

МЕТАЛЛУРГИЯ

МРНТИ 53.01.91, 52.01.91

Н.К. Досмухамедов¹, Е.Е. Жолдасбай¹, Г.Б. Нурлан¹

¹Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЫСОКОМЕДИСТЫХ ШЛАКОВ УГЛЕМ

Аннотация. В условиях плавки медных концентратов на богатый штейн и/или на черновую медь основной задачей, требующей решения является организация переработки большого выхода богатых по меди шлаков, содержащих, наряду с медью, такие сопутствующие металлы-примеси, как Pb, Zn, As, Sb и др. Исследование поведения меди и сопутствующих металлов-примесей в условиях восстановительного обеднения высокомедистых шлаков имеет принципиальное значение с точки зрения выбора оптимальных технологических параметров и режимов, обеспечивающих равновесное распределение металлов между продуктами плавки. В настоящей работе на основании сравнительного анализа известных способов обеднения шлаков, широко используемых на практике, обоснован выбор способа обеднения высокомедистых шлаков и проведена термодинамическая оценка возможности восстановительного их обеднения. Проведен термодинамический анализ реакций восстановления оксидов цветных металлов, Fe и As углем и монооксидом углерода в интервале температур 1273...1573 К. Рассчитаны значения свободной энергии Гиббса и константы скорости реакций взаимодействия указанных реакций в зависимости от температуры. Показано, что восстановление богатых по меди шлаков углем обеспечивает селективное разделение металлов по продуктам плавки: Cu – в металлический сплав; Pb, Zn в возгоны и As – в возгоны и частично в сплав.

Ключевые слова: переработка шлаков, высокомедистый шлак, энергия Гиббса, обеднение шлаков, уголь, медь, сплав, возгоны.

• • •

Түйіндеме. Мысты концентраттарды бай штейнге және/немесе қаралы мысқа балқыту жағдайында құрамында мыспен бірге қоспа металдар, яғни Pb, Zn, As, Sb және басқалары бар көлемі үлкен бай шлактарды қайта өңдеуді ұйымдастырудың шешімін табу негізгі мәселе болып табылады. Мысқа бай шлактарды тотықсыздандырып жұтаңдату мыстың және қоспа металдардың беліну тәртібін, балқыту өнімдері арасында металдардың белініп таралу тепе-теңдігін қамтамасыз ететін оптималды технологиялық параметрлер мен режимдерді таңдау жағынан зерттеу принципіалды мәнге ие. Бұл жұмыста

шлактарды жұтаңдату бойынша белгілі әдістердің салыстырмалы талдауы негізінде тәжірибеде кең қолданысқа ие болған, мысқа бай шлактарды жұтаңдату әдісі таңдалынып дәлелденді және олардың тотықсыздандырып жұтаңдану мүмкіндігіне термодинамикалық бағалар берілді. 1273...1573 K температуралары арасында бағалы металдардың, темірдің және мышьяқтың тотықтарын кемірмен және кемірдің монототығымен тотықсыздандыру реакцияларының термодинамикалық талдауы еткізілді. Гиббстің еркіндік энергиясының мәні және температураға байланысты жоғарыда айтылған реакциялардың әрекеттесу жылдамдығының константасы есептелінді. Мысқа бай шлактарды кемірмен жұтаңдатқанда металдардың балқыту енімдері арасында селективті: Cu – металды қорытпаға, Pb, Zn ұшқындарға және As – ұшқындарға және жартылай қорытпаға белінуін керсетті.

Түйінді сөздер: құрамында мысы жоғары шлактар, Гиббс энергиясы, жұтаңдату, тотықсыздандыру, кемір, мыс, қоспалар, балқыма, ұшқындар.

• • •

Abstract. In the conditions of melting copper concentrates for rich matte and / or for rough copper, the main task requiring solution is to organize the processing of a large yield of copper-rich slags containing, along with copper, such accompanying impurity metals as Pb, Zn, As, Sb and others. The study of the behavior of copper and its accompanying impurity metals under conditions of reductive depletion of high-copper slags is of fundamental importance from the point of view of choosing the optimal technological parameters and regimes ensuring an equilibrium distribution of metals between the smelting products.

In this paper, based on a comparative analysis of known methods for depletion of slags widely used in practice, the choice of the method for depletion of high-copper slags is justified, and a thermodynamic evaluation of the possibility of their depletion is carried out. The thermodynamic analysis of the reactions of reduction of non-ferrous metals, Fe and As arsenic oxides with carbon and carbon monoxide in the temperature range 1273 ... 1573 K. The Gibbs free energy and reaction rate constants of reactions of these reactions are calculated as a function of temperature. It is shown that the recovery of copper-rich slags with coal provides selective separation of metals from smelting products: copper - into a metal alloy; lead, zinc in sublime and arsenic - in the sublime and partly in the alloy.

Key words: slag processing, high-copper slag, Gibbs energy, depletion of slag, depletion coal, copper, alloy, sublimes.

Введение. Применение автогенных плавков медных концентратов на богатый штейн и/или на черновую медь, наряду с рядом основных технологических достоинств [1,2], имеет большую привлекательность с точки зрения уменьшения нагрузки на затратный конвертерный передел (периодичность процесса; непостоянство потока серосодержащих газов для производства серной кислоты; высокая степень раз-

боживания серосодержащих газов за счет подсосов; значительные колебания температуры, что сокращает срок службы конвертеров; значительные выбросы серосодержащих газов и пыли). Однако, в этом случае, появляется необходимость решения принципиальной задачи – переработки большого выхода богатых по меди шлаков, содержащих, наряду с медью, такие сопутствующие металлы-примеси, как Pb, Zn, As, Sb и др.

Опыт работы зарубежных предприятий, использующих автогенные процессы для плавки медных концентратов, показывает, что экономически оправданной схемой переработки первичного сульфидного сырья является плавка на богатые штейны с содержанием 60-65% меди, с включением в технологическую схему дополнительного передела – обеднения шлаков, получаемых при плавке [1].

Для разработки технологических решений по организации процесса обеднения шлаков, требуется его всестороннее исследование и анализ с учетом конкретных задач и условий. При этом вопросы изучения поведения Pb, Zn и As, как частых спутников меди в сульфидном сырье и, как следствие, в шлаках представляются актуальными. Особенности поведения данных примесей в условиях обеднения богатых по меди шлаков оказывают влияние на состав и свойства продуктов обеднения, а также, в конечном итоге, на их распределение в соответствующие фазы, образующиеся на последующих переделах технологической цепочки. Примеси сопутствуют меди на всех стадиях её производства, частично переходя в основной продукт на каждой стадии, в том числе, и в товарную медь, на стадии электролитического рафинирования. Наличие свинца, цинка и мышьяка значительно ухудшают свойства меди. Примесь Pb в меди является причиной красноломкости: даже доли процента свинца в меди, вследствие образования легкоплавкой эвтектики, резко снижают её пластичность при повышенных температурах. Примесь As в меди снижает её электропроводность.

В настоящей работе на основании сравнительного анализа известных способов обеднения шлаков, широко используемых на практике, обоснован выбор способа обеднения богатых по меди шлаков и проведен термодинамический анализ поведения меди и металлов-примесей (Pb, Zn, As) при переработке шлаков твердым восстановителем (углем) и продуктами его горения (CO).

Выбор и обоснование способа обеднения шлаков. Вопросам эффективного извлечения меди из плавильных шлаков уделено значительное количество исследований, разработано и внедрено на практике множество вариантов обеднения медеплавильных шлаков, различающихся способом организации, различным аппаратным оформлением и процессами, положенными в основу каждого способа [1-9]. В технической литературе известно значительное количество исследований, где подробно рассмотрены вопросы распределения меди между шлаком и металлическим сплавом в зависимости от различных условий газовой фазы – в области слабо восстановительных, окислительных или сильно окислительных условий ($P_{O_2} > 10^{-10}$ атм). Аналогичных экспериментальных исследований, проведенных в глубоко восстановительных условиях ($P_{O_2} < 10^{-10}$ атм) в литературе встречается значительно реже и зачастую в такой форме, что их сложно использовать для детального анализа условий обеднения шлаков.

При выборе рациональной технологии обеднения шлаков, важно иметь ясное представление о природе потерь извлекаемого металла и механизме его извлечения в целевой продукт обеднения. Известно, что потери меди со шлаком традиционно разделяют на механические (в виде взвеси мелких капель штейна) и растворённые, последние, в свою очередь, включают оксидные потери меди и растворенные потери сульфидов меди. По мере обогащения штейна по меди, растворенные сульфидные потери меди со шлаком увеличиваются, достигая максимума в пределах высокого содержания меди в штейне – 35–55% [4]. При дальнейшем повышении содержания меди в штейне сульфидная растворимость снижается и практически отсутствует при содержании меди в штейне около 80 %. Оксидная растворимость меди монотонно возрастает. Заметный рост оксидных потерь меди со шлаком наблюдается при содержании меди в штейне более 65 – 70%.

Несмотря на имеющийся обширный теоретический и практический материал поиск эффективных схем переработки медеплавильных шлаков до настоящего времени представляет большой интерес. Причем, учитывая превалирующую роль растворенных потерь меди в шлаках в виде ее оксида можно утверждать, что из всех известных способов обеднения шлаков наиболее эффективными представляются восстановительные способы. Так, в работе [3] приведены результаты эффективного обеднения медьсодержащих шлаков. Показано,

что для эффективного извлечения меди из шлака необходимо восстановление шлака проводить в условиях интенсивного барботажа, например, в печи Ванюкова. При этом создаются благоприятные условия для коалесценции образующихся в результате восстановления мелкодисперсных включений меди, и удаление их из шлакового расплава в донную фазу (медно-железистый сплав или медистый чугун).

Результаты экспериментальных исследований работы [5], посвященных изучению процесса глубокого обеднения железосиликатных шлаков по меди с использованием твердых восстановителей показывают, что достичь высокой степени восстановления меди, при незначительном переходе железа в донный сплав, затруднено. Для достижения поставленной цели предложено проводить процесс обеднения шлаков в две стадии: вначале проводить частичное восстановление шлака с получением медного сплава и далее последующую обработку шлака вести небольшим количеством пирита с получением бедного штейна. Однако, дальнейшая переработка полученных штейнов представляет определенные трудности, что делает предложенную схему переработки богатых по меди шлаков не эффективной.

При восстановительном обеднении шлака в одну стадию можно получать железо-медный сплав (медистый чугун), который в дальнейшем можно использовать в качестве износостойкого материала для производства дробящих тел: шаров, стержней, бронеплит шаровых мельниц, импеллеров и статоров флотационных машин. Однако, как показали экспериментальные исследования [5], для глубокого обеднения шлаков по меди до минимального остаточного содержания меди в шлаке (0,06-0,07%), необходимо восстановить из него 40-50 % железа. При такой степени восстановления железа, в получаемом шлаке не всегда обеспечивается соотношение железа и меди требуемое для получения кондиционной по меди стали при последующей переработке шлака на сталь. Несмотря на полученные положительные результаты к недостаткам работы можно отнести не полное изучение поведения примесей (Pb, Zn, As) при восстановительном обеднении шлаков твердыми восстановителями.

Представляет интерес, разработанный в Канаде способ переработки медеплавильных шлаков с последовательным восстановлением всех металлов Strategic Udi process [6]. Комплексная технология состоит из нескольких электропечей. В первой печи ведется восста-

новительная плавка шлака с добавкой кокса, извести и пирита с целью глубокого обеднения шлака по меди и отгонки цинка в пыль. В результате обеднения получают бедный штейн с содержанием до 5% меди, 11-15% железа и железистый шлак, который направляется во вторую электропечь и перерабатывается на чугун (1-1,25% С, 0,12% Р, 0,3% S) с получением силикатно-кальциевого шлака. Процесс ведут с добавкой извести и кокса. Чугун из второй печи в жидком виде направляется в третью электропечь, где подвергается дальнейшей переработке на сталь. Силикатно-кальциевый шлак направляется на производство строительных материалов. В процессе такой переработки из 5,5 т отвального шлака (0,5% Cu, 2% Zn, 33% Fe) при расходе 4,7 т известняка, 0,44 т пирита и 0,6 т угля получали 2 т стали, 0,15 т оксида цинка, 0,15 т серы, 0,025 т меди и 5 т отвального силикатно-кальциевого шлака.

Достоинством данного способа обеднения шлаков является низкий объем отходящих газов и возможность гибкого регулирования условий восстановления, но экономически оправдан он в местах с невысокой стоимостью электроэнергии. К недостаткам способа обеднения шлаков в электропечи можно отнести отсутствие интенсивного перемешивания расплава и донной фазы, в которую извлекаются ценные компоненты, что снижает скорости выделения ценных компонентов в целевой продукт и замедляет процессы формирования и разделения фаз. Указанные недостатки можно отнести, пожалуй, ко всем известным работам, посвященным глубокому обеднению шлаков по меди твердыми восстановителями. Тем не менее, подобные комплексные схемы сочетают в себе высокую экономическую эффективность и минимальный экологический вред, за счет резкого снижения количества отвальных продуктов. При разработке подобных схем, прежде всего, решаются два важных технологических вопроса: а) обеспечение высокой степени извлечения металлов в товарную продукцию и б) эффективное разделение компонентов шлака в отдельные продукты.

Приведенные примеры свидетельствуют о том, что наиболее подходящим методом для обеднения богатых по цветным металлам шлаков, в которых ценные компоненты находятся в основном в виде растворенных оксидов, являются восстановительные методы. Причем, с учетом имеющихся недостатков перечисленных способов можно утверждать, что с точки зрения эффективности извлече-

ния цветных металлов наиболее перспективными представляются восстановительные способы обеднения шлаков, осуществляемых в условиях интенсивного барботажа расплава с использованием относительно дешевых твердых (например, угля) или газообразных (природный газ, газогенераторный газ и др.) восстановителей. В этом случае в зависимости от режима ведения процесса, основным продуктом обеднения может являться металлический либо сульфидный сплав (штейн), в которых будут концентрироваться извлекаемые из шлаков цветные металлы. На практике уже существуют различные конструкции аппаратов для барботажного обеднения шлаков, различающиеся способом подачи дутья (верхнее, боковое) и аппаратурным оформлением в целом. В частности, разработаны технологии обеднения медеплавильных шлаков в печах Ausmelt, мазутных печах на заводе Нонма в Китае, а также в печах с конструкцией, аналогичной горизонтальному конвертеру - Horno de Limpieza de Escoria (HLE) на заводе El Teniente компании Codelco [7-9].

Общим достоинством барботажных технологий обеднения является их высокая производительность, достигаемая за счет ускорения протекания всех физико-химических процессов при использовании интенсивного перемешивания расплава, а также относительно низкие энергетические затраты. К недостаткам данных способов можно отнести недолговечность футерованных аппаратов в условиях интенсивного перемешивания шлакового расплава. Кроме того, периодичность используемых в настоящее время процессов (Ausmelt, HLE) создает известные неудобства, особенно в условиях крупномасштабного производства с большим количеством образующихся богатых шлаков.

Таким образом, из проведенного анализа можно заключить, что восстановительное обеднение богатых по меди шлаков можно осуществлять в одну стадию с получением медистого чугуна и деметаллизированной силикатной части, который можно использовать для производства строительных материалов. С данных позиций, наиболее удачными являются кессонированные аппараты непрерывного действия, среди которых наиболее оптимальным, по организации процесса, является печь Ванюкова (ПВ). В отличие от футерованных металлургических агрегатов, печь Ванюкова, несмотря на имеющееся в ней интенсивное перемешивание шлакового расплава, обладает

достаточно надежным сроком эксплуатации. Как показывают результаты промышленной эксплуатации ПВ, срок ее службы без капитального ремонта превышает 2 года. Данное преимущество создает предпосылки использования ПВ для создания эффективного процесса барботажного восстановительного обеднения шлаков.

Принципы, заложенные в процессе Ванюкова, обеспечивают возможность гибкого регулирования не только составом получаемых продуктов при обеднении, но и выбрать оптимальную конструкцию печи, обеспечивающей проведение в одном агрегате вначале окисление шлака, а затем – восстановление окисленного шлака твердым восстановителем. При этом, после обеднения шлака по цветным металлам, возможно более глубокое восстановление из него и железа, с получением чугуна и силикатного остатка от шлака. Вполне очевидно, что для организации и создания технологии обеднения богатых по меди шлаков необходимо изучение поведения меди и распределения металлов-примесей между продуктами, получаемыми при обеднении шлаков.

Методика исследования. Оценка вероятного направления реакций, протекающих между компонентами высокомедистого шлака и углеродсодержащими восстановителями, проводилась по изменению термодинамических величин системы. Основное внимание уделено реакциям восстановления оксидов цветных металлов, железа и мышьяка углеродом и продуктами его горения (СО).

Термодинамический анализ проведен с учетом зависимости изобарно-изотермических потенциалов (свободная энергия Гиббса) реакций от температуры. В основу расчетов положен метод минимизации полного потенциала энергии Гиббса.

Изменение свободной энергии Гиббса (ΔG_{\circ}^T) рассчитывали по следующей формуле:

$$\Delta G_T^{\circ} = \Delta H_T^{\circ} - \Delta S_T^{\circ} * T, \quad (1)$$

где: ΔH_T° , ΔS_T° - стандартные значения энтальпии и энтропии системы соответственно; T - абсолютная температура, К.

При расчетах энергий Гиббса (ΔG_{\circ}^T) искомым реакциям за стандартное состояние оксидов и сульфидов цветных металлов и железа принят чистый переохлажденный жидкий оксид (MeO) и сульфид (MeS). Для ряда летучих соединений цинка и мышьяка за стандарт-

ное состояние приняты газы. Исходные данные для расчетов получены из работы [10] и веб-сайта NIST-JANAF Thermo chemical Tables (<http://kinetics.nist.gov/janaf>).

Термодинамические расчеты реакций, принятые к анализу, проведены с использованием специальной программы, разработанной авторами.

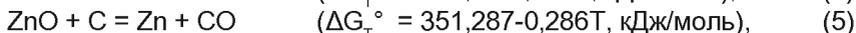
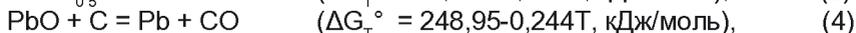
Изменение константы равновесия реакции (K_p) в зависимости от температуры определяли исходя из выражения:

$$\Delta G_T^\circ = -R \cdot T \ln K_p = -19,155 \cdot T \lg K_p, \quad (2)$$

где, R - универсальная газовая постоянная ($R = 8,31696 \cdot 10^{-3}$ кДж/град моль).

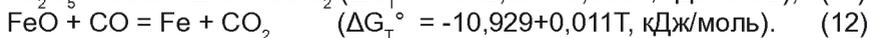
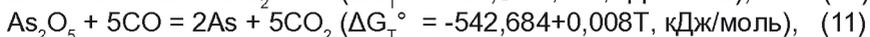
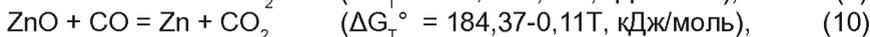
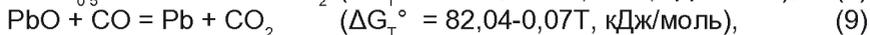
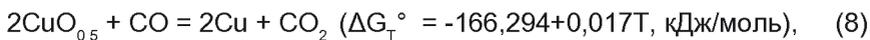
Результаты исследования и их обсуждение. Учитывая, что в исходном окисленном шлаке цветные металлы и мышьяк представлены в виде своих оксидов, то, следовательно, реакции взаимодействия с углем и продуктами его горения будут протекать с оксидами указанных металлов. Термодинамическая вероятность протекания той или иной реакции оценена исходя из изменений термодинамических величин.

Химизм восстановления оксидов цветных металлов и мышьяка углеродом в зависимости от температуры можно представить системой протекания следующих реакций:



Наряду с углеродом, при его горении, в расплаве будет образовываться монооксид углерода (CO), который не вступая во взаимодействие с оксидами цветных металлов и железа уносится из реакционной зоны вместе с отходящими газами. Однако, при этом, все-таки нельзя пренебрегать частичной термодинамической возможностью восстановления оксидов металлов с CO.

Химизм восстановления оксидов цветных металлов, железа и мышьяка с угарным газом в зависимости от изменения температуры можно представить системой протекания следующих реакций:



Результаты расчетных значений свободной энергии Гиббса (ΔG_T°) и константы равновесия реакций (3) - (12) в температурном интервале 1273...1573 К для реакций взаимодействия оксидов цветных металлов, железа и мышьяка с твердым углем приведены на рисунке 1.

Зависимость свободной энергии Гиббса (ΔG_T°) и константы равновесия реакций (3) - (12) от температуры для реакций взаимодействия оксидов цветных металлов, железа и мышьяка с продуктом горения угля (CO) показана на рисунке 2.

Сравнительный анализ результатов термодинамических расчетов реакций (3) - (12), с данными, полученными с использованием программы Thermo Base 2.15, показали хорошую сходимость конечных значений искомых величин свободной энергии Гиббса.

Из приведенных результатов видно, что вероятность протекания реакций (3)-(9) и (11) достаточно высока. Положительные значения свободной энергии Гиббса реакций (10) и (12) в интервале температур 1273...1573 К указывают на затруднительный характер их протекания. Высокие значения свободной энергии Гиббса реакций (3), (6), (8) и (11) свидетельствуют о том, что при восстановлении шлаков углем и монооксидом углерода, в первую очередь, следует ожидать восстановления меди и мышьяка из их оксидов в виде меди и мышьяка. При температурах ведения процесса обеднения (1473 К) металлическая медь начнет выделяться в самостоятельную фазу с дальнейшим образованием донной фазы в нижней части расплава. Причем, значения свободной энергии Гиббса реакций восстановления меди, как углем, так и монооксидом углерода при температуре 1473 К имеют высокие значения ($\Delta G_{1473}^\circ = -178,22 \text{ кДж/моль}$ и $\Delta G_{1473}^\circ = -91,85 \text{ кДж/моль}$, соответственно) и растут с увеличением температуры. Металлический мышьяк, образующийся до образования металлической фазы меди, вначале будет возгоняться в газы, а при появлении жидкой фазы меди, согласно диаграмме состояния бинарной системы медь – мышьяк, начнет растворяться и концентрироваться в жидкой меди [11].

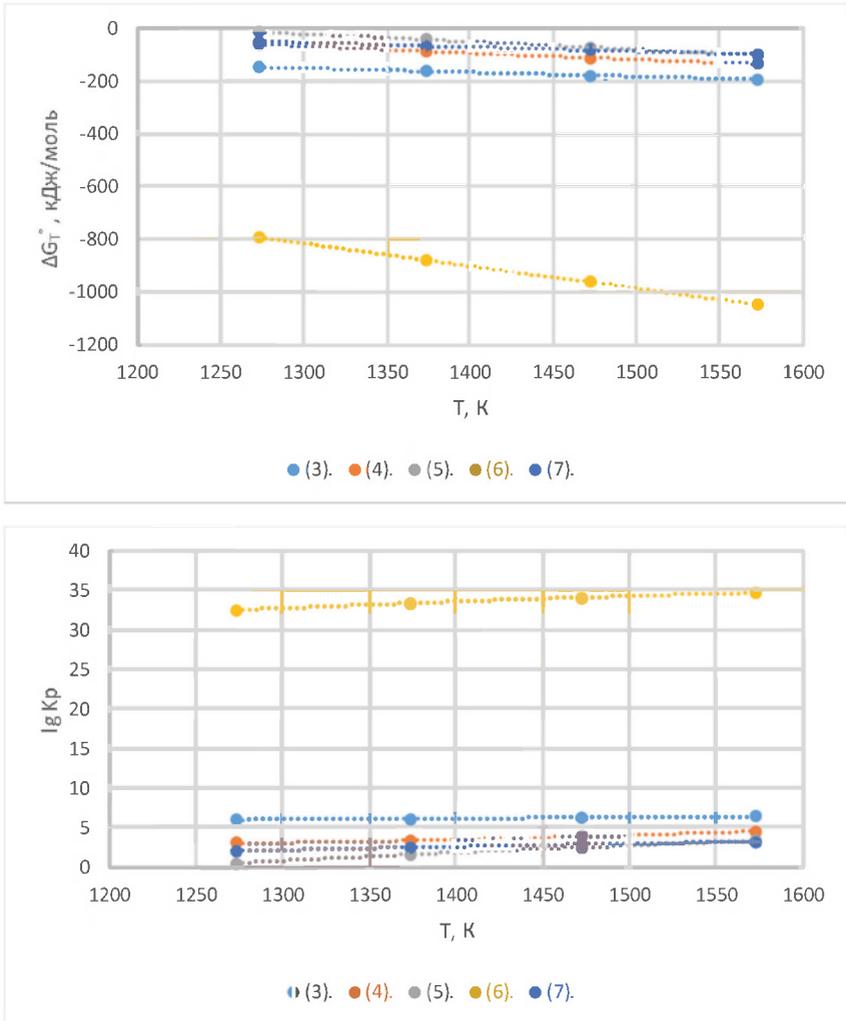


Рисунок 1 – Зависимость свободной энергии Гиббса (ΔG_T°) и константы равновесия реакций (3) - (7) от температуры

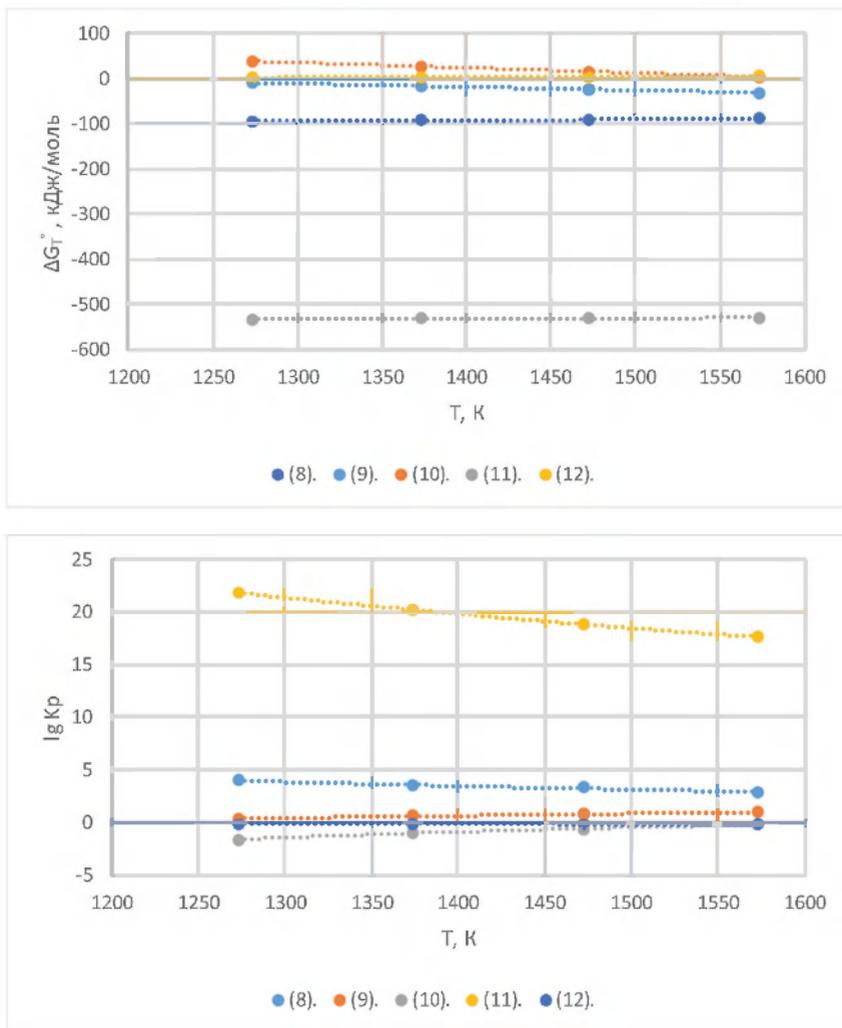


Рисунок 2 – Зависимость свободной энергии Гиббса (ΔG°) и константы равновесия реакций (8) - (12) от температуры

Реакции взаимодействия оксидов свинца и цинка углем имеют высокие значения свободной энергии Гиббса при температуре ведения процесса обеднения ($\Delta G^{\circ}_{1473} = -110,45$ кДж/моль и $\Delta G^{\circ}_{1473} = -70,6$ кДж/моль, соответственно) и также сдвигаются в сторону образования металлического свинца и цинка, которые в условиях ведения процесса обеднения возгоняются вместе с газами. Восстановление железа из его оксида протекает исключительно за счет твердого углерода ($\Delta G^{\circ}_{1473} = -81,75$ кДж/моль). Металлическое железо, образующее по реакции (7), растворяясь в жидкой меди, будет концентрироваться в донной фазе, формируя медно-железистый сплав на основе меди. Восстановление железа из его оксида монооксидом углерода не представляется возможным в силу положительного значения свободной энергии Гиббса.

Полученные результаты показывают принципиальную возможность обеднения богатых по меди шлаков восстановлением твердым восстановителем – углем. При обеднении шлаков можно достичь высокого извлечения меди в донную фазу (металлический сплав) и высокой возгонки свинца и цинка в газы. Незначительный переход мышьяка в донную фазу, ввиду малых его содержаний в исходном шлаке, на свойства получаемого металлического сплава значительного влияния не окажет. Выбор оптимальных параметров и технологические режимы процесса зависят от расхода восстановителя, температуры и продолжительности интенсивного перемешивания расплава, которые должны определяться экспериментальным путем, исходя из состава исходного шлака.

Выводы:

1. На основании сравнительного анализа способов обеднения шлаков показана принципиальная возможность осуществления обеднения богатых по меди шлаков в печи Ванюкова, позволяющая в одном агрегате проводить первоначальное окисление шлака, затем – его восстановление твердым углем;
2. Установлено, что в условиях восстановления высокомедистых шлаков углем и продуктами его рения (СО) достигается селективное разделение металлов по получаемым продуктам плавки: Cu – в железо-медистый металлический сплав; Pb и Zn в возгоны и As – в возгоны и частично в сплав;
3. При выборе технологических режимов процесса обеднения

высокомедистых шлаков необходимо соблюдать заданный расход твердого восстановителя и продолжительность времени продувки шлака, определяемый из расчета состава исходного шлака, что позволит достичь равновесного распределения меди и сопутствующих металлов-примесей между продуктами плавки.

Список литературы

1 Мечев В.В., Быстров В.П., Тарасов А.В. Автогенные процессы в цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1991.- 413 с.

2 *Moskalyk R.R., Alfantazi A.M.* Review of copper pyrometallurgical practice: today and tomorrow // *Minerals Engineering*. – 2003. – V.16. – P.893–919.

3 *Ванюков А. В., Уткин Н.И.* Комплексная переработка медного и никелевого сырья. Учебник для вузов.– Челябинск: Металлургия, 1988.-400 с.

4 *Nagamori M.* Metal loss to slag: Part I. Sulfidic and oxidic dissolution of copper in fayalite slag from low grade matte // *Metallurgical Transactions*. – 1974. – V.5. – P.531-538.

5 *Русаков М.Р.* Процессы высокоинтенсивной электроплавки и высокоинтенсивного обеднения шлаков // Новые процессы в металлургии никеля, меди и кобальта. Теория и практика. Труды Института Гипронибель. –М.: Изд. Дом «Руда и металлы». – 2000. – С.126-138.

6 *Нус Г.С.* Обеднительная шлаковая электропечь – технологическое долголетие // Цветные металлы. – 2009. – № 2. – С.59-61.

7 *Norbert L. Piret.* Cleaning copper and Ni/Co slags: The technical, economic, and environmental aspects // *JOM*. – 2000. – V. 8. – P.18-20.

8 *Hughes S.* Applying ausmelt technology to recover Cu, Ni, and Co from slags // *JOM*. – 2007. – V.52. – P.30-33.

9 *Demetrio S., Ahumada J., Duran M.A., Mast E.* Slag cleaning: The Chilean copper smelter experience // *JOM*. – 2000. – V.8. – P.20-25.

10 *Turkdogan E.T.* Physical Chemistry of High Temperature Technology. Academic Press, 1980.

11 *Лякишев Н.П.* Диаграммы состояния двойных металлических систем // М.: Машиностроение, 1996-2000.- 992 с.