

*Проценко М.Ю.,
к.т.н. Эссельбах С.Б.,
к.т.н. Куберский С.В.,
Эссельбах В.С.
(ДонГТУ, Алчевск, Украина),
к.т.н. Штепан Е.В.
(ГВУЗ «ДНТУ»)*

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ДУГОВОГО ГЛУБИННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

Проведено оцінку температури дуги в реакційній зоні процесу ДГВ, визначена потужність теплового потоку, який проходить через комбінований електрод для підводу струму і частка потоку, який передається випромінюванням на реакційну поверхню каверни і металевого розплаву, що дозволяє розраховувати оптимальні параметри електро-дугової обробки металевих розплавів.

***Ключові слова:** дугове глибинне відновлення, електрод, спалювання, потужність, енергія, дуга, потік тепла, температура, енерговитрати.*

Произведена оценка температуры дуги в реакционной зоне процесса ДГВ, определена мощность теплового потока проходящего через токоподводящий комбинированный электрод и доля ее передающаяся излучением на реакционную поверхность каверны и металлического расплава, что позволяет рассчитывать оптимальные параметры электродуговой обработки металлических расплавов.

***Ключевые слова:** дуговое глубинное восстановление, электрод, сжигание, мощность, энергия, дуга, поток тепла, температура, энергозатраты.*

Извлечение полезных элементов (марганца, хрома, ванадия и т.д.) из отвальных шлаков и шламов металлургического и ферросплавного производства актуально для энерго- и ресурсосбережения в металлургии. На кафедре «Металлургии черных металлов» ДонГТУ эти задачи решаются методом дугового глубинного восстановления (ДГВ) элементов из их оксидов, входящих в состав руд, вторичных материалов и отходов металлургического производства [1,2]. Формованный блок, содержащий восстановитель и восстанавливаемые оксиды, снабжают

электродами для возбуждения внутри блока дугового разряда. Блок с электрической дугой заглубляют в расплав, где он расходует, а восстанавливаемые в глубине расплава полезные элементы позволяют реализовать технологические периоды рафинирования и легирования металла. Важно, чтобы материал блока и электрод расходовались с одинаковыми скоростями, в противном случае дуговой разряд гаснет, и процесс восстановления примесей прекращается.

Ток на заглубленную дугу подводится стальной трубкой $\text{Ø}18 \times 2,5$ мм, у которой внутреннее пространство $\text{Ø}13$ мм заполнено графитированной углеродистой массой. Вблизи дуги трубка оплавляется, и дуга горит между оголившимся концом углеродистого стержня и расплавом. Вокруг дуги образуется каверна, по конфигурации близкая к полусфере. Газовыделение из зоны дуги предотвращает замыкание электрода на расплав. Выделяющиеся газы являются продуктами восстановительных реакций, которые происходят преимущественно на внутренней поверхности каверны. Тепловая энергия, обеспечивающая ход эндотермических восстановительных реакций, поступает от дуги.

В работах [3,5] отсутствуют данные по температурному режиму в реакционной зоне ДГВ, а также доле затрат тепла на различные элементы дуговых рудно-восстановительных блоков. Поэтому целью проведенных на данном этапе исследований была оценка величины основных статей энергозатрат и температуры дуги на торце комбинированного электрода используемого в рудно-восстановительных блоках процесса ДГВ.

Состав сырья, из которого восстанавливают полезные элементы различный. Тепловая энергия дуги расходует на нагрев и расплавление материала блока, электрода, на восстановление элементов и частично поступает на нагрев обрабатываемого расплава. Что касается электрода, то его состав, а, следовательно, и количество тепла, которое тратится на его расходование, во всех случаях стабильно и не зависит от состава перерабатываемого сырья. Скорость расходования электрода, а вместе с ним и материала дугового блока, зависит от мощности, потребляемой дуговым узлом. Соответственно и поток тепла, уходящего из зоны дуги в окружающую среду по электроду, также зависит только от мощности, потребляемой дуговым узлом. Зная поток тепла по электроду, можно определить доли тепла, поступающего на внутреннюю поверхность каверны и на окружающий расплав. Можно также выйти на такие параметры дугового узла, как температура и степень ионизации газов в зоне дуги.

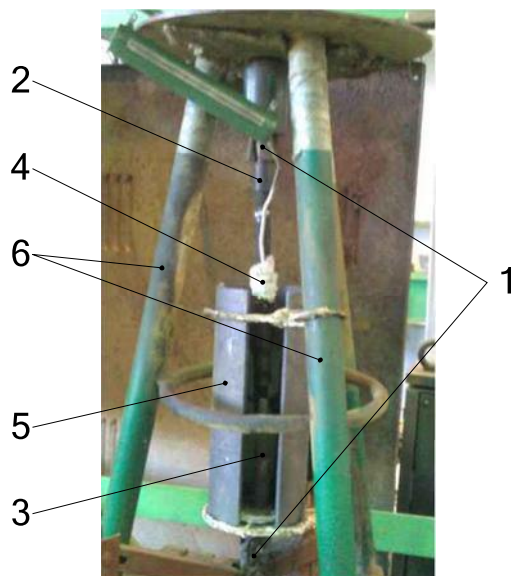
Для определения потока тепла, распространяющегося по электроду в процессе его сгорания, было выполнено термометрирование электрода в процессе расходования. Теплоизолированный снаружи асбестом спай платинородий-платиновой термопары закрепляли на внешней по-

верхности токоподводящего комбинированного электрода состоящего из железной трубки $\text{Ø}18 \times 2,5$, внутри которой имелась графитовая набивка либо графитовая набивка с 9, 12,5, 15 и 16% MgO. В качестве источника питания применяли ТИР-630. Сила тока при проведении опытов составляла 250, 300, 350 и 370 А.

При проведении опыта работали на обратной полярности (расходуемый комбинированный электрод выполнял роль анода, а нерасходуемый катода).

Электроды сжигали внутри углеродистого трубчатого защитного кожуха $\text{Ø}100 \times 12$ без набивки рудно-термической смеси на ее поверхности (рисунок 1). При таком способе сжигания электрода его можно считать теплоизолированным снаружи, потому что горячие газы, выделяющиеся из зоны дуги, в очень малой степени нагревают или охлаждают электрод. Спай термопары в процессе сжигания электрода приближается к дуговому узлу на расстояние в несколько миллиметров от оплавленного конца трубки. Таким образом, получается экспериментальное решение обратной задачи Стефана: определяется температурное поле по длине электрода при известной скорости его расходования. По установленному экспериментально распределению температуры вдоль электрода можно определить величину теплового потока по его длине.

На рисунке 2 показаны огарки электродов после сжигания их на лабораторной установке.



- 1 – электрододержатель; 2 – комбинированный электрод;
3 – нерасходуемый электрод; 4 – термопара ПП; 5 – защитный кожух;
6 – станина.

Рисунок 1 – Установка для сжигания комбинированных электродов на воздухе



Рисунок 2 – Огарки комбинированных электродов поле сжигания

В качестве исходных данных для расчета теплового потока по электроду принималось следующее:

- температура электрода на оплавляющемся конце трубки составляет 1520°C (температура плавления материала трубки);
- расстояние от оплавленного конца трубки до конца графитовой набивки составляет 3 мм;
- температура конца графитовой набивки, от которого горит дуга, неизвестна и подлежит определению по данным о разогреве электрода;
- конец графитовой набивки, от которого горит дуга, в эксперименте при работе на постоянном токе является анодом, а его температура сравнима с температурой источника тепла, т.е. дуги.

Для формулирования задачи и решения дифференциального уравнения теплопроводности принимаем следующее допущения, которые логически следуют из предыдущего описания процесса горения (расходования) электрода ДГВ в виде железной трубки $\text{Ø}18 \times 2,5$ с графитовой набивкой, а также добавкой MgO.

1. Ввиду малого диаметра трубки и набивки электрод рассматривается как сплошной однородный стержень, т.е. перепадами температуры по его радиусу за пределами оплавленного конца трубки пренебрегаем.

2. Электрод, находящийся в среде горячих газов, выходящих из зоны дуги, рассматриваем как теплоизолированный снаружи.

3. Для определения теплового потока вдоль электрода начало координат ($x = 0$, м) располагаем в конце плавящейся трубки.

4. Процесс рассматриваем как стационарный, когда температура на расстоянии 3 мм от конца графитовой набивки составляет 1520°C (оплавленный конец трубки).

Общий вид уравнения теплопроводности для однородного стержня, боковая поверхность которого теплоизолирована, а стержень дополнительно нагревается проходящим по нему током, имеет вид:

$$\frac{\delta t}{\delta \tau} = a \frac{\delta^2 t}{\delta x^2} + \frac{1}{s} I^2 R, \quad (1)$$

где t – температура;

τ – время;

a – коэффициент температуропроводности, в рассматриваемом

случае $a = \frac{\lambda}{c' \rho}$, здесь $c' = c_{\text{учл}} = c + \frac{L}{\Delta t_{\text{кр}}}$;

c – теплоемкость материала стержня;

L – удельная теплота плавления материала трубки;

$\Delta t_{\text{кр}}$ – интервал кристаллизации материала трубки;

I – сила тока;

R – сопротивление единицы длины стержня;

S – площадь поперечного сечения стержня;

λ – теплопроводность материала стержня.

Расходование электрода в рассматриваемом случае происходит при условиях, близких к стационарным. При этом частная производная $\delta t / \delta \tau$ равна нулю, температура t равна некоторой постоянной величине t_0 и уравнение (1) в частных производных превращается в обычное дифференциальное уравнение (2):

$$t_0 = \int_0^x \left(a \cdot \frac{d^2 t}{dx^2} + I^2 R \cdot \frac{1}{S} \right) dx. \quad (2)$$

Начало координат находится в конце оплавленной трубки, и в этом поперечном сечении $t_0 = 1520^{\circ}\text{C}$, а температура вдоль электрода $t(x)$ определена экспериментально (таблица 1).

Таблица 1 – Экспериментальные значения температуры поверхности комбинированного электрода при различном удалении от электрической дуги и значениях силы тока

$I = 370\text{A}$		$I = 250\text{A}$		$I = 350\text{A}$		$I = 300\text{A}$	
$x, \text{мм}$	$t, ^\circ\text{C}$	$x, \text{мм}$	$t, ^\circ\text{C}$	$x, \text{мм}$	$t, ^\circ\text{C}$	$x, \text{мм}$	$t, ^\circ\text{C}$
3	1520	3	1520	3	1520	3	1520
18	383	27	391	5	316	35	394
26	316	34	342	16	259	42	313
32	139	37	271	25	224	49	294
71	77	42	251	35	200	73	219
102	26	49	209	44	176	76	132
118	15	56	177	53	139	81	122
		62	133	63	115	96	61
		66	111	67	102	102	20
		71	89	77	77		
		78	66	100	15		
		83	55				
		90	32				
		100	26				

Экспериментальные данные таблицы 1 характеризующие связь между x и t представим в виде экспоненциальной зависимости. Для этого данные таблицы 1 линеаризируем, устанавливая линейную зависимость между логарифмами x и t :

$$\ln t = -0,986 \ln x + 8,627; r_{t/x} = 0,871. \quad (3)$$

График установленной зависимости иллюстрируется рисунком 3. После потенцирования выражения (3) получаем зависимость температуры в данном поперечном сечении электрода расположенном на определенном удалении от источника тепла (например, электрической дуги):

$$t = 5580 \cdot e^{-0,986 \ln x}, \quad (4)$$

где x – длина электрода, вовлеченная в теплообмен, мм;
 t – температура в поперечном сечении на расстоянии x , $^\circ\text{C}$;
 5580 – температура источника тепла, $^\circ\text{C}$. Эта температура с вероятностью 99% находится в доверительных границах между 4760 $^\circ\text{C}$ и 6570 $^\circ\text{C}$ и зависит от мощности, выделяющейся в дуге (рисунок 3).

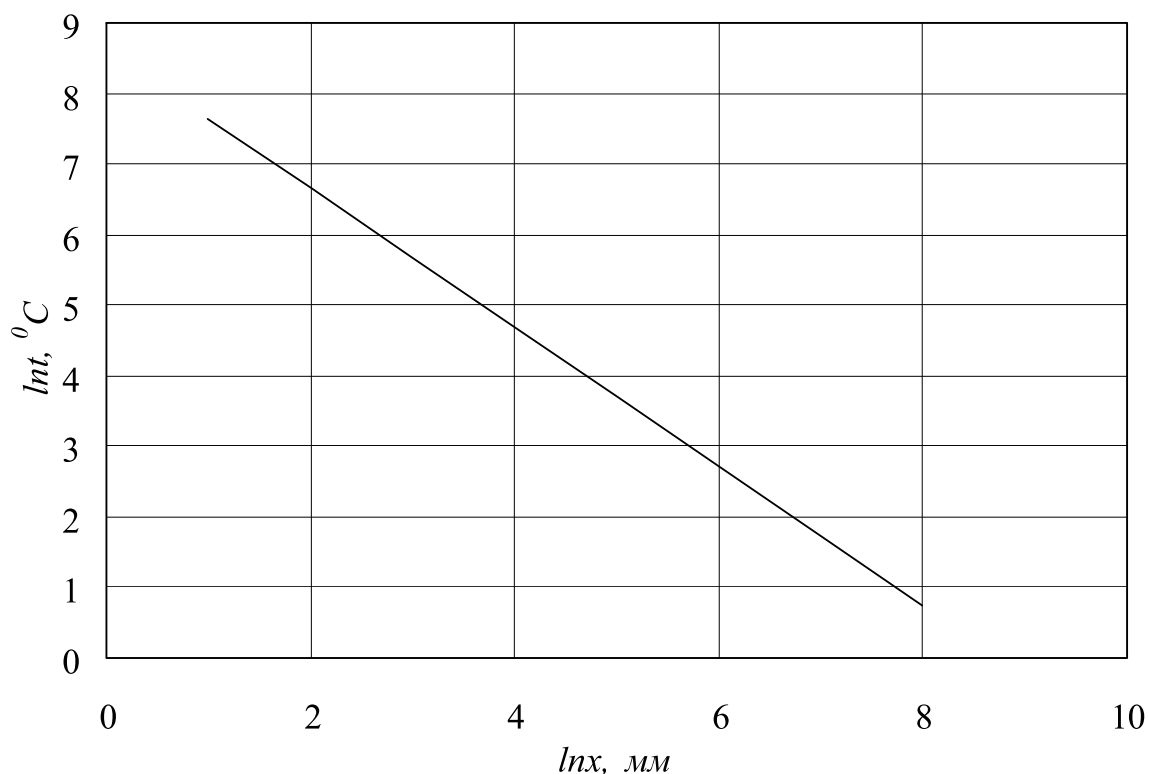


Рисунок 3 – График определения температуры поверхности электрода в рассматриваемом сечении при различном удалении его от источника тепла

Участок электрода, температура в сечении которого составляет 1520°C (температура плавления трубки), согласно уравнению (3), находится на расстоянии $3,74$ мм от источника тепла ($x = 3,74$ мм, $t = 1520^{\circ}\text{C}$). В рассматриваемой модели (электрод теплоизолирован) количество тепла, затраченного на расходование электрода, складывается из доли $Q_{\text{пл}}$, т.е. на расплавление трубки, и $Q_{\text{ак}}$, которая остается в разогретой, не оплавленной части электрода после прекращения опыта.

Доля тепла на расплавление $\approx 0,1$ м массой $0,1$ кг электрода (таблица 1) составляет:

$$Q_{\text{пл}} = (0,17 \cdot 1520 + 65) \cdot 0,1 = 32,34 \text{ ккал.},$$

где $0,17$ – теплоемкость электрода, ккал/кг·град;
 65 – удельная теплота плавления, ккал/кг.

Доля аккумулированного тепла

$$Q_{\text{ак}} = \left[\int_{336}^{3,74} (5580 \cdot e^{-0,986 \ln x}) dx \right] \cdot 0,17 \cdot 0,336 = 82,612 \text{ ккал},$$

где 336 мм – расстояние от плавленного конца трубки до сечения электрода с температурой 20 °С;

3,74 мм – расстояние от оплавленного конца трубки до источника тепла.

Всего расход тепла на сжигание электрода составит:

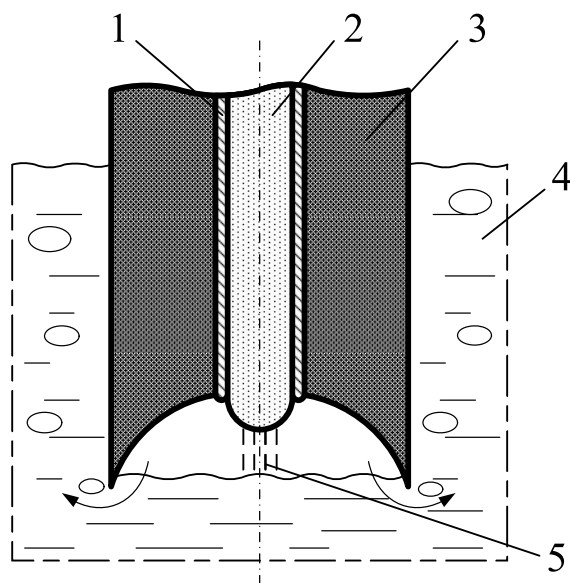
$$Q_{\text{пл}} + Q_{\text{ак}} = 82,612 + 32,34 \cong 115 \text{ ккал}.$$

Часть этого тепла поступает за счет омического нагрева от тока, проходящего по электроду в зону дуги. Сопротивление электрода зависит от температуры. Сопротивление железа при комнатной температуре составляет 10 мкОм·см, а при 1520 °С – 105 мкОм·см. Участок экспоненты (выражение (4)) для той части длины электрода, которая подогрета после прекращения опыта, близок к линейному. Поэтому правомерно считать, что удельное электросопротивление электрода на прогретом участке составляет $(105 + 10)/2 = 57,5$ мкОм·см, а оплавленного участка 105 мкОм·см.

Электросопротивление оплавленного участка $4,13 \cdot 10^{-4}$ Ом, а разогретого участка $7,54 \cdot 10^{-4}$ Ом. Количество омического тепла, выделяющегося при расплавлении, составляет $\approx 1,5$ ккал, или 5% от затраченного на плавление; на участке разогрева это $\approx 2,75$ ккал, или 3,5% от затраченного. Всего через электрод прошло за время опыта, например при 300 А (таблица 1) 94 – 95% тепла от дугового узла, а 4-5% – это омическое тепло. Коэффициент теплоотдачи от дугового разряда на торец электрода $\alpha \approx 2250$ ккал/м²·час·град, а тепловой поток $q = d \cdot \Delta t \cong 9,135 \cdot 10^6$ ккал/м²·час, или 2,5 – 2,8 кВт.

Потребляемая дуговым узлом мощность составляет обычно 9–11 кВт. Как видим, значительная её часть затрачивается на расплавление и на расходование самого электрода.

На рисунке 4 показан предполагаемый разрез дугового узла процесса ДГВ. Снизу реакционное пространство ограничено поверхностью расплава, который не проникает в каверну и не замыкается на электрод вследствие давления газов, образующихся при химических реакциях.



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

Рисунок 4 – Схема реализации процесса ДГВ

Площадь поверхности расплава, ограничивающего каверну снизу, $16,6 \text{ см}^2$. Восстановительные реакции происходят на сводовой поверхности каверны, площадь которой, согласно рисунку 4, $13,3 \text{ см}^2$. Купол внутренней поверхности образует торец электрода, его площадь $2,54 \text{ см}^2$. Это составляет около 8% общей поверхности, но поглощает до 25% мощности дуги.

Если предположить, что остальные 75% мощности дугового разряда передаются излучением на реакционную поверхность каверны и на поверхность расплава, то эти доли составят:

- на поверхность расплава – 41,6%;
- на реакционную поверхность каверны – 33,4%.

Последнее идет на разогрев рудно-восстановительной смеси до температуры восстановления, собственно восстановления и образование продуктов реакции в твердом, жидком или газообразном состоянии.

В результате проведенной работы произведена оценка температуры дуги в реакционной зоне процесса ДГВ, определена мощность теплового потока проходящего через токоподводящий комбинированный электрод и доля ее, передающаяся излучением на реакционную поверхность каверны и металлического расплава. Проведенный анализ энергозатрат при ДГВ позволяет рассчитать оптимальные электрические параметры процесса для повышения его экономической эффективности и

конкурентоспособности в сравнении с существующими процессами обработки расплавов ферросплавами.

Дальнейшие исследования будут посвящены оценке температуры дуги в реакционной зоне процесса ДГВ на основании сведений о потенциале ионизации и сравнении ее с температурой, полученной в ходе представленных исследований.

Библиографический список

1. Семирягин С.В. Физико-химические условия процесса дугового восстановления магния под слоем металлического расплава / С.В. Семирягин, С.В. Куберский, С.Б. Эссельбах и др. // Сборник научных трудов ДонГТУ. - Алчевск ДонГТУ. – 2004. - Вып. №18 – С.192-203.

2. 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.

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

4. 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 // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск. – 2003.- Вып. №17. – С. 283-292.

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

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