества серы которую необходимо удалить при обработке расплава, температурных и электрических режимов процесса.

Для определения материального баланса обработки расплава методом ДГВ были проведены лабораторные исследования по десульфурации литейного чугуна в кислой тигельной индукционной печи емкостью 60 кг. Обработываемый литейный чугун содержал [C]=3,35%; [Si]=2,03%; [Mn]=0,8%; [S]=0,064%; [P]=0,1%. В качестве флюса использовали криолит в количестве 0,05 - 0,2 %. По расплавлению шихты

максимально удаляли шлак, чугун перегревали до 1400 °С, отбирали пробу и приступали к обработке.

Восстановительный блок изготавливался в соответствии с технологией описанной в работе [2]. В качестве токоведущей части применялся графитовый электрод в металлической обойме, выполнявшей функции клеммы при подключении источника напряжения к блоку. Скорость подачи блока в тигель и глубина погружения в металл регулировалась вручную и определялась максимальным значением сварочного тока на источнике питания и наблюдаемом на амперметре (поддерживался режим 250-300 А). Максимальная глубина погружения соответствовала длине рудной части блока (150 мм).

Схема обработки по методу ДГВ в индукционной печи представлена на рисунке 1.

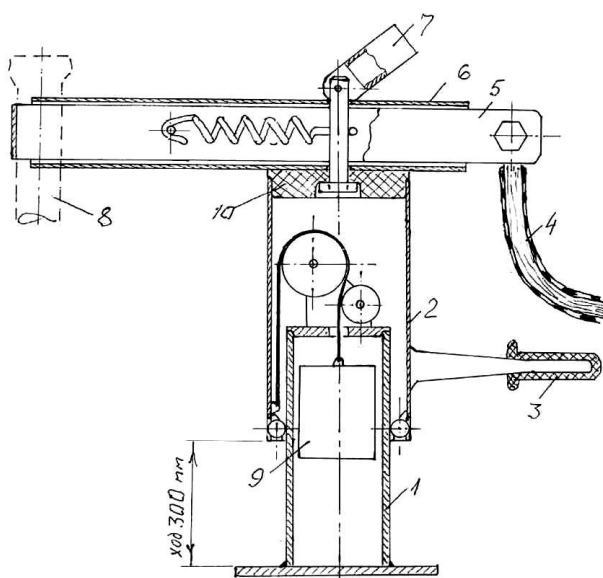


- 1 - каверна; 2 - электрическая дуга; 3 - рудовосстановительная смесь;
4 - токоподводящий электрод; 5 - расплав; 6 - тигель индукционной
печи; 7 - графитовый контакт.

Рисунок 1 – Схема обработки расплава по методу ДГВ

Стойку с электрододержателем (рис. 2) закрепляли на металлоконструкцию печи. В электрододержателе закрепляли дуговой блок, который перед началом обработки прогревали, выдерживая его над расплавом. После прогрева блока отключали индуктор печи. Включали питание дугового блока от источника сварочного тока ТИР-630 и осциллятор – возбудитель электрической дуги. Перемещая за рукоятку (рис. 2) подвижной стойки блок в вертикальной плоскости, зажигали дугу на поверхность расплава в тигле.

После того, как ток дуги выходил на заданный режим, погружали блок с работающей дугой вглубь расплава чугуна. Погружение производили ступенчато при появлении выплесков или пара магния с характерным белым цветом. Ток при обработке составлял 150-250 А (в разных опытах), напряжение холостого хода источника 125 В. Глубина погружения блока определялась по меткам, предварительно нанесенным на трубе 1 (рис. 2) с шагом 50 мм.



1, 2 – несущая труба; 3 – ручка; 4 – кабель; 5 – шинопровод; 6 – рукав;
7 – рычажный фиксатор рукава; 8 – держатель блока; 9 – противовес;
10 – эбонитовый изолятор.

Рисунок 2 – Устройство для обработки расплава в индукционной печи

Конструкция одноэлектродного дугового блока, рассчитанного на ДГВ магния с целью десульфурации чугуна в тигле 60-килограммовой индукционной печи, показана на рисунке 3. Блок содержит железную трубку – 1 диаметром 18×2,5 мм, электроизоляцию электрода – 2, углеродистую сердцевину электрода – 3, рабочую рудовосстановительную смесь – 4, инертную оболочку блока – 5, «пусковую» полость – 6.

Токоподводящая часть блока выполнена комбинированной, из железной трубки с углеродистой сердцевиной, чтобы во время работы блока омический разогрев электрода был минимальным. В зону высоких температур ток идёт преимущественно по железу. Вблизи дуги железная часть оплавляется, и дальше к дуге ток идёт по углероду. В зоне дуги электрод разогревается как от дуги, так и омически. Содержащаяся в углеродистой части присадка в нагретой до температуры более 2000 °С концевой части электрода газифицируется. Выделяющиеся газы дав-

лением изнутри разрушают электрод, и он расходуется синхронно с рабочей смесью 4.

Смесь 4 состоит из магнезита и алюминия в стехиометрическом соотношении. Температура восстановления магния из магнезита около 1500 °С. По мере разогрева обращённой к дуговому разряду поверхности рабочей смеси алюминий восстанавливает магний. Рабочая смесь расходуется, магний в газообразном состоянии выходит в расплав и расходуется на рафинирование и модифицирование чугуна.

Оболочка 5 сделана из шамотно-фосфатной смеси, газопроницаема и служит для тепловой и электрической изоляции зоны дугового разряда. Образующийся в дуговой полости пар магния может выходить в расплав как через открытую нижнюю поверхность, так и через поры в оболочке.

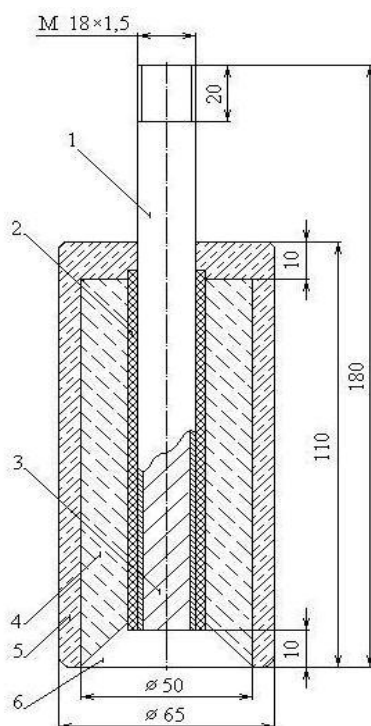


Рисунок 3 – Восстановительный блок ДГВ

По мере расходования материала дугового блока, что заметно по поведению металла в тигле, блок заглубляли дальше в расплав, стараясь не прерывать дугу. По ходу обработки, через каждые 20 секунд фиксировались промежуточные показания амперметра. К концу расходования рудовосстановительной части магний в виде белого дыма, представляющего собой окислившийся на воздухе пар магния, начинал улетать в атмосферу, через формовку в районе стыка трубки 1 и инертной оболочки 5 (рис. 3). В этот момент обработка прекращалась, отключался осциллятор и источник питания. Огарок блока извлекался для дальней-

шего исследования (визуальное исследование, взвешивание). Для анализов после отработки отбирали пробу чугуна и шлака. Обработанный чугун сливали в изложницу, получая слиток. Этот слиток после взвешивания служил шихтой для следующей плавки.

Общее время обработки фиксировалось хронометром и определялось промежутком от начала выхода дуги на рабочий режим (по показаниям амперметра) до момента отключения источника.

Остаток блока, извлеченный из расплава по окончании обработки, представлял собой оболочку 5 (рис. 3), ошлакованную на наружной поверхности тонким слоем затвердевшего шлака. Внутренняя поверхность каверны, образованная шлаковой твердой и хрупкой пленкой толщиной 1–2 мм (рис.4) была равномерно покрыта многочисленными очень мелкими газовыми раковинами, имеющими правильную круглую форму и средний диаметр 1 мм, что может объясняться процессом выделения газообразного продукта реакции с поверхности каверны.



Рисунок 4 – Торец восстановительного блока после сжигания

Содержание серы в чугуне определяли, на спектрометре СРМ – 25 (предел измерений 0-100%), состав шлака химическим методом согласно ДСТУ 3565-97, ДСТУ 3305.7, ДСТУ 3566-97, масса остатков материала огарка дугового блока определялась на технических весах ВЛКТ – 500 (предел измерений 0– 500), а расход материалов как разность исходного материала и материала огарка.

В таблицах 1, 2 представлены результаты обработки и анализ проб шлака, после обработки. На рисунках 5, 6 показана связь между расходом смеси, затратами электричества и степенью десульфурации.

Таблица 1 – Сводная таблица расхода восстановительных блоков при обработке 60-ти кг чугуна в индукционной печи

№ опыта	Расход смеси, г	Затраты электричества, кВтч	Содержание серы в чугуне, %		Степень десульфурации, %	Степень использования Mg, %
			S _{нач}	S _{кон}		
1	106	0,80	0,065	0,006	91	70
2	100	0,78	0,070	0,008	89	77
3	100	0,75	0,068	0,010	85	72
4	120	0,85	0,064	0,004	94	62
5	105	0,82	0,065	0,006	91	70
6	97	0,73	0,065	0,008	88	73
7	108	0,83	0,064	0,005	92	68

Таблица 2 – Химический состав шлаков после обработки, %

№ плавки	MgO+MgS	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	прочие
1	30,20	45,60	4,71	13,74	5,75
2	31,12	43,10	4,85	16,88	4,05
3	29,70	45,90	4,58	14,56	5,26
4	30,50	44,60	4,86	15,65	4,39
5	30,44	41,25	4,65	15,58	8,08
6	28,60	42,34	4,86	16,49	7,71
7	31,12	45,80	4,53	12,83	5,72

Из рисунка 5 видно, что с увеличением расхода электричества расходы смеси возрастают. Расход электричества колеблется в пределах 7 – 8 кВтч/кг смеси.

По зависимости степени десульфурации от расхода смеси (рис. 6) видно, что сера активно удаляется при высоких концентрациях.

Содержание [C], [Si], [Mn], [P] изменялось в незначительной степени, поэтому их значения после обработки не определялись.

По химическим анализам проб металла можно сказать, что содержание серы уменьшилось в пределах 85 – 94%.

Для подтверждения эффекта десульфурации и растворения магния (образование шаровидного графита) был проведен металлографический анализ проб. Характерная структура металла после обработки (плавка №7) представлена на рисунке 7.

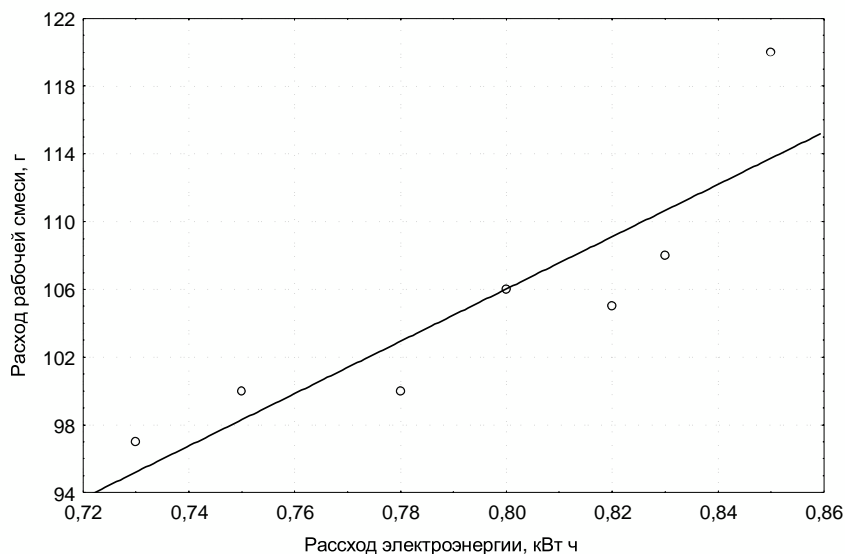


Рисунок 5 – Связь между расходом рабочей смеси и электроэнергией
 $y = -17,492 + 154,38 \cdot x$ ($r = 0,98$)

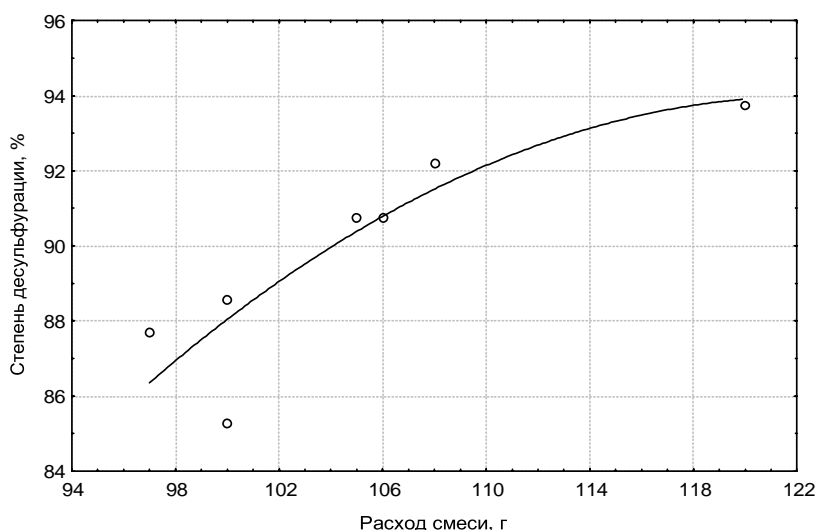


Рисунок 6 – Зависимость степени десульфурации от расхода смеси
 $y = -64,186 + 2,546 \cdot x - 0,01 \cdot x^2$ ($r = 0,84$)

Эффект получения шаровидного графита может быть только в случае глубокой десульфурации чугуна и получения остаточного содержания магния в металле в пределах 0,02 – 0,04 %, поэтому результаты анализа микрошлифа являются косвенным подтверждением полученного удаления серы.

Анализа рисунка 7 позволяет сделать следующие выводы:

- форма включений графита - шаровидная неправильная ШГф – 4.
- диаметр включений графита (мкм) – ШГд 40 – 90.
- распределение включений графита – равномерное ШГр – 1.

- количество включений графита (%) – ШГ12.
- дисперсность перлита ПД – 1,6.
- в структуре чугуна содержится 15% феррита и 85% перлита.

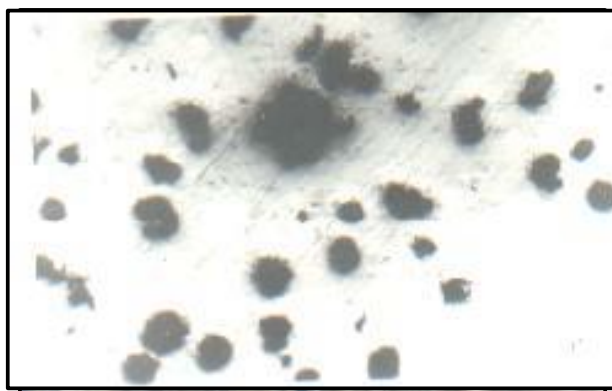


Рисунок 7 – Микрошлиф пробы чугуна после обработки

При составлении баланса материалов блока до и после обработки (таблица 3) расход материалов определялся относительно исходного содержания.

Таблица 3 – Баланс материалов блока до и после обработки

Наименование материалов дугового блока	Исходный блок		Остаток		Расходовано	
	кг	%	кг	%	кг	%
1. Рудно-восстановительная смесь, в том числе:	0,230	40,64	0,122	21,55	0,108	19,08
Магнезит	0,156	27,63	0,083	14,66	0,073	12,98
Алюминиевый порошок	0,051	8,94	0,027	4,74	0,024	4,20
Пековая связка	0,023	4,06	0,012	2,16	0,011	1,91
2. Электрод, в том числе:	0,186	32,86	0,081	14,22	0,106	18,64
Железная трубка	0,136	24,03	0,041	7,24	0,095	16,78
Графитовый стержень	0,050	8,83	0,040	6,98	0,011	1,86
3. Шамотная оболочка	0,150	26,50	0,120	21,20	0,030	5,30
ИТОГО	0,566	100	0,323	56,98	0,244	43,02

При расчете материального баланса принимались следующие допущения:

- весь алюминий, содержащийся в рабочей смеси расходовался на восстановление магния, а в результате реакции восстановления получался Al_2O_3 ;

– весь Al_2O_3 , содержащийся в графитовой части электрода восстанавливается углеродом до алюминия, участвуя в дальнейшем в реакциях восстановления магния;

– выход паров магния определялся по количеству израсходованного восстановителя;

– железо металлической трубки при плавлении переходит в металл;

– соединения CaO , SiO_2 и прочие, содержащиеся в материалах блока, переходят в шлак.

В таблице 4 приведен расчетный химический состав шлака после обработки. Отличия в экспериментальных и расчетных величинах магнийсодержащих компонентов шлака можно объяснить частичными потерями магния в результате окисления непрореагировавшей его части кислородом атмосферы. Это подтверждается химическим анализом белого налета образующегося на оборудовании используемом в ходе обработки, который состоит в основном из оксида магния.

Таблица 4 – Расчетная масса компонентов и химический состав образующегося шлака

Параметр	Компоненты шлака					Всего
	(MgO+MgS)	(Al_2O_3)	(SiO_2)	(CaO)	прочие	
Масса, кг	0,066	0,062	0,017	0,005	0,005	0,155
Содержание, %	42,67	40,29	10,85	3,22	2,96	100,0

На основании проведенных исследований и расчетов была предложена схема процессов, происходящих в реакционной зоне восстановительного блока при обработке чугуна магнием методом алюмотермического восстановления магнезита в глубине металлического расплава (рис. 8).

Тепло Q , выделяемое на дуге, обогревает поверхность (реакционной зоны) до температуры начала восстановления магния. На поверхности каверны развивается реакция алюмотермического восстановления магния, в результате которой образуется шлаковая пленка, содержащая оксид алюминия Al_2O_3 и пары магния. Пар магния диффундирует через шлаковую пленку, и создает избыточное давление P в реакционной зоне. Попадая в расплав, магний существует как в газообразном виде, так и в растворенном. Реакции образования сульфида магния происходят на поверхности пузыря, за счет поверхностной активности серы, и в объеме металла.

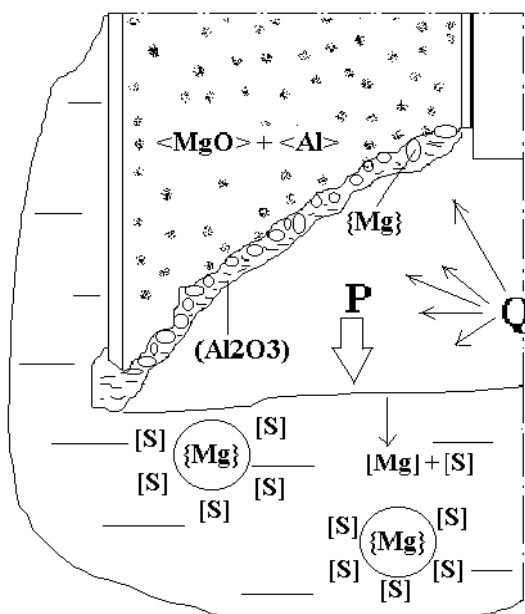


Рисунок 8 – Схема реакционной зоны восстановительного блока.

Таким образом, проведенные исследования позволили:

- оценить основные статьи материального баланса процесса дугового глубинного восстановления магния;
- установить связь между расходом рудовосстановительной смеси, затратами электричества и степенью десульфурации чугуна;
- предложить схему процессов, происходящих в заглубленной реакционной зоне при обработке чугуна магнием методом алюмотермического восстановления магния из магнезита.

Библиографический список

1. Семирягин С.В. Совершенствование конструкции и состава рафинировочных блоков процесса дугового глубинного восстановления/ С.В.Семирягин, С.В.Куберский, С.Б.Эссельбах, И.Н.Богрянцев, Д.Б.Васильев//– Алчевск ДГМИ. - 2003. – Сбор.науч.трудов. Вып. №17.– С. 283-292.

2. Разработка теоретических и технологических основ обработки жидких расплавов активными элементами с использованием сильных электромагнитных воздействий. Отчет по госбюджетной НИР №110 (№ гос.регистрации 0101U003569). ДГМИ. Алчевск, - 2003. - 132 с.

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