

СТАТЬИ

УДК 669.432:553.981

ТЕРМОДИНАМИКА ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ОБЕДНЕНИЯ СИСТЕМЫ Cu-Me-Fe-O-SiO₂ (Me – Pb, Zn, As) ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ**¹Досмухамедов Н.К., ²Федоров А.Н., ¹Жолдасбай Е.Е.***¹Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, e-mail: nurdos@bk.ru;**²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва*

Приведены результаты термодинамического анализа поведения Cu, Pb, Zn и As в условиях глубоко восстановительного ($P_{O_2} = 10^{-11} \div 10^{-13}$ атм) двухстадийного обеднения высокомедистых шлаков природным газом в присутствии угля при температуре 1300 °С. Особое внимание уделено полному удалению мышьяка из шлака и получению продуктов высокого качества: металлического сплава на основе меди и свинцово-цинковых возгонов. На основании сравнительного анализа расчетных значений энергии Гиббса взаимодействия оксидов цветных металлов и мышьяка с природным газом, с расчетными величинами убыли энергии Гиббса, полученными для условий восстановления шлака углем, показана возможность глубокого восстановления нелетучего оксида мышьяка (V) природным газом до его летучего оксида (III). Показано, что расчетные значения ΔG^0_T реакции взаимодействия оксида мышьяка с природным газом при заданных температурах не менее чем в два раза (по абсолютной величине) превышают значения ΔG^0_T реакций восстановления оксидов цветных металлов и железа. Установлена высокая термодинамическая вероятность восстановления меди из ее оксида при обработке шлака природным газом. Убыль энергии Гиббса $\Delta G_{1573K} = -481,2$ кДж/моль более чем в два раза превышает изменение энергии Гиббса, полученное при восстановлении оксида меди углем ($\Delta G_{1573K} = -192,3$ кДж/моль). Показано, что в условиях отсутствия угля и коллектирующей металлической фазы ожидать выделения меди в самостоятельную донную фазу не следует в силу относительно невысокого содержания меди в исходном шлаке. Рассчитаны термодинамические величины, определяющие равновесие системы: шлак – сплав. Установлены активность оксида меди (I) в шлаке и активность меди в сплаве, которые были использованы для раскрытия механизма растворимости меди в шлаке с точки зрения ионной природы строения оксидных расплавов. Установлены закономерности растворимости меди в шлаке в зависимости от активности меди CuO_{0,5} и парциального давления кислорода. Показано, что термодинамические закономерности растворимости меди, протекающие в условиях глубоко восстановительного обеднения высокомедистых шлаков, подчиняются закону Генри.

Ключевые слова: шлак, природный газ, уголь, обеднение, парциальное давление кислорода, перемешивание, энергия Гиббса, активность, медь, железо, сплав, свинцово-цинковые возгоны, мышьяк

THERMODYNAMICS OF RESTORATIVE SUSPENSION Cu-Me-Fe-O-SiO₂ (Me – Pb, Zn, As) SYSTEMS BY NATURAL GAS**¹Dosmukhamedov N.K., ²Fedorov A.N., ¹Zholdasbay E.E.***¹Kazakh National Research Technical University named K.I. Satpaev, Almaty, e-mail: nurdos@bk.ru;**²National Research Technological University «MISIS», Moscow*

The results of the thermodynamic analysis of the behavior of Cu, Pb, Zn and As under conditions of deep reduction ($P_{O_2} = 10^{-11} \div 10^{-13}$ atm) of the two-stage depletion of high-copper slags with natural gas in the presence of coal at a temperature of 1300 °C are presented. Particular attention is paid to the complete removal of arsenic from slag and obtaining high-quality products: a metal alloy based on copper and lead-zinc sublimates. Based on a comparative analysis of calculated Gibbs energy of interaction of non-ferrous oxides and arsenic with natural gas, with calculated values of Gibbs energy loss obtained for the conditions of slag recovery by coal, the possibility of deep recovery of non-volatile arsenic oxide (V) with natural gas to its volatile oxide (III). It is shown that the calculated values of ΔG^0_T for the reaction of interaction of arsenic oxide with natural gas at given temperatures not less than twice (in absolute value) exceed the values of ΔG^0_T for the reduction reactions of non-ferrous metals and iron oxides. A high thermodynamic probability of copper recovery from its oxide during the treatment of slag with natural gas has been established. The Gibbs energy loss $\Delta G_{1573K} = -481.2$ kJ / mol is more than two times greater than the change in Gibbs energy obtained by reducing copper oxide with carbon ($\Delta G_{1573K} = -192.3$ kJ / mol). It is shown that in the absence of coal and the collecting metal phase, copper should not be expected to be released into an independent bottom phase due to the relatively low copper content in the original slag. The thermodynamic quantities that determine the equilibrium of the system are determined: slag – alloy. The activity of copper (I) oxide in slag and the activity of copper in the alloy, which were used to disclose the mechanism of copper solubility in slag from the point of view of the ionic nature of the structure of oxide melts, are calculated. The regularities of the change in the copper content in the slag depending on the copper activity CuO_{0.5} and the partial pressure of oxygen are established. It is shown that the thermodynamic laws of copper solubility, occurring in conditions of deeply restorative depletion of high-copper slag, obey Henry's law.

Keywords: slag, natural gas, coal, depletion, oxygen partial pressure, mixing, Gibbs energy, activity, copper, iron, alloy, lead-zinc sublimates, arsenic

Процессы автогенной плавки медных концентратов на богатый штейн характеризуются повышенным содержанием меди в шлаках, что требует дальнейшей их пере-

работки с целью ее извлечения [1, 2]. Обеднение шлаков включает в себя снижение механических и растворенных потерь меди со шлаками. При этом если решение во-

проса осаждения механически увлеченных штейновых включений в шлаке представляет традиционную задачу, то снижение растворенных потерь меди со шлаком требует термодинамического анализа. В литературе известен ряд работ, посвященных изучению данного вопроса в широком диапазоне изменения парциального давления кислорода – от окислительных ($P_{O_2} = 10^{-6} \div 10^{-8}$ атм), до восстановительных ($P_{O_2} = 10^{-9} \div 10^{-11}$ атм) условий. Системные исследования по изучению растворимости меди в железосиликатных расплавах проведены авторами работ [3–5]. Влияние незначительных добавок MgO, Al₂O₃ и CaO на растворимость меди в железосиликатных шлаках опубликовано в исследованиях [6–8]. В работе [9] исследована растворимость меди в кальций-ферритовых шлаках, насыщенных кремнеземом. Анализ состава шлака, использованного для проведения экспериментальных исследований двухстадийного восстановительного его обеднения природным газом [10], показывает идентичность с составами шлаков известных работ, что позволяет провести сравнительную оценку полученных результатов с общих позиций – с точки зрения термодинамики равновесия системы: металл (сплав) – шлак.

Цель настоящих исследований – термодинамический анализ поведения меди и сопутствующих примесей при двухстадийном восстановительном обеднении высококремнистых шлаков и изучение растворимости меди в железосиликатном расплаве при равновесии в системе: металл (сплав) – шлак.

Материалы и методы исследования

Оценка вероятного направления реакций взаимодействия компонентов высококремнистого шлака с природным газом в присутствии угля проводилась на основании расчета изменения энергии Гиббса (ΔG^0_T) в зависимости от температуры. Термодинамический анализ взаимодействия оксидов цветных металлов, железа и мышьяка с твердым углем представлен в работе [11]. В настоящей работе основное внимание уделено исследованию поведения меди, свинца, цинка, железа и мышьяка при глубоко восстановительном обеднении шлака природным газом.

Исходные данные стандартного состояния веществ, принятых для проведения термодинамических расчетов, получены из веб-сайта NIST-JANAF Thermochemical Tables (<http://kinetics.nist.gov/janaf>).

Термодинамический анализ проведен на основе результатов экспериментальных исследований двухстадийного восстановления природным газом шлаков процесса

«Isasmelt» (ТОО «Казцинк») следующего состава, %: 0,66 Cu; 1,02 Pb; 4,22 Zn; 0,1 As; 38,4 Fe; 30,3 SiO₂; 4,1 CaO; 5,1 Al₂O₃; 0,5 MgO [10].

Результаты исследования и их обсуждение

Термодинамический анализ поведения цветных металлов, железа и мышьяка в условиях двухстадийного восстановительного обеднения высококремнистых шлаков

Результаты ранее выполненных термодинамических расчетов энергии Гиббса реакций восстановления компонентов шлака углем [11], как одного из предпочтительных способов обеднения шлаков, показали селективное извлечение цветных металлов в целевые продукты: меди – в донную фазу (металлический сплав), свинца и цинка – в газы. Однако это требует большого избытка угля от теоретически необходимого его расхода для восстановления оксидов цветных металлов и железа. Кроме того, в этих условиях наблюдается повышенный переход железа и мышьяка в донную фазу, что значительно снижает качество получаемого медного сплава и ограничивает его дальнейшее использование.

Наиболее рациональным и эффективным представляется способ двухстадийного восстановительного обеднения шлака с использованием природного газа [10], который включает селективное разделение металлов в целевые продукты. На первой стадии – путем обработки шлакового расплава природным газом – максимально удаляется мышьяк в пыль, газы в виде легколетучего его триоксида (As₂O₃). На второй стадии осуществляется продувка шлака природным газом в присутствии угля, что обеспечивает глубокое удаление мышьяка из шлака, высокое извлечение меди в металлический сплав и свинца, цинка – в форме возгонов, выносимых из реакционной зоны отходящими газами.

Механизм восстановления оксидов цветных металлов, железа и мышьяка природным газом можно представить системой реакций, приведенных в табл. 1.

Выделяющиеся по реакциям (1)–(5) СО и СО₂, не вступая во взаимодействие с компонентами шлака, выносятся из реакционной зоны вместе с отходящими газами ввиду их малого времени пребывания в реакционной зоне.

Сравнительный анализ расчетных значений изменения энергии Гиббса восстановления оксидов цветных металлов и мышьяка природным газом (табл. 1),

с расчетными величинами убыли энергии Гиббса, полученными для условий восстановления шлака углем, показывают возможность глубокого восстановления нелетучего оксида мышьяка (V) природным газом до его летучего оксида (III). Расчетные значения ΔG_T^0 реакции (4) при заданных температурах не менее чем в два раза (по абсолютной величине) превышают значения ΔG_T^0 реакций восстановления оксидов цветных металлов и железа (табл. 1), что свидетельствует о высокой вероятности восстановления As_2O_5 до легколетучего оксида мышьяка (As_2O_3) и удаления его с отходящими газами. Данное положение полностью подтверждено результатами экспериментальных исследований: после первой стадии продувки шлака природным газом при расходе природного газа, превышающем его расход от стехиометрически необходимого его расхода для восстановления As_2O_5 до As_2O_3 на 30%, содержание мышьяка в конечном шлаке было снижено с 0,1% до 0,01%.

Очень высока термодинамическая вероятность восстановления меди из ее оксида при обработке шлака природным газом. Убыль энергии Гиббса по реакции (1) $\Delta G_{1573K} = -481,2$ кДж/моль более чем в два раза превышает изменение энергии Гиббса, полученное при восстановлении оксида меди углем ($\Delta G_{1573K} = -192,3$ кДж/моль). В условиях отсутствия угля и коллектирующей металлической фазы ожидать выделения меди в самостоятельную донную фазу не следует в силу относительно невысокого содержания меди в исходном шлаке. При этом металлическая медь, образующаяся в небольшом количестве по реакции (1), присутствует в шлаке в виде мелко диспергированных металлических включений.

Дополнительный ввод металлической меди в качестве коллектора во второй стадии и интенсивный барботаж шлакового

расплава природным газом в присутствии угля создают благоприятные условия для коалесценции мелкой взвеси металлической меди в более крупные капли и последующего выделения их в самостоятельный донный сплав. При этом образование механических потерь меди со шлаком сводится к минимуму, и остаточное содержание меди в шлаке определяется лишь ее незначительной растворимостью.

Обеспечение глубоко восстановительных условий (добавка угля, продувка природным газом) значительно повышает термодинамическую вероятность восстановления оксида цинка и свинца. Расчетные значения убыли энергии Гиббса реакций (2) и (3) при температуре ведения процесса обеднения шлака (1300°C) превышают ΔG_{1573}^0 реакции (5) – восстановления оксида железа природным газом. В условиях двухстадийного обеднения вероятность восстановления железа из его оксида будет носить подчиненный характер в силу недостаточного избытка угля и низкой температуры. Кроме того, образование металлического железа будет затруднено, пока в шлаке присутствуют оксиды меди, свинца и цинка. Минимальное количество металлического железа, переходящего из шлака в сплав по реакции (5), существенного влияния на качество и свойства получаемого сплава не окажет. Данное положение полностью подтверждается результатами экспериментальных исследований: содержание железа в получаемых сплавах с ростом расхода природного газа увеличивается незначительно – до 0,13% [10].

Термодинамика равновесия системы сплав – шлак

В системе сплав – шлак активность оксида меди (I) в шлаке определяется равновесием реакции



Таблица 1

Расчетные значения энергии Гиббса (ΔG_T^0) для высокотемпературной обработки оксидной системы Cu-Pb-Zn-As-Fe-O-SiO₂ природным газом

№	Реакция	Изменение энергии Гиббса, ΔG_T^0 , кДж/моль			
		Температура, К			
		1273	1473	1573	1273...1573
1	$3Cu_2O_{ж} + CH_4 = 6Cu_{ж} + CO_{г} + 2H_2O_{г}$	-395,8	-456,5	-481,2	$\Delta G_T^0 = -33,2 - 0,286 \cdot T$
2	$3ZnO_{ж} + CH_4 = 3Zn_{г} + CO_{г} + 2H_2O_{г}$	3,5	-133,6	-201,5	$\Delta G_T^0 = -881,06 - 0,689 \cdot T$
3	$3PbO_{ж} + CH_4 = 3Pb_{г} + CO_{г} + 2H_2O_{г}$	-141,2	-253,2	-308,1	$\Delta G_T^0 = 585,6 - 0,572 \cdot T$
4	$2As_2O_{5ж} + CH_4 = 2As_2O_{3г} + CO_{2г} + 2H_2O_{г}$	-943,2	-1064,0	-1122,7	$\Delta G_T^0 = -171,76 - 0,605 \cdot T$
5	$3FeO_{ж} + CH_4 = 3Fe_{ж} + CO_{г} + 2H_2O_{г}$	-105	-167,0	-197,6	$\Delta G_T^0 = 291,3 - 0,311 \cdot T$

Таблица 2

Расчетные значения $a_{\text{CuO}0.5}$, P_{O_2} и a_{Cu} в сплаве в условиях восстановительного обеднения шлаков природным газом

№ опыта	Расход CH_4 , %	(Cu), %	$N_{\text{CuO}0.5}$	$a_{\text{CuO}0.5}$	$\log P_{\text{O}_2}$, атм	a_{Cu}
1	10	0,41	0,0023	0,019	-11,20	0,74
2	20	0,32	0,0018	0,014	-11,69	0,78
3	30	0,23	0,0013	0,009	-12,34	0,83
4	40	0,21	0,0011	0,008	-12,55	0,84
5	50	0,17	0,0010	0,007	-12,90	0,86
6	60	0,14	0,0008	0,005	-13,34	0,88

Константу равновесия (K_1) реакции (1) можно представить в виде

$$K_1 = a_{\text{CuO}0.5} / a_{\text{Cu}} * P_{\text{O}_2}^{1/4}. \quad (2)$$

Исходя из уравнения (2) $a_{\text{CuO}0.5}$ определяется как

$$a_{\text{CuO}0.5} = K_1 * a_{\text{Cu}} * P_{\text{O}_2}^{1/4}, \quad (3)$$

или, в альтернативном виде:

$$a_{\text{CuO}0.5} = \gamma_{\text{CuO}0.5} * N_{\text{CuO}0.5}, \quad (4)$$

где $\gamma_{\text{CuO}0.5}$ – коэффициент активности оксида меди (I);

$N_{\text{CuO}0.5}$ – мольная доля оксида меди в шлаке (I).

Из выражения (3) видно, что $a_{\text{CuO}0.5}$ определяется активностью меди (a_{Cu}), парциальным давлением кислорода (P_{O_2}) над шлаковым расплавом и температурой. В нашем случае активность меди не равна единице, так как шлак находится в контакте не с чистой медью, а с раствором железа в меди. Термодинамический анализ затрудняется тем, что состав шлака зависит от парциального давления кислорода. Следовательно, как коэффициент активности, так и мольная доля оксида меди являются функцией парциального давления кислорода. Таким образом, при $T = \text{const}$ для термодинамического описания системы сплав – шлак достаточно определить величины P_{O_2} и $a_{\text{CuO}0.5}$.

Для расчета парциального давления кислорода применена процедура эволюционной аппроксимации результатов экспериментальных данных работ [3, 5, 7, 9], где исследована растворимость меди в железосиликатных шлаках при температуре 1300 °С в широком диапазоне изменения парциального давления кислорода – от окислительных ($P_{\text{O}_2} = 10^{-7}$ атм) до восстановительных условий ($P_{\text{O}_2} = 10^{-10}$ атм). Сравнительный анализ составов исходных шлаков и условий проведения опытов указанных работ с исследованиями настоящей работы показывает их идентичность, что предполагает возможность использования зависимости (5), установленной в работе [9], для расчета пар-

циального давления кислорода над шлаком в зависимости от содержания меди в шлаке.

$$\lg(\text{Cu}) = 0,221 \lg P_{\text{O}_2} + 2,09, \quad (5)$$

где Cu – содержание меди в шлаке, % мас.; P_{O_2} – парциальное давление кислорода, атм.

Выбор зависимости (5) обусловлен ее универсальностью, позволяющей применять ее для расчета растворимости меди в железосиликатных шлаках в широком диапазоне изменения их состава и парциального давления кислорода. Результаты расчетных значений P_{O_2} по уравнению (5) показали хорошую сходимость данных по растворимости меди в шлаках, полученных в работах [3, 5, 7, 9] и настоящих исследованиях.

Для расчета активности оксида меди (I) в шлаке использовали уравнение (6), приведенное в работе [9], где зависимость содержания меди в шлаке от активности оксида меди (I) в нем определена при условиях, идентичных условиям настоящей работы: температура 1300 °С, содержание CaO и Al_2O_3 в шлаке 4,0 и 6,0 % соответственно:

$$(\text{Cu}) = 20,1 * a_{\text{CuO}0.5} + 0,03. \quad (6)$$

После определения значений парциального давления кислорода (P_{O_2}) и $a_{\text{CuO}0.5}$ проводился расчет активности меди в сплаве (a_{Cu}) для каждой серии опытов исходя из выражения (2). Результаты расчетов мольной доли ($N_{\text{CuO}0.5}$) и активности ($a_{\text{CuO}0.5}$) оксида меди (I) в шлаке, парциального давления кислорода над шлаком ($\log P_{\text{O}_2}$) и a_{Cu} , полученные с использованием экспериментальных данных [10], представлены в табл. 2.

В глубоко восстановительных условиях обеднения шлака содержание железа в сплаве, минимально (максимальное содержание железа в сплаве $[\text{Fe}]_{\text{Cu}}$ для опыта 6 (табл. 2) достигает 0,12 %), что характеризует бинарную систему Cu-Fe вблизи медного края диаграммы. При минимальном содержании железа в сплаве можно принять $[\text{Fe}]_{\text{Cu}} \approx N_{[\text{Fe}]_{\text{Cu}}}$. Тогда зависимость

$a_{Cu} = f([Fe]_{Cu})$ должна описывать закономерность, свойственную бесконечно разбавленным растворам с подчинением закону Генри. И действительно, изменение активности меди в сплаве от ее мольной доли и содержания железа в нем, показанное на рис. 1, подтверждает данное положение и характеризует сплав как бесконечно разбавленный раствор железа в меди.

Изменение $a_{CuO 0.5}$ и мольной доли $N_{CuO 0.5}$ оксида меди в шлаках, уравновешенных с медно-железистым сплавом, в условиях глубокого восстановительного

обеднения при различных значениях P_{O_2} , показано на рис. 2.

Установленная зависимость $a_{CuO 0.5}$ от мольной доли $N_{CuO 0.5}$ в шлаке показывает, что растворимость меди в шлаках каждой опции опытов подчиняется закону Генри. В глубоко восстановительных условиях ($P_{O_2} < 10^{-11}$ атм) растворимость меди в шлаке минимальна. Значения коэффициента активности оксида меди ($\gamma_{CuO 0.5}$), рассчитанные из выражения (4), для каждого опыта (1–6, табл. 2) равны: 8,3; 7,8; 6,9; 7,3; 7,0 и 6,25 соответственно.

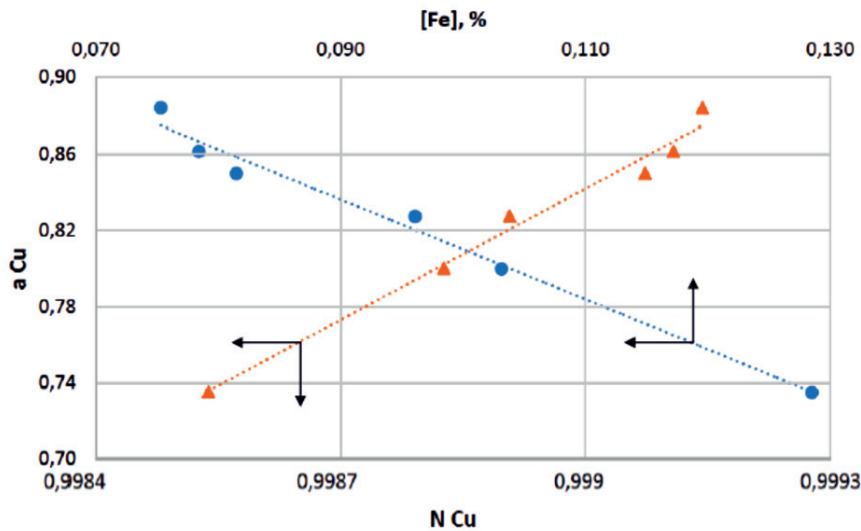


Рис. 1. Зависимость активности меди в сплаве от мольной доли и содержания железа в нем

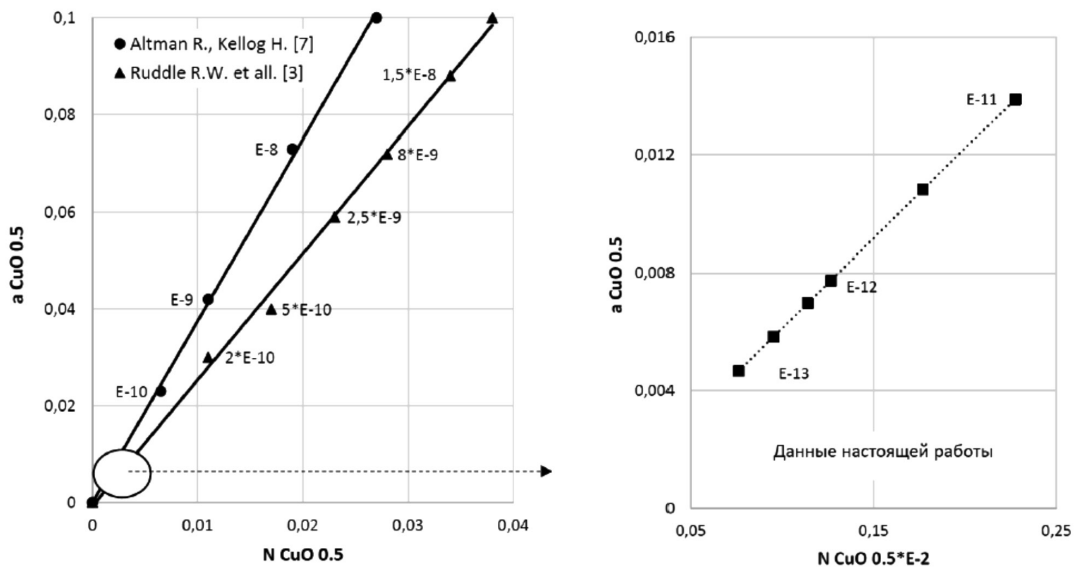


Рис. 2. Изменение активности оксида меди ($a_{CuO 0.5}$) от мольной доли ($N_{CuO 0.5}$) в шлаке. Цифры на рисунках – значение $P_{O_2} = 10^{-n}$, атм.

Линейная зависимость содержания растворенной в шлаке меди от $a_{\text{CuO}0,5}$, показанная на рис. 3, указывает на то, что изменение состава растворителя (шлака) от числа молей компонентов шлака, из расчета на удельную массу шлака, меньше экспериментальной ошибки. В этом случае содержание меди в шлаке прямо пропорционально мольной доле и активности оксида меди ($\text{CuO}_{0,5}$).

На рис. 4 показана зависимость изменения содержания меди в шлаке от парциального давления кислорода (P_{O_2}).

Согласно ионной теории строения шлаков растворимость меди в шлаке падает с ростом температуры, повышением $\gamma_{\text{CuO}0,5}$ снижающего $a_{\text{CuO}0,5}$ и уменьшением кислородного потенциала [6, 12, 13]. Установленные закономерности, представленные

на рис. 3 и 4, полностью подтверждают это положение и показывают хорошую согласованность с данными работ [3, 9].

При фиксированных значениях активности меди в шлаке, давления кислорода и температуры, растворимостью меди в шлаке можно оперировать варьированием $\gamma_{\text{CuO}0,5}$, величина которого определяется ионными взаимодействиями, происходящими в шлаке.

Как известно, железосиликатные расплавы содержат высокополимерные силикатные анионы ($\text{Si}_x\text{O}_y^{z-}$), катионы двух- (Fe^{2+}) и трехвалентного железа (Fe^{3+}) и незначительную концентрацию свободных анионов кислорода (O^{2-}). При этом ионные взаимодействия $\text{Fe}^{2+} - \text{O}^{2-}$ и $\text{Fe}^{3+} - \text{O}^{2-}$, в которых анион O^{2-} представляет собой кислород, происходят на силикатном анионе $\text{Si}_x\text{O}_y^{z-}$ [6, 13].

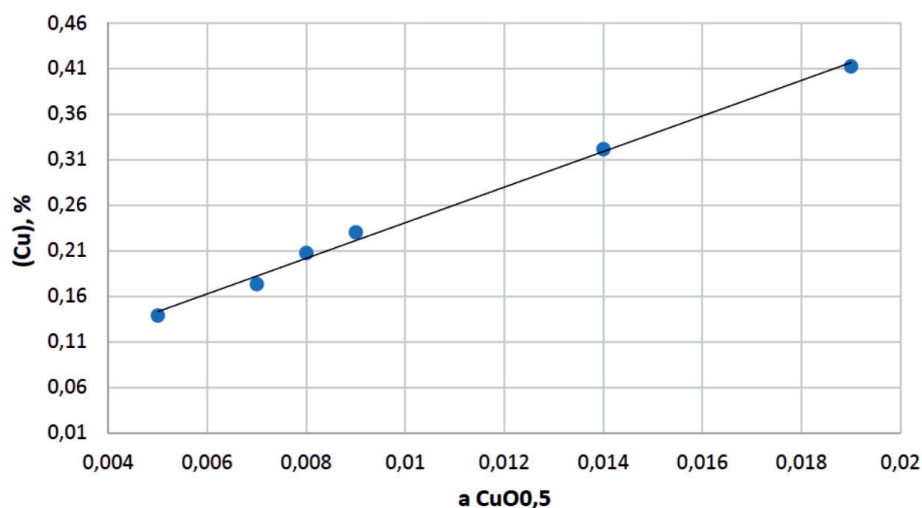


Рис. 3. Зависимость содержания меди в шлаке от $a_{\text{CuO}0,5}$

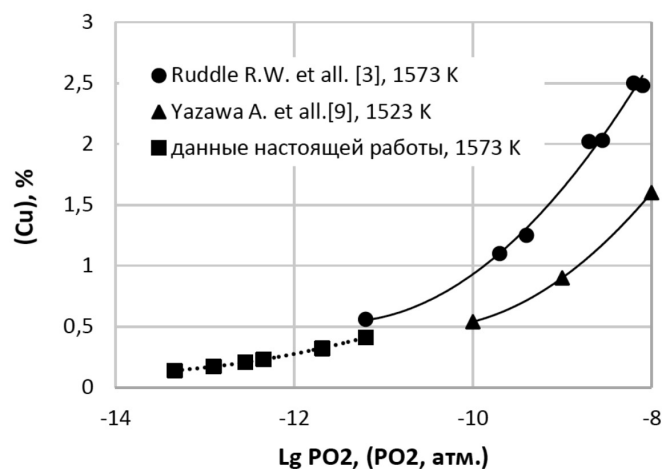


Рис. 4. Зависимость содержания меди в шлаке от парциального давления кислорода (P_{O_2})

Наличие меди в шлаке обуславливает взаимодействие катиона Cu^+ с анионом кислорода O^{2-} . Как показали результаты минералогических исследований твердых проб шлаков каждой серии опытов, содержание магнетита в них практически сведено к минимуму. Смещение редокс-перехода $\text{Fe}^{3+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$ в сторону двухвалентного железа и наличие высокоосновного оксида CaO способствует образованию ферритовых анионов. Следовательно, конечные расплавы будут содержать ферриты, свободные анионы кислорода и катионы Fe^{2+} и Ca^{2+} . В таких расплавах предпочтительными будут взаимодействия катионов Ca^{2+} и Fe^{2+} с анионом кислорода (O^{2-}). Наличие меди в шлаке, по-видимому, будет определяться взаимодействием катиона меди Cu^+ со свободным анионом кислорода, присутствующего в ферритном анионе. Доказательством данного предположения может служить факт, что медь в шлаковых расплавах, полученных после обеднения, в форме силиката не обнаружена. Следовательно, оксид меди (I), взаимодействуя с оксидом железа, связывается в устойчивое соединение дельфоссит (CuFeO_2), которое было обнаружено в твердых пробах шлаков, полученных в результате минералогических исследований.

Выводы

1. На основании результатов экспериментальных исследований проведен термодинамический анализ поведения Cu , Pb , Zn и As в условиях глубоко восстановительного ($P_{\text{O}_2} = 10^{-11} - 10^{-13}$ атм) двухстадийного обеднения высокомедистых шлаков природным газом в присутствии угля.

2. Рассчитаны активность оксида меди (I) в шлаке и активность меди в сплаве, которые были использованы для раскрытия механизма растворимости меди в шлаке с точки зрения ионной природы строения оксидного расплава.

3. Показано, что термодинамические закономерности растворимости меди

в шлаках, протекающие в условиях глубокого восстановительного обеднения высокомедистых шлаков, подчиняются закону Генри.

Список литературы

1. Бодуэн А.Я., Петров Г.В., Мардарь И.И., Иванов Б.С. Извлечение благородных и цветных металлов из техногенного сырья Норильского промышленного региона: практика и исследования // Успехи современного естествознания. 2013. № 3. С. 143–145.
2. Wang Q.M., Guo X.Y., Tian Q.H. Copper smelting mechanism in oxygen bottom-blown Furnace. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2017. № 27. P. 946–953.
3. Ruddle R.W., Taylor B., and Bates A.P. The solubility of copper in iron silicate slags. *Trans. IMM*. 1966. Vol. 75. P. 1–12.
4. Li W.F., Zhan J., Fan Y.Q., Wei C., Zhang C.F., Hwang J.Y. Research and industrial application of a 282 process for direct reduction of molten high-lead smelting slag. *JOM*. 2017. № 69. P. 784–789.
5. Djordjevic P., Natasa Mitevska N., Mihajlovic I. et al. Effect of the slag basicity on the coefficient of distribution between copper matte and the slag for certain metals. *Mineral Processing & Extractive Metall. Rev.* 2014. № 35. P. 202–207.
6. Zivkovic Z., Mitevska N., Mihajlovic I., Nikolic D. The influence of the silicate slag composition on copper losses during smelting of the sulfide concentrates. *JOM*. 2009. № 45 (1) B. P. 23–34.
7. Altman R., Kellogg H.H. Solubility of copper in silica-saturated iron silicate slag. *Trans. IMM*. 1972. Vol. 81 C. P. 163–175.
8. Coursol P., Valencia N.C., Mackey Ph., Bell S., Davis B. Minimization of Copper Losses in Copper Smelting Slag During Electric Furnace Treatment. *JOM*. September 2012.
9. Yazawa A., Takeda Y. Equilibrium Relations between Liquid Copper and Calcium Ferrite Slag. *Trans. Jpn. Inst. Met.* 1982. Vol. 23. P. 328–333.
10. Досмухамедов Н.К., Федоров А.Н., Жолдасбай Е.Е. Распределение Cu , Pb , Zn и As между продуктами двухстадийного восстановительного обеднения высокомедистых шлаков // Цветные металлы. 2019. № 7. С. 7–12.
11. Досмухамедов Н.К., Жолдасбай Е.Е., Нурлан Г.Б. Термодинамические закономерности восстановления высокомедистых шлаков углем // Новости науки Казахстана. 2019. № 1. С. 107–121.
12. Sinclair R.G. The Extractive Metallurgy of Lead. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. 2009. 297 p.
13. Котыхов М.И., Федоров А.Н., Лукавый С.Л., Хабиев Р.П. Изучение распределения меди между шлаком и свинцом в барботажном восстановительном процессе // Цветные металлы. 2014. № 2. С. 40–44.