

*к.т.н. Куберский С.В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина,  
Skuberskiy@yandex.ru)*

## **РАЗНОВИДНОСТИ КОНСТРУКЦИИ БЛОКОВ ДЛЯ ДУГОВОЙ ГЛУБИННОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВОВ И ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ**

*Розглянуто різні конструкції дугових блоків, які використовуються в технологіях відновлення розкислювальних, легувальних і рафінувальних домішок в глибині металевого розплаву. Наведено області їх можливого застосування і основні результати, отримані в ході лабораторного та дослідно-промислового випробування нового способу позапічної обробки.*

**Ключові слова:** *дугове глибинне відновлення, конструкція блоків, металургійні відходи, розкислення, легування, рафінування, перемішування, нагрівання, ківш малої місткості.*

*Рассмотрены различные конструкции дуговых блоков используемых в технологиях восстановления раскисляющих, легирующих и рафинирующих добавок в глубине металлического расплава. Приведены области их возможного применения и основные результаты, полученные в ходе лабораторного и опытно-промышленного опробования нового способа внепечной обработки.*

**Ключевые слова:** *дуговое глубинное восстановление, конструкция блоков, металлургические отходы, раскисление, легирование, рафинирование, перемешивание, нагрев, ковш малой вместимости.*

Всемирный финансовый кризис наиболее чувствительно поразил металлургическую отрасль, что привело к существенно сокращению объемов производства и рынков сбыта металлопродукции. В условиях повышенной конкуренции еще более остро встают вопросы повышения качества металла и снижения его себестоимости. На качество и себестоимость чугуна и стали значительно влияет содержание вредных примесей и неметаллических включений, расход материалов и энергии. Поэтому одним из основных направлений развития современных технологических схем выплавки, внепечной обработки и разлива металла является снижение ресурсо- и энергозатрат, а также обеспечение высоких качественных показателей металлопродукции. Это достигается разработкой новых и усовершенствованием существующих технологий и оборудования, а также использованием вторичных материалов и отходов. Несмотря на наличие разнообразных технологий легирования и рафинирования железоуглеродистых расплавов поиск наиболее эффективных схем является достаточно актуальной задачей.

Легирование металла полезными добавками традиционно проводится с использованием ферросплавов, получение которых сопряжено с достаточно большими затратами энергии и материальных ресурсов. Для рафинирования и модифицирования железоуглеродистых расплавов широкое применение нашли различные кальциевые и магниевые сплавы, лигатуры, проволоки, гранулы и т.д. высокая стоимость которых приводит к значительному удорожанию металлопродукции. В последнее время появляются технологии, которые предусматривают использование вторичных сырьевых материалов, прежде всего металлургических шлаков, шламов, отходов огнеупорных материалов имеющих в своем составе ценные элементы в виде оксидов.

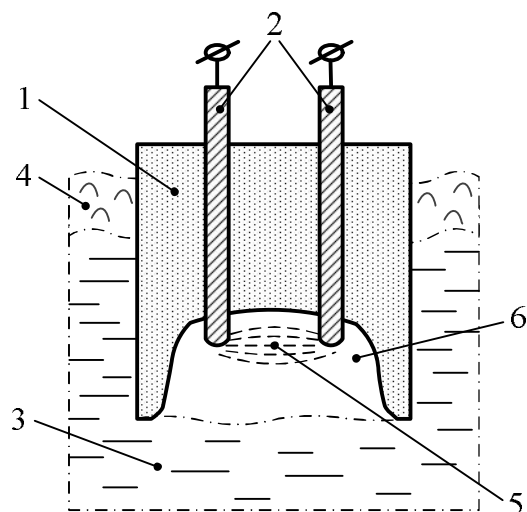
Одним из наиболее эффективных способов внепечного раскисления-легирования и рафинирования чугуна и стали с использованием металлургических отходов может быть относительно новый метод дугового глубинного восстановления (ДГВ). ДГВ позволяет извлекать магний, кальций, марганец, хром, ванадий, кремний непосредственно в металлический расплав из ме-

таллургических отходов и отвальных шлаков ферросплавного производства, горы которых продолжают расти, значительно ухудшая экологическую обстановку и негативно влияя на окружающую среду. Основным элементом в технологии ДГВ является рудно-восстановительный блок (РВБ). Поэтому основная цель данной работы заключалась в анализе конструктивных особенностей РВБ используемых для решения различных технологических задач металлургического производства.

Сущностью нового способа электродуговой обработки расплавов является совмещение процессов восстановления необходимых элементов под уровнем расплава в зоне низкотемпературной плазмы дугового разряда и последующая обработка ними металла с целью его рафинирования и раскисления-легирования. При этом обеспечивается более эффективный нагрев металла заглубленной в его объем электрической дугой. Такая технология исключает применение дорогостоящих реагентов, ферросплавов и лигатур, а также позволяет использовать относительно дешевые сырьевые материалы, содержащие полезные элементы в виде химических соединений (в большинстве случаев в виде оксидов).

Основной принцип реализации технологии ДГВ можно пояснить схемой представленной на рисунке 1. Одноразовый формованный рудно-восстановительный блок (РВБ) 1, состоящий из смеси восстановителя с восстанавливаемыми оксидами, снабжен электродами 2 и погружен в расплав 3 ниже уровня шлака 4. В нижнем торце блока 1 (рис. 1) между электродами 2 горит электрическая дуга 5. Дуга прожигает и проплавляет в блоке 1 каверну 6, на поверхности которой, обращенной к дуге 5, происходят эндотермические реакции восстановления. Энергия, необходимая для восстановления, поступает от дуги 5. Продукты реакций в газообразном или конденсированном виде поступают в расплав 3, насыщают его или реагируют с его примесями. Скорость расходования блока 1 опре-

деляется мощностью, потребляемой электрической дугой 5.



- 1 – рудно-восстановительный блок;
- 2 – электроды;
- 3 – расплав; 4 – шлак;
- 5 – электрическая дуга;
- 6 – каверна

Рисунок 1 – Принципиальная схема реализации процесса ДГВ

К существующим в металлургии аналогам, которые можно сопоставить с ДГВ, относятся процессы, реализуемые в рудно-термических печах при плавке под колошником, закрытым слоем шихты, например, при плавке ферросилиция. Поэтому оборудование, используемое для реализации процесса ДГВ, представляет собой по существу рудно-восстановительную микроэлектродную печь. В процессе ДГВ элементы восстанавливаются и поступают в расплав, минуя стадию производства ферросплавов и лигатур, а следовательно связанные с этим производством дополнительные затраты.

Процесс ДГВ может быть осуществлен по различным вариантам (рис. 2) каждый из которых имеет как достоинства, так и недостатки. Выбор варианта зависит от наличия необходимого технологического оборудования и решаемых в соответствии с технологией задач. В лабораторных условиях ДонГТУ были опробованы двухэлектродный (рис. 2, а) и одноэлектродный

варианты (рис. 2, б), которому впоследствии было отдано предпочтение. Для него легче изготавливать оснастку и удобнее формовать блоки. Цилиндрическая форма блока обеспечивает равномерное распределение тепла дуги по рудновосстановительной смеси и износ расходного блока. При погружении блока в расплав используется давление столба дуги, что позволяет обеспечить большее заглубление его под уровень обрабатываемого расплава. Но вместе с тем дуга в одноэлектродном блоке горит между электродом и поверхностью расплава, которая испытывает колебания. Поэтому в одноэлектродном варианте труднее поддерживать заданный режим горения дуги, поскольку регулировка выполняется вручную, как при ручной электросварке. Есть вероятность замыкания тока на расплав, что также относится к необходимости поддержания постоянным, насколько это возможно, дугового режима. Хотя использование современных средств автоматики может обеспечить решение этой проблемы.

В двухэлектродном варианте дуга горит независимо от поверхности металла, и регулировка режима горения дуги легче. Но блоки для двухэлектродного варианта делать сложнее, а износ материала блока менее равномерный по его поперечному сечению. Сотрудники кафедры металлургии стали НМетАУ, где также выполняются исследования по ДГВ, отдают предпочтение двухэлектродному варианту.

Реализованные ДонГТУ и НМетАУ варианты технологии ДГВ (рис. 2 а, б), работают от сварочных источников тока, а для осуществления ее на трехфазном токе требуется применение печного трансформатора.

Наиболее вероятными на наш взгляд являются следующие области применения ДГВ:

– рафинирование и модифицирование чугуна магнием, восстановленным в расплав из магнезита алюминотермическим или силикотермическим методом. Технологи-

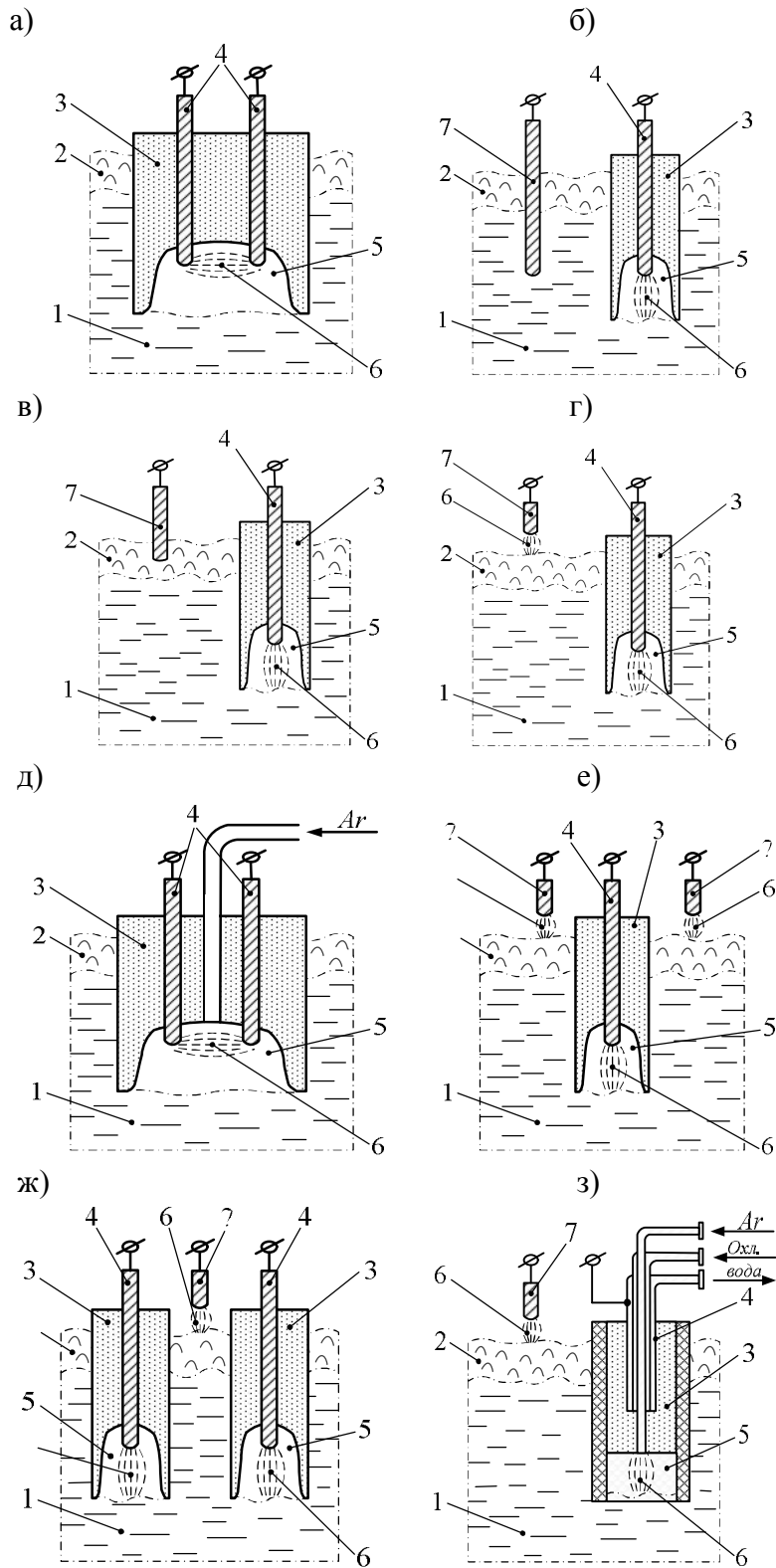
я реализована в лабораторных условиях ДонГТУ и НМетАУ и прошла опытно-промышленное опробование. Получение чугуна с шаровидной формой графита и глубокая его десульфурация достигаются без применения металлического магния в виде слитков или гранул [1-3];

– рафинирование стали кальцием, восстановленным в расплав, в том числе от фосфора, под фторидным шлаком [4], который может ассимилировать фосфид  $\text{Ca}_3\text{P}_2$ ;

– в ванне плавильного агрегата, например, в тигле индукционной печи для раскисления-легирования расплава восстановленными марганцем, кремнием, хромом, ванадием, титаном и т.д., а также получения лигатур, которые в последствии используются при доводке чугуна и стали до заданного химического состава, без традиционного использования ферросплавов. Полученная лигатура может применяться для подшихтовки как в жидком виде, так и в виде слитков;

– ДГВ является едва ли не единственным реальным способом доизвлечения марганца, хрома, ванадия и др. элементов из отвальных шлаков ферросплавного производства. Например, отвальный шлак силикомарганца содержит до 13 % марганца и утилизируется как щебень для дорожных работ, тогда как до 80 % марганца из этого шлака можно извлекать ДГВ;

– большие возможности варьирования технологическими операциями при доводке расплава до требуемых химического состава и температуры предоставляет использование в ДГВ трехфазного тока (рис. 2, е, ж). На каждой из фаз может работать по одному блоку. Блоки могут быть одинаковыми или разными по составу и выполняемым с их помощью технологическим операциям. Например, два блока работают на рафинирование расплава кальцием, а третий на насыщение ванны ванадием и т.д.;



1 – расплав; 2 – шлак; 3 – рудно-восстановительный блок; 4, 7 – токоподводящие электроды; 5 – реакционная камера; 6 – электрическая дуга;

Рисунок 2 – Варианты исполнения технологии ДГВ: а, д – двухэлектродный вариант без поддува и с поддувом Ar; б – одноэлектродный вариант при работе на переменном токе; в, г – одноэлектродный вариант при работе на постоянном токе; е, ж – одно- и двухэлектродные системы при использовании трехфазного тока; з – вариант с двумя дугами и поддувом Ar

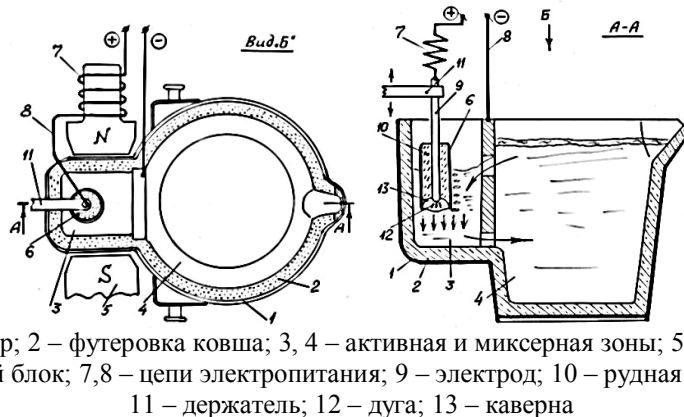
– система с тремя блоками ДГВ вместо штатных графитированных электродов способна обеспечить выполнение функций, которые характерны для агрегатов «ковш-печь» (АКП) большой металлургии. Это параллельное рафинирование, модифицирование, легирование и терморегулирование расплава. Такая система может быть эффективной для плавок стали и чугуна массой от 0,5 до 6-10 т при их проведении дуплекс-процессом, например, кислая электропечь в режиме плавления шихты, основная в режиме миксера, снабженного устройствами ДГВ. Энергетический и тепловой КПД дугового узла ДГВ больше, чем в традиционной электродуговой печи. Тепло дуги усваивается в глубине расплава. Излучение дуги не влияет на футеровку рабочего пространства, в котором происходит ДГВ. Обеспечивается более длительный срок службы футеровки, чем при электродуговом сталеплавильном процессе;

– поддув аргона в зону дугового узла ДГВ (рис. 2, д, з) позволяет интенсифицировать процессы тепло- и массопереноса из зоны химических реакций. Это способствует нагреву и насыщению ванны продуктами химических реакций, но усложняет технологию обработки и конструкцию РВБ. Несмотря на дополнительные неудобства, поддув аргона полезен также для стабилизации горения электрической дуги, а по выходе из зоны дуги аргон барботирует и перемешивает ванну, усиливая тепло- и массоперенос;

– вариант (в) (рис. 2), может быть использован при ДГВ на постоянном токе с

получением дополнительных преимуществ за счет электрохимического эффекта. Дуговой узел в блоке, как правило, катод, что позволяет интенсифицировать процессы восстановления марганца, кремния и других элементов. Второй полюс тока – анод находится в шлаке. В анолите имеется дефицит электронов и интенсифицируются процессы удаления серы и кислорода, что значительно увеличивает эффективность рафинирования. Аналогичный принцип работы характерен варианту (г) (рис. 2). Основное отличие его состоит в том, что второй полюс тока не погружен в шлак, и ток второго полюса поступает на поверхность шлака через дугу. Этот вариант удобен тем, что регулированию подлежат две последовательно включенные дуги, управление которыми вручную затруднено. В этом случае необходима разработка специального регулирующего устройства для поддержания мощности на каждой из последовательно подключенных дуг, которые питаются током от одного источника;

– перспективной представляется также схема, предусматривающая наложение скрещенных электрического и магнитного полей на расплав, в котором реализуется обработка по методу ДГВ (рис. 3). В этом случае возникающее электромагнитное утяжеление и вызванный им нисходящий поток тормозит восходящий поток восстановленных элементов, что увеличивает время их пребывания в расплаве и вероятность усвоения металлом до всплывания на поверхность и окисления кислородом атмосферы.



1 – ковш-реактор; 2 – футеровка ковша; 3, 4 – активная и миксерная зоны; 5 – электромагнит; 6 – дуговой блок; 7, 8 – цепи электропитания; 9 – электрод; 10 – рудная часть блока; 11 – держатель; 12 – дуга; 13 – каверна

Рисунок 3 – Совмещение метода ДГВ с электромагнитными воздействиями на расплав

В лабораторных и промышленных условиях метод ДГВ был реализован для десульфурации чугуна магнием, восстанавливаемым из магнезита и раскисления-легирования расплавов марганцем и кремнием, которые восстанавливали из силикомарганцевого шлака.

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

Токоподводящая часть блока выполнена комбинированной, из стальной трубки с углеродистой сердцевиной, чтобы во время работы блока омический разогрев электрода был минимальным. В зону высоких температур ток идёт преимущественно по стальной трубке. Вблизи дуги трубка 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  $2000^{\circ}\text{C}$  концевой части электрода газифицируется. Выделяющиеся газы давлением изнутри разрушают электрод, и он расходится по мере расходования рабочей смеси 4.

Смесь 4 состоит из магнезита и алюминия в стехиометрическом соотношении. Температура восстановления магния из магнезита около  $1500^{\circ}\text{C}$ . По мере разогрева обращённой к дуговому разряду поверхности рабочей смеси алюминий восстанавливает магний. Рабочая смесь расходится, магний в газообразном состоянии выходит в расплав и выполняет работу рафинирования и модифицирования чугуна.

Оболочка 5 сделана из шамотно-фосфатной смеси и является тепловой и электрической изоляцией зоны дугового разряда. Оболочка, как любой огнеупор, обладает газопроницаемостью. Образующийся в дуговой полости пар магния мо-

жет выходить в расплав, как через открытую нижнюю поверхность, так и через поры в оболочке.

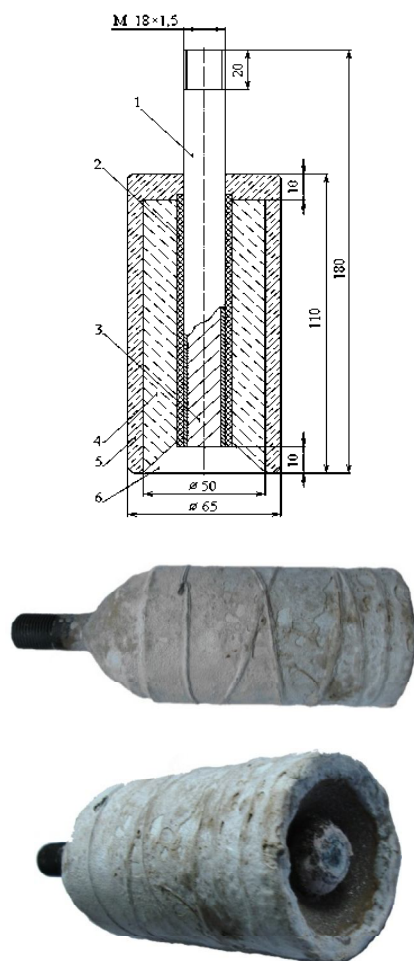


Рисунок 4 – Восстановительный блок для ДГВ магния

Таким образом, разработанный в ходе исследований дуговой блок:

- состоит из двух основных частей: токоподводящей, для организации дугового разряда и рудной, содержащей стехиометрический состав оксида и восстановителя;
- имеет достаточную строительную прочность и огнеупорность ( $1800-1900^{\circ}\text{C}$ );
- легко утилизируется или повторно используется;
- обеспечивает возможность массового производства из недефицитных материалов;
- представляет собой формованное изделие, содержащее в своем составе источник магния (магнезит) и восстановитель (алюминий) на связке каменноугольного пека в

соотношении 3,07:1:0,38 соответственно. Пек в сравнении с прочими связующими (жидкое стекло, фосфатные связки, цементы) дает достаточную термическую и строительную прочность;

– снабжен пусковой полостью – каверной в нижнем торце для создания реакционной зоны, упрощающей зажигание и поддержание дуги.

Токоподводящий электрод, предназначенный для работы в дуговом блоке, позволяет подводить в зону дуги необходимую для протекания процесса мощность. Для выравнивания скоростей расхода рудной части и электрода в состав электрода необходимо вводить присадку глинозема, играющую роль окислителя. Оптимальное содержание глинозема в составе электрода составляет 12-13 %. Для уменьшения потерь мощности, связанных с увеличением электросопротивления электрод помещается в металлическую трубку, а для исключения электропотерь через рудную часть дугового блока изолируется. Электродная масса состоит из стружки графитированных электродов, электродного каменноугольного пека и корунда в соотношении 7:2:1 соответственно.

Все сыпучие материалы, применяемые для изготовления дугового блока, должны иметь фракцию не более «минус 0,63», а набивку элементов дугового блока необходимо производить в горячей оснастке (100-150 °С) с последующим обжигом (для электродов при 650-700 °С, для рудной части при 280-300 °С).

В ходе исследований были установлены основные конструктивные параметры ДБ и технологические параметры обработки: наружный диаметр рудно-восстановительной смеси 50 мм, ее плотность  $2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, содержание глинозема в токоподводящем электроде 12-12,5%, плотность тока на электроде 2 А/мм<sup>2</sup>, глубина погружения блока в расплав 150-200 мм, сила тока на дуге 240-300 А, напряжение 50-40 В, анодное подключение ДБ (обратная полярность – анод на дуговом блоке). Степень десульфурации на опытных плавках составила 76-94 %.

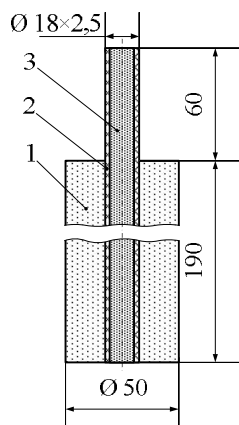
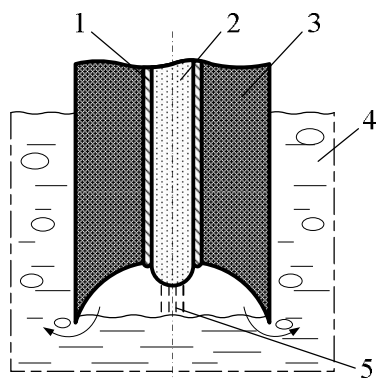
Полученные в ходе исследований данные позволяют утверждать, что предложенная технология дугового глубинного алюмини-термического восстановления магния из магнезита в зоне заглубленного дугового разряда является эффективным способом рафинирования и модифицирования чугуна, который может быть достаточно конкурентоспособным в сравнении с традиционными технологиями обессеривания железоуглеродистых расплавов. Результаты расчетов и промышленного опробования технологии ДГВ магния с целью десульфурации им чугуна показывают, что расходы на рафинирование металла от серы таким способом могут быть на 20-40 % ниже в сравнении с наиболее распространенной технологией десульфурации гранулированным магнием и флюидизированной известью.

Схема ДГВ марганца и кремния из силикомарганцевого шлака, а также ДБ используемые для такого способа обработки железоуглеродистых расплавов в тигле индукционной печи ИСТ-0,06 представлены на рисунке 5.

Содержание оксидов марганца и кремния в шлаке составляло 18-25 % 40-46% соответственно, а наиболее вероятной формой их существования являются силикаты, что значительно снижает ценность данного материала для различных металлургических технологий. На степень извлечения отмеченных элементов из металлургических отходов оказывает влияние ряд технологических параметров: состав сырья, вид восстановителя, шлаковый режим, конструкция ДБ, тепловые и энергетические параметры процесса и др.

Проведенные исследования показали, что высокая эффективность нового способа раскисления-легирования металла достигается при скорости расходования элементов ДБ 0,40-0,45 мм/с, для чего в состав токоподводящего комбинированного железо-графитового электрода вводили 11,0-12,0 % магнезита в качестве балластной добавки, плотность тока, обеспечивающая необходимую скорость расходования электрода составляет 2 А/мм<sup>2</sup>, диа-

метр рудно-восстановительной смеси ДБ 50-55 мм, а ее основность 1,4. Кроме того, для обеспечения высокой степени восстановления марганца (> 60%) и синхронизации расходования рудной и токоподводящей частей блока массовая скорость горения рудно-восстановительной смеси должна превышать массовую (линейную) скорость горения электрода на 60-62 %.



а)



б)

1 – стальная трубка; 2 – электродная смесь; 3 – рудно-восстановительная часть;  
4 – металлический расплав; 5 – столб дуги

Рисунок 5 – Схема процесса ДГВ и ДБ, исходный ДБ (а) и его огарок (б) после обработки

Для обеспечения высокой степени извлечения марганца и кремния из отвального шлака силикомарганца в расплав необходимо иметь начальную температуру обрабатываемого металла 1450-1500<sup>0</sup>С, работать на переменном токе 240-260 А, при напряжении 40-50 В, что позволяет обеспечить мощность подводимую в зону реакции более 10 кВт.

При соблюдении этих технологических параметров ДГВ возможна степень извлечения марганца 70-80 %, а кремния 20-65 % при скорости восстановления раскисляющих и легирующих элементов 0,01-0,02 %/мин. Себестоимость легирования железоуглеродистого расплава марганцем и кремнием для указанных пределов их извлечения на 10-40 % ниже в сравнении с традиционно используемой технологией легирования металла ферросплавами.

Данные способы выпечной обработки были реализованы при обработке чугуна и стали в тигле ИСТ-0,06, ковшах вместимостью 160 кг и 1т. Наибольший интерес они представляют для использования в условиях металлургических микро-заводов работающих с плавильными агрегатами и разливаемыми емкостями небольшой единичной вместимости. Традиционные агрегаты ковш-печь для выпечной обработки расплавов в ковшах менее 10 т практически не производятся. Широко используемые в большой металлургии способы обработки расплавов гранулированным магнезитом и различными проволоками малоэффективны для ковшей емкостью 0,5-6 т, что связано с небольшими их геометрическими размерами и большой скоростью остывания в них металла, а следовательно с необходимостью обеспечения большей температуры перед проведением заключительных операций. Для проволоки, как и для магнезита необходима большая глубина ввода, при использовании ферросплавов угар их тем выше, чем выше температура обрабатываемого металла. Поэтому метод ДГВ может быть успешно реализован для раскисления, легирования и рафинирования небольших порций железоуглеродистого расплава.



стых расплавов и позволяет одновременно решать три основные задачи внепечной обработки – раскисление-легиrowание (рафинирование) металла восстанавливаемыми непосредственно в него элементами, перемешивание расплава выделяющимися газообразными продуктами реакций восстановления и нагрев металла заглубленной в него электрической дугой [5, 6].

В результате проведенных исследований проанализированы различные конструкции дуговых рудно-восстановительных блоков используемых в технологиях дугового глубинного восстановления элементов, необходимых для реализации процессов раскисления, легиrowания, десульфурации и модифицирования железоуглеродистых расплавов. Рекомендованные конструкционные параметры ДБ и технологические параметры обработки с целью глубинного восстановления магния, марганца

и кремния могут служить исходными данными для проектирования технологии внепечного рафинирования и раскисления-легиrowания в условиях действующих металлургических предприятий. Приведенные данные свидетельствуют о высокой эффективности нового процесса ДГВ в сравнении с традиционными технологиями внепечной обработки расплавов. Наиболее целесообразно использование технологии ДГВ для обработки расплавов в металлургических емкостях небольшой единичной вместимости характерных металлургическим микро-заводам.

В ходе дальнейших исследований основное внимание предполагается уделить реализации процесса дугового глубинного восстановления и разработке новых конструкций дуговых блоков для извлечения ванадия и хрома из металлургических отходов и вторичных материалов.

#### **Библиографический список**

1. А.с. 1663942 СССР, МКИ С 21 С 1/100, В 22 D 27/20. Способ получения чугуна с шаровидным графитом и блок для его осуществления / С.Б. Эссельбах, А.И. Перевозчиков, Е.Б. Теплицкий и др. (СССР). – №427240/02; заявл. 01.07.87, Бюл. № 26 – 1991. ДСП.
2. Перевозчиков А.И. Электродуговое рафинирование и модифицирование чугуна / А.И. Перевозчиков, С.Б. Эссельбах, В.М. Кравченко // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – №7. – 1990. – С. 104.
3. Деклараційний патент на винахід 49408 А С21С 7/00. Пристрій для обробки розплавів / Куберський С.В., Дорофеев В.М., Эссельбах С.Б., Должиков В.В., Семірягін С.В. (Україна); Заявник та власник Донбаський гірничо-металургійний інститут (UA); Заяв. 03.12.01, опубл. 16.09.02 Бюл. №9.
4. А.с. 1827107 СССР, МКИ С 21 С 7/064 Способ рафинирования стали / Кравченко В.М., Дорофеев В.Н., Эссельбах С.Б. и др. / (СССР)-№4912901/02 заявл. 19.02.91, Бюл. № 25 – 1993. ДСП.
5. Куберский С.В. Электродуговое извлечение полезных примесей металлургических отходов и вторичных материалов в железоуглеродистые расплавы / С.В. Куберский // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 7. – С. 168 – 169.
6. Низяев К.Г. Десульфурация чугуна и стали магнием, восстановленным в зоне погруженной в металл электрической дуги / К.Г. Низяев, Б.М. Бойченко // Бюллетень НТЭИ. Черная металлургия. – 2007. – №11. – С. 34-39.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.**