

УДК 669.054:669.74

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

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ ДУГОВОГО РАЗРЯДА В РАСПЛАВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МАРГАНЦА И КРЕМНИЯ ИЗ СИЛИКОМАРГАНЦЕВОГО ШЛАКА

Определены температуры начала восстановления основных компонентов рудно-восстановительной смеси на базе шлака от производства силикомарганца при различном давлении в системе и показано незначительное увеличение значений этого термодинамического параметра при заглублении реакционной зоны в расплав на величину до 300 мм. Установлены зависимости, свидетельствующие о положительном влиянии уровня заглубления дуги в расплав на степень извлечения Mn и Si и скорость нагрева металла, а также показано, что оптимальное его значение для рудно-восстановительных блоков использованной конструкции и состава составляет 0,050–0,055 м и обеспечивает минимальный удельный расход электроэнергии на реализацию процесса дугового глубинного восстановления.

Ключевые слова: термодинамика, температура, восстановление, заглублённая дуга, избыточное давление, степень извлечения, скорость нагрева, расход электроэнергии.

В настоящее время наиболее распространённые способы раскисления-легирования и рафинирования железоуглеродистых расплавов предполагают использование различных ферросплавов и лигатур, производство которых является весьма энерго- и ресурсоёмким, а также сопряжено со значительными выбросами в атмосферу вредных веществ, образованием шлаков, шламов и других техногенных отходов.

Авторами работы [1] предложен принципиально новый метод дугового глубинного восстановления (ДГВ) для насыщения железоуглеродистых расплавов необходимыми полезными элементами, восстанавливаемыми из отходов и вторичных материалов непосредственно в объём жидкого металла в условиях низкотемпературной плазмы заглублённого дугового разряда.

В процессе ДГВ элементы восстанавливаются и поступают в расплав, минуя стадию производства ферросплавов и лигатур, а следовательно, и связанные с этим производством дополнительные затраты.

Кроме того, метод ДГВ позволяет совместить во времени важные операции раскисления, легирования, рафинирования, нагрева и гомогенизации, характерные заклю-

чительным этапам технологии производства чёрных металлов, а также обеспечить высокую энергетическую эффективность за счёт реализации указанных процессов в объёме высокотемпературного металлического расплава. При заглублении в расплав значительно возрастает КПД дуги, что обусловлено улучшением условий теплопередачи при организации её горения в замкнутом пространстве, а также использованием тепла материала электродов, который, разрушаясь, расплавляясь или испаряясь при сжигании, остаётся в жидком металле и отдаёт ему своё избыточное теплосодержание.

Данная технология была реализована в ковшах 0,16 т, 0,24 т, 0,4 т и 1,0 т литейных и металлургических микро-заводов для внедоменной десульфурации чугуна магнием, восстанавливаемым из магнезита, и раскисления-легирования железоуглеродистых расплавов марганцем и кремнием, восстанавливаемыми из отвального шлака от производства силикомарганца (ШМнС), и обеспечила снижение себестоимости обработки на 3–5 \$/т в сравнении с применением магниевой проволоки, гранул, ферромарганца, ферросилиция и силикомарганца. Кроме того, она может быть использована

на заключительном этапе получения заготовок из жидкого металла, а именно для обработки в промежуточном ковше МНЛЗ, что позволит управлять температурным режимом и увеличить эффективность раскисления, легирования и рафинирования металла многими элементами (в связи с более поздним их вводом).

Использование дуговой глубинной обработки расплавов на микро-заводах является также привлекательным с точки зрения наличия необходимых источников электроэнергии (печных трансформаторов), устройств для введения дуговых блоков в металл (электрододержатели), а также вспомогательных участков и отделений для их изготовления, характерных для машиностроительных и литейных цехов (участки по механообработке, дроблению, рассеву, смешиванию, формовке, сушке и т. д.).

По результатам исследований, проведённых при отработке технологии ДГВ, была разработана эффективная конструкция рудно-восстановительных блоков (РВБ), оптимизированы составы рудно-восстановительных смесей (РВС), предложены основные электрические и тепловые параметры, необходимые для реализации процесса в производственных условиях. Одним из важных и неизученных в настоящее время показателей, оказывающих существенное влияние на ход процесса ДГВ, является уровень заглупления РВБ и, соответственно, дугового разряда в объём обрабатываемого металла.

Поэтому основная цель данной работы предусматривала теоретический и экспериментальный анализ изменения степени извлечения полезных элементов РВС в металлический расплав, скорости нагрева металла и энергетических затрат на процесс ДГВ в зависимости от глубины расположения реакционной зоны, на которой протекают реакции восстановления необходимых для раскисления-легирования железоуглеродистого расплава примесей.

Из практики ковшевого нагрева стали в агрегатах ковш-печь известно, что экрани-

рование дугового разряда шлаком позволяет значительно улучшить условия передачи тепла металлу при минимальном его излучении на футеровку [2]. Аналогичная картина должна наблюдаться и при реализации процесса ДГВ. Однако в этом случае имеют место несколько отличительных моментов, не характерных для дугового нагрева. В первую очередь это реакции восстановления, протекание которых при повышении давления в системе требует больших энергетических затрат. С другой стороны, ранее проведённые исследования свидетельствуют о том, что заглупление реакционной поверхности благоприятно сказывается на процессах усвоения расплавом восстановленных элементов и особенно продуктов, выделяющихся в газообразном состоянии [1].

С учётом того фактора, что ШМnC состоит из различных оксидов (MnO , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO и т. п.), определённый интерес представляет оценка их теоретической температуры начала углетермического восстановления.

С этой целью из графика зависимости стандартного изменения энергии Гиббса от температуры для реакций образования оксидов металлов, представленной в работе [3], определяли ориентировочное значение температуры начала восстановления оксида MnO углеродом как точки пересечения соответствующих линий для ΔG_{MnO}^O и $\Delta G_{C/CO}^O$, которое составило $(T_{н.в.})_{MnO} = 1675 \text{ K}$.

Основной задачей данного расчёта являлось определение температурной зависимости ΔG_{MnO}^O и $\Delta G_{C/CO}^O$.

Температура плавления и кипения Mn составила $T_{пл.}^{Mn} = 1516 \text{ K}$, $T_{кип.}^{Mn} = 2423 \text{ K}$, а MnO — $T_{пл.}^{MnO} = 2058 \text{ K}$. Поэтому при температуре $T_{н.в.} = 1675 \text{ K}$ марганец находится в жидком состоянии, а оксид MnO — в твёрдом.

В работе [3] уравнение, связывающее ΔG_{MnO}^O с температурой, дано только до температуры плавления марганца. Поэтому при

расчете величины ΔG_{MnO}^O необходимо делать поправку на фазовые переходы:

$$2[Mn]_T + \{O_2\} = 2(MnO)_T \Delta G_1^O;$$

$$[Mn]_T \rightarrow [Mn]_{ж} \Delta G'_{nl.};$$

$$2[Mn]_{ж} + \{O_2\} = 2(MnO)_T \Delta G_2^O.$$

$$\Delta G_2^O = \Delta G_1^O - 2\Delta G'_{nl.}.$$

Значение ΔG_1^O в расчёте на 1 моль O_2 составит [3]:

$$\Delta G_1^O = 2(-385186 + 73,73T) =$$

$$= -770372 + 147,46T.$$

Учитывая поправку на плавление Mn, получим

$$\Delta G'_{nl.} = \Delta H_{nl.} - \frac{\Delta H_{nl.}}{T_{nl.}} T = 14640 -$$

$$-\frac{14640}{1516} T = 14640 - 9,66T.$$

Тогда для реакции образования MnO из жидкого марганца стандартное изменение энергии Гиббса составит

$$\Delta G_2^O = (-770372 + 147,46T) -$$

$$-2(14640 - 9,66T) = -799652 + 166,48T.$$

Для образования CO по реакции $2 <C>_T + \{O_2\} = 2\{CO\}_T$

$$\Delta G_{C/CO}^O = 2(-110560 - 89,875T) =$$

$$= -221120 - 179,75T.$$

Из полученных уравнений для температурной зависимости ΔG_2^O и $\Delta G_{C/CO}^O$ найдем значения коэффициентов M и N:

$$M_1 = -799652; \quad M_2 = -221120;$$

$$N_1 = 166,78; \quad N_2 = -179,75.$$

Подставляя эти значения в формулу для определения теоретической температуры начала восстановления MnO углеродом при стандартных условиях, получим

$$T_{н.в.}^O = \frac{M_2 - M_1}{N_1 - N_2} = \frac{-221120 - (-799652)}{166,78 - (-179,75)} =$$

$$= 1670 \text{ К или } 1397^\circ \text{С.}$$

Зависимость стандартного изменения энергии Гиббса от температуры для суммарной реакции восстановления марганца твёрдым углеродом будет иметь вид

$$\Delta G_T^O = 289266 - 173,265 \cdot T.$$

По данной методике были рассчитаны теоретические температуры начала восстановления марганца твёрдым углеродом, протекающие по различным схемам, и сопоставлены с литературными данными, которые представлены в таблице 1.

Как было отмечено выше, на величину температуры начала восстановления элементов значительное влияние оказывает давление в системе. Поэтому при давлении, отличном от атмосферного, её определяли в соответствии с методикой, описанной в работе [3], по формуле (1):

Таблица 1

Термодинамические параметры восстановления марганца

Источник	Реакция	ΔG_T^O , Дж/моль	$T_{н.в.}^O$, К
[4]	$MnO + C = Mn + CO$	$290786 - 173,466 \cdot T$	1673
[5]	$(MnO) + <C> = [Mn] + \{CO\}$	$272745 - 160,35 \cdot T$	1701
[6]	$3(MnO) + 3<C> = 3[Mn] + 3\{CO\}$	-	1693
Расчёт*	$(MnO) + <C> = [Mn] + \{CO\}$	$289266 - 173,265 \cdot T$	1670
	$(MnO \cdot SiO_2) + <C> = [Mn] + (SiO_2) + \{CO\}$	$352698 - 198,951 \cdot T$	1773
	$(MnO \cdot SiO_2) + (CaO) + <C> = [Mn] + (CaO \cdot SiO_2) + \{CO\}$	$408801 - 232,032 \cdot T$	1771

*активности всех участвующих в реакции веществ приняты равными 1, а давление в системе равно 10^5 Па.

$$T_{н.в.}^P = \frac{M_2 - M_1}{N_1 - N_2 + 38,31 \left(\frac{1}{y} \lg a_{(Me_xO_y)} - \frac{x}{y} \lg a_{[Me]} - \lg P \right)}, \quad (1)$$

где M_1 , M_2 и N_1 , N_2 — соответственно стандартные изменения энтальпии и энтропии для реакции образования оксида металла (индекс 1) и оксида восстановителя (индекс 2);

x и y — стехиометрические коэффициенты;

a — активность компонента;

P — давление в системе, 10^5 Па.

Теоретическую оценку возможной величины заглупления РВБ в металлический расплав производили по методике, приведённой в работе [7] для постоянного и переменного тока, подаваемого на комбинированный электрод блока. Комбинированный электрод, используемый в технологиях ДГВ магния, Mn и Si представлял собой стальную трубку, набитую электродной массой, состоящей из графитовой стружки с добавкой 12,5 % глинозёма или магнетита [1].

Для расчёта возможного уровня заглупления РВБ в железоуглеродистый расплав использовали формулу

$$h = \frac{\rho_{i,e}}{\rho g}, \quad (2)$$

где h — глубина заглупления электрической дуги в жидкий металл, м;

$\rho_{i,e}$ — теоретическое значение давления ионов на катод при работе на обратной полярности или электронов на анод при работе на прямой полярности, н/м²;

ρ — плотность металла, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, м/с².

Теоретическое значение давления ионов на катод при работе со стальным электродом на обратной полярности определяли по формуле

$$\rho_i = j_k \sqrt{\frac{\mu(2eU - 3kT_k)}{Ae^2}}, \quad (3)$$

где j_k — плотность электрического тока, А/м²;

μ — атомный вес элемента, г/моль;

e — заряд электрона, Кл;

U — падение напряжения, В;

k — постоянная Больцмана, Дж/К;

T_k — абсолютная температура, К;

A — число Авогадро, моль⁻¹.

Теоретическое значение давления электронов на анод при работе на прямой полярности определяли по формуле

$$\rho_e = j_a \sqrt{\frac{m_e(2eU_a - 3kT_k)}{e^2}}, \quad (4)$$

где j_a — плотность электрического тока, А/м²;

m_e — масса электрона, кг.

Рассматривая катодное и анодное подключение дуговых блоков (прямая и обратная полярность), необходимо отметить, что давление ионов на катод в несколько сотен раз больше, чем давление электронов на анод. Поэтому работая на обратной полярности, уровень заглупления дугового разряда в металл будет значительно больше. Это подтверждается результатами расчёта теоретической глубины погружения дуги со стальными и графитовыми электродами в жидкую сталь для плотности тока на электроде 1–2 А/мм², металлической ванне 0,07 А/мм², напряжения 35–55 В, температуры кипения железа и графита 3013 К и 5103 К соответственно.

По уравнению (3) давление ионов на катод составит

$$\rho_i = j_k \sqrt{\frac{\mu(2eU - 3kT_k)}{Ae^2}} = 2 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{\frac{56(2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 55 - 3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 3013)}{6,02 \cdot 10^{26} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}} = 15940 \text{ н/м}^2,$$

где j_k — плотность электрического тока ($2 \cdot 10^6$ А/м²);

μ — атомный вес железа (56 г/моль);

e — заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл);

U — падение напряжения (55 В);

k — постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

T_k — температура кипения катода (3013 К);

A — число Авогадро ($6,02 \cdot 10^{26}$ моль⁻¹).

Глубина погружения дуги в железоуглеродистый расплав при работе на обратной полярности, рассчитанная по формуле (2), будет равна

$$h = \frac{\rho_{i,e}}{\rho g} = \frac{15940}{7800 \cdot 9,8} = 0,208 \text{ м},$$

где ρ_i — теоретическое значение давления ионов на катод при работе на обратной полярности;

ρ_e — теоретическое значение давления электронов на анод для случая работы на прямой полярности.

Давление электронов на анод в соответствии с уравнением (4) составит

$$\rho_e = j_a \sqrt{\frac{m_e (2eU_a - 3kT_k)}{e^2}} = 7000 \cdot \sqrt{\frac{9,1 \cdot 10^{-31} (2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 55 - 3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 3013)}{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}} = 0,166 \text{ н/м}^2,$$

где j_a — плотность электрического тока (7000 А/м²);

m_e — масса электрона ($9,10938231 \cdot 10^{-31}$ кг).

Глубина погружения дуги в железоуглеродистый расплав при работе на прямой полярности будет равна

$$h = \frac{\rho_e}{\rho g} = \frac{0,166}{7800 \cdot 9,8} = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Результаты аналогичных расчётов, выполненных для заданных выше пределов

входящих в уравнения (2)–(4) параметров, представлены на рисунке 1.

Максимальное теоретически возможное заглупление дуги, равное 208 мм, получено при использовании стальных электродов, работе на постоянном токе обратной полярности, напряжении 55 В и плотности тока 2 А/мм². Поскольку используемый в процессе ДГВ электрод комбинированный и состоит из графитомagneзитовой электродной смеси, набитой в стальную трубку, теоретически возможное его заглупление в расплав не будет превышать величины, полученной для случая работы со стальным электродом.

В случае работы на переменном токе, когда катодом и анодом попеременно являются металл и дуговой блок, можно предположить, что заглупление дуги в жидкую сталь будет иметь среднее значение от суммы заглупления при работе на постоянном токе прямой и обратной полярности (анодном и катодном подключении). С учётом того, что в экспериментах использован комбинированный железографитовый электрод и по данным работы [1] дуга примерно одинаковые промежутки времени горит на стальную трубку и графитовую набивку, теоретически возможный уровень её заглупления будет характеризоваться значениями линии Ст.+Гр.2 рисунка 1.

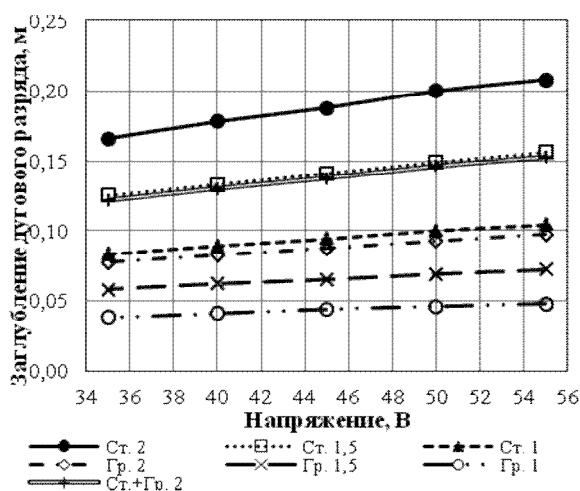


Рисунок 1 Влияние напряжения на дуге, материала электродов, рода и плотности тока на величину заглупления дуги

Результаты заглубления дугового разряда в железоуглеродистые расплавы, полученные авторами работ [8, 9], свидетельствуют о том, что при использовании близких к разрабатываемому процессу значений плотности и силы тока эта величина находится в пределах 150–300 мм.

Как было отмечено выше, повышение давления в системе влияет на температуру начала реакций восстановления. Поэтому было оценено её изменение для случая углетермического восстановления Mn и Si из оксидов и силикатов ШМnC при заглублении дугового разряда до 300 мм.

Давление в зоне каверны ($P_{\text{кав.}}$) при погружении РВБ под слой металлического расплава на 300 мм составит

$$P_{\text{кав.}} = P_{\text{атм.}} + P_{\text{мет.}} = 101325 + (0,30 \cdot 6900 \cdot 9,81) = 121632 \text{ Па или } 1,20 \text{ атм,}$$

где $P_{\text{атм.}}$ — атмосферное давление, равное 101325 Па;

9,81 — ускорение свободного падения, м/с²;

6900 — плотность металлического расплава (чугуна), кг/м³.

Теоретическая температура начала восстановления марганца с поправкой на увеличение давления в зоне каверны составит

$$T_{\text{н.в.}}^P = \frac{M_2 - M_1}{N_1 - N_2 - 38,31 \lg P} = \frac{-221120 - (-799652)}{166,78 - (-179,75) - 38,31 \cdot \lg 1,20} = 1684 \text{ К,}$$

или 1411 °С, что на 14 °С больше, чем для случая без заглубления реакционной зоны.

Аналогично были рассчитаны теоретические температуры начала восстановления для других оксидов, входящих в состав рудного сырья при стандартных условиях ($T_{\text{н.в.}}^0$) и с поправкой на увеличение давления в зоне каверны ($T_{\text{н.в.}}^P$), которые показаны на рисунке 2.

Представленные данные свидетельствуют о том, что заглубление РВБ под слой металла на 300 мм повышает теоретическую температуру начала восстановления основных компонентов шлака не более чем на 16 °С. Поэтому можно утверждать, что для рассматриваемых оксидов колебание уровня заглубления реакционной поверхности относительно зеркала расплава в исследованном диапазоне не оказывает существенного влияния на термодинамические параметры восстановления.

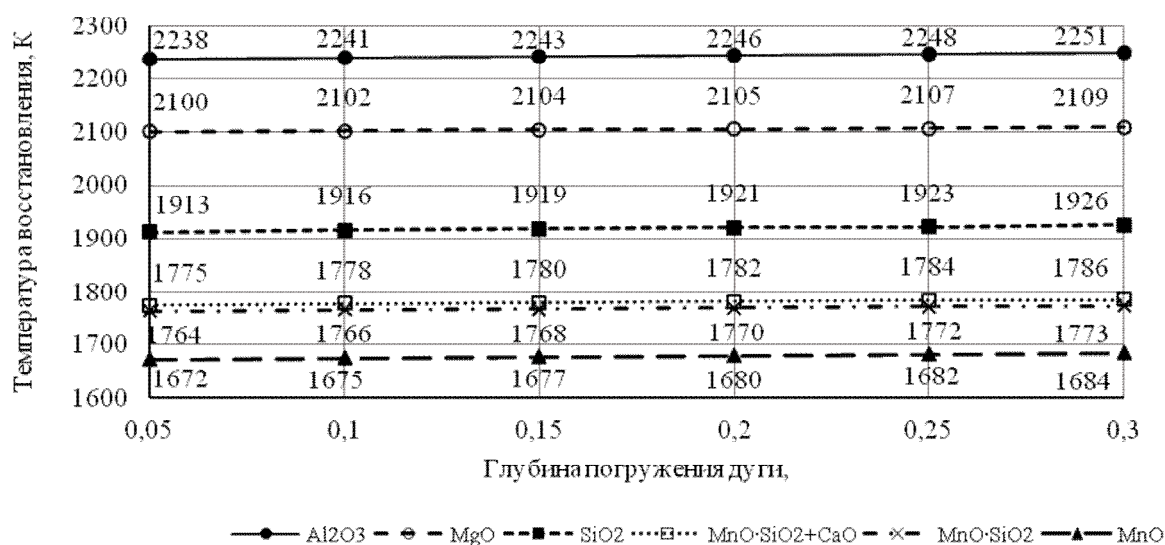


Рисунок 2 Влияние глубины погружения блока в расплав на температуру начала реакций углетермического восстановления

Для экспериментального изучения влияния заглубления РВБ в расплав на показатели процесса ДГВ Mn и Si из ШМнС было проведено 54 обработки чугуна и стали в индукционной печи ИСТ-0,06. Обработку 27,5–33 кг металла (среднее 30,4 кг) в течение 4–15 мин. (среднее 9 мин.) осуществляли на постоянном (обратной полярности) и переменном токе при его силе 180–350 А, напряжении 20–55 В, а уровень заглубления РВБ в расплав изменяли от 25 мм до 70 мм с шагом 5 мм (при заглублении 25 мм было проведено 3 обработки, 30 мм — 3, 35 мм — 4, 40 мм — 5, 45 мм — 11, 50 мм — 18, 55 мм — 2, 60 мм — 3, 65 мм — 2, 70 мм — 3).

В результате проведённых экспериментов были получены следующие средние значения основных технологических показателей: извлечение Mn — 0,495 моль (0,09 %), Si — 0,343 моль (0,03 %), скорость насыщения марганцем — 0,01 %/мин, кремнием — 0,0035 %/мин, нагрева — 6,4°C/мин.

Полученные в ходе экспериментов результаты позволили установить влияние величины заглубления РВБ в железоуглеродистый расплав на количество восстановленных элементов и скорость нагрева металла (рис. 3). Данные рисунка 3 свидетельствуют о том, что увеличение заглубления дугового разряда с 0,025 м до 0,070 м позитивно сказывается на двух основных показателях процесса ДГВ, а именно на количестве восстановленных для раскисления-легирования элементов и скорости нагрева расплава, которые возрастают в 4,1 и 1,8 раза соответственно.

При реализации данной технологии основная задача сводилась к углетермическому извлечению из шлака Mn, а Si восстанавливается попутно и может даже выступать в качестве дополнительного восстановителя. Поэтому все основные технологические параметры (температура расплава перед обработкой, состав, основность, электропроводность и другие свойства РВС) были ориентированы на максимальное насыщение расплава марганцем,

что и имело место по результатам лабораторных и промышленных экспериментов. Однако отмечено, что при большем заглублении разница в количестве восстановленных молей Mn и Si значительно снижается и при величине этого параметра более 0,05 м исчезает практически полностью (рис. 4). Это свидетельствует о возникновении благоприятных термодинамических условий для восстановления Si, имеющего температуру начала восстановления (1640 °C), значительно превышающую температуру начала восстановления Mn из оксида (1400 °C) и силиката (1500 °C).

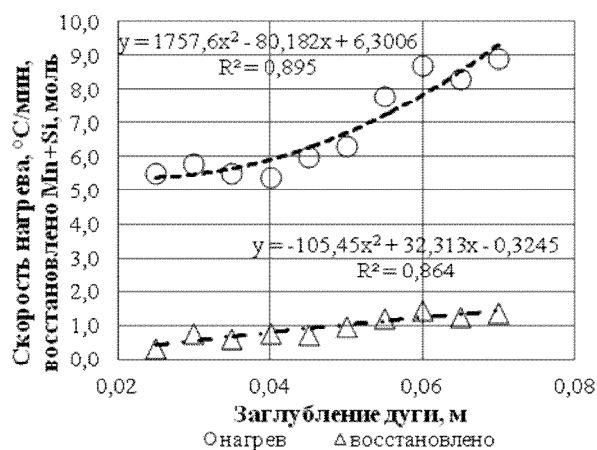


Рисунок 3 Влияние уровня заглубления РВБ на количество восстановленных элементов и скорость нагрева

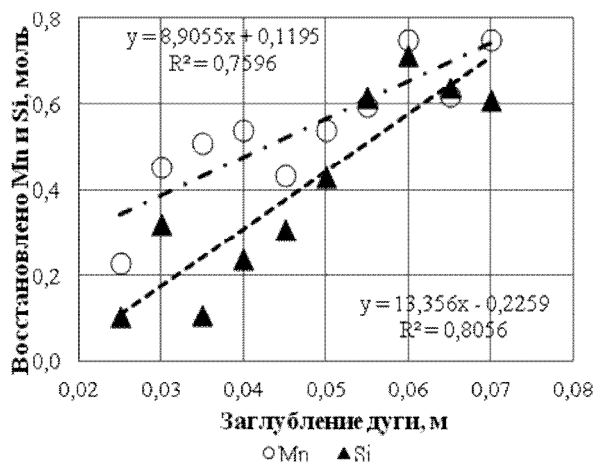


Рисунок 4 Влияние уровня заглубления РВБ на извлечение Mn и Si

Как было отмечено выше, эффективность современных металлургических технологий в значительной степени определяется затратами энергии. Поэтому было проанализировано влияние заглупления дугового разряда в объём обрабатываемого металла на расход электроэнергии. Реализованный при проведении экспериментов процесс ДГВ характеризовался изменением большого количества параметров, и для учёта их влияния в качестве характеристики энергозатрат можно принять расход электроэнергии (кВт·ч) на восстановление 1 % Mn и Si в 1 кг обрабатываемого расплава и нагрев его на 1 °С при длительности обработки 1 ч (кВт·ч/(кг·%·°С·ч)) или удельную мощность, подводимую в зону заглуплённого дугового разряда для реализации технологии (кВт/(кг·%·°С)).

Обработка результатов проведённых экспериментов позволила установить характер изменения удельных затрат электроэнергии в зависимости от уровня заглупления дугового узла (рис. 5).

Представленные на рисунке 5 данные свидетельствуют о том, что зависимость удельных затрат электроэнергии от уровня заглупления дуги носит нелинейный характер. Для используемой конструкции РВБ и технологических параметров обработки можно выделить три наиболее характерных участка, соответствующих экспериментальному уровню заглупления: 0,025–0,040 м, 0,045–0,055 м и 0,060–0,070 м.

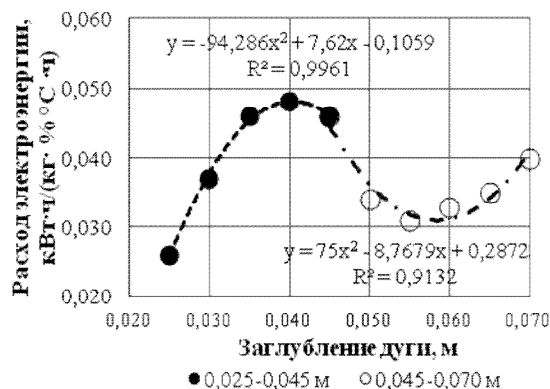


Рисунок 5 Влияние уровня заглупления РВБ на удельный расход электроэнергии

При заглуплении до 0,04 м удельный расход электроэнергии возрастает, что может быть связано с потерями тепла в окружающую среду вследствие недостаточной теплоизоляции дугового разряда и оголения поверхности металла при воздействии на него дуги. При этом наблюдался повышенный барботаж верхних объёмов расплава и брызгообразование.

Погружение дуги в объём металла на 0,045–0,055 м обеспечивает снижение удельных энергозатрат и в данных условиях является оптимальным, обеспечивая при этом высокую степень восстановления элементов и скорость нагрева.

В соответствии с рисунками 3 и 4 увеличение уровня заглупления во всём исследованном диапазоне повышает эффективность обработки с точки зрения извлечения элементов и нагрева металла. Однако удельный расход электроэнергии при заглуплении на 0,06–0,07 м так же, как и для диапазона 0,025–0,040 м, характеризуется повышенными значениями. Объяснить это можно природой существования заглуплённого дугового разряда.

Полученный расчётом теоретически возможный уровень заглупления дуги в металлический расплав для наших условий находится в пределах 0,1–0,2 м и по данным работы [7] всегда превышает значения, получаемые исследователями в реальных условиях.

При проведении экспериментальных исследований по обработке методом ДГВ с погружением РВБ в железоуглеродистый расплав на 0,06–0,07 м отмечалось нестабильное горение дуги с частым её прерыванием, что требовало повторного зажигания путём поднятия и опускания электродов, вызывало увеличение расхода электроэнергии и снижало КПД дугового узла. Поэтому для данной конструкции РВБ, состава РВС и электрических параметров обработки оптимальным является диапазон заглупления 0,050–0,055 м.

Таким образом, проведённые исследования позволили установить зависимости ме-

жду рассматриваемыми технологическими параметрами, которые свидетельствуют о положительном влиянии уровня заглубления РВБ в металлический расплав на количество восстанавливаемых Mn и Si, а также скорость нагрева металла. Кроме того, установленная зависимость расхода электро-

энергии от уровня заглубления дугового разряда позволила определить оптимальную глубину погружения дуги в расплав, которая для использованных конструкции и состава РВБ составляет 0,050–0,055 м и обеспечивает минимальный удельный расход электроэнергии на реализацию процесса ДГВ.

Библиографический список

1. Электродуговая и электромагнитная обработка расплавов [Текст] : монография / А. Н. Смирнов и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2013. — 320 с.
2. Металлургические мини-заводы [Текст] : монография / А. Н. Смирнов и др. — Донецк : ДонНТУ, 2005. — 469 с.
3. Казачков, Е. А. Расчёты по теории металлургических процессов [Текст] : учеб. пособ. для вузов / Е. А. Казачков. — М. : Металлургия, 1988. — 288 с.
4. Крамаров, А. Д. Электрометаллургия стали и ферросплавов [Текст] : учеб. пособ. для вузов / А. Д. Крамаров, А. Н. Соколов. — М. : Металлургия, 1976. — 376 с.
5. Рысс, М. А. Производство ферросплавов [Текст] : учеб. пособ. для вузов / М. А. Рысс. — М. : Металлургия, 1985. — 344 с.
6. Еднерал, Ф. П. Электрометаллургия стали и ферросплавов [Текст] : учебник / Ф. П. Еднерал. — М. : Металлургия, 1977. — 488 с.
7. Лесков, Г. И. Электрическая сварочная дуга [Текст] / Г. И. Лесков. — М. : Машиностроение. — 1970. — 335 с.
8. Низяев, К. Г. Нагрев стали электрической дугой, погружённой в жидкий металл [Текст] / К. Г. Низяев // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2007. — № 3. — С. 24–25.
9. Семирягин, С. В. Физико-химические условия процесса дугового восстановления магния под слоем металлического расплава [Текст] / С. В. Семирягин и др. // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2004. — № 18. — С. 192–203.

© Куберский С. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М., консультантом по вопросам качества кокса и технологии доменной плавки Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС», к.т.н. Кузьменко В. Ф.

Статья поступила в редакцию 07.03.18.

к.т.н. Куберський С. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ГЛИБИНИ ЗАНУРЕННЯ ДУГОВОГО РОЗРЯДУ В РОЗПЛАВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИЛУЧЕННЯ МАНГАНУ І КРЕМНІЮ З СІЛКОМАРГАНЦЕВОГО ШЛАКУ

Визначено температури початку відновлення основних компонентів рудно-відновлювальної суміші на базі шлаку від виробництва сілікомарганцю за різних значень тиску в системі і показано незначне збільшення значень цього термодинамічного параметру при заглибленні реакційної зони в розплав на величину до 300 мм. Встановлено залежності, що свідчать про позитивний вплив рівня заглиблення дуги в розплав на ступінь вилучення Mn і Si та швидкість нагрівання металу, а також показано, що оптимальне його значення для рудно-відновлювальних блоків використаної конструкції і складу становить 0,050–0,055 м та забезпечує мінімальні питомі витрати електроенергії на реалізацію процесу дугового глибинного відновлення.

Ключові слова: термодинаміка, температура, відновлення, заглиблена дуга, надлишковий тиск, ступінь вилучення, швидкість нагрівання, витрата електроенергії.

PhD Kuberskiy S. V. (*DonSTU, Alchevsk, LPR*)

IMPACT ANALYSIS OF THE IMMERSION DEPTH OF THE ARC CHARGE INTO MELT RELATIVE TO EFFICIENCY OF MANGANESE AND SILICON EXTRACTION FROM SILICOMANGANESE SLAG

The starting reduction temperatures have been found out for the main components of the slag-based ore-reduction mixture from silicomanganese at different pressure in the system, and an insignificant increase in the values of this thermodynamic parameter is shown when the reaction zone penetrates the melt by up to 300 mm. Dependencies have been determined that indicate a positive effect of arc penetration level into the melt on the extraction of Mn and Si and the rate of metal heating, and it is also shown that its optimal value for ore-reduction blocks of the structure and composition used is 0,050–0,055 m and provides a minimum specific power consumption to implement the process of arc deep reduction.

Key words: *thermodynamics, temperature, reduction, buried arc, overpressure, extraction rate, heating rate, power consumption.*