

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.053:669.4:669.431.22

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-24-30>

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАВКИ СВИНЦОВОГО КЕКА

Мальцев Г.И., Тимофеев К.Л., Попов А.И.

АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): статья посвящена вопросу создания экологически безопасной, технологически эффективной и экономически выгодной высокопроизводительной схемы по переработке свинецсодержащих промпродуктов и отходов. На примере пирометаллургической технологии восстановительной плавки свинцового кека (~35% Pb) и силикатного шлака (~22% Pb) сформулированы актуальные проблемы оптимизации традиционных методов комплексной переработки полиметаллических отходов и промпродуктов с переводом цветных металлов в товарные продукты посредством компьютерного моделирования. **Цель работы:** изучение зависимостей фазового состава и распределения элементов по продуктам плавки от содержания компонентов исходной шихты, а также возможности термодинамического прогнозирования оптимального состава шихты для восстановительной плавки свинцового кека ОАО «Электроцинк» (г. Владикавказ) и силикатного шлака. **Используемые методы:** с помощью программного пакета “Outotec's Chemical Reaction and Equilibrium Software HSC Chemistry” выполнены балансовые расчеты многокомпонентных составов равновесия в гетерофазной системе «газ–жидкость–твердое» при восстановительной плавке свинцового кека и силикатного шлака. **Новизна:** к элементам новизны относится одновременная плавка свинцового кека и силикатного шлака, а также использование в качестве восстановителей, наряду с коксом, металлической стружки и железной руды, что сделало возможным утилизацию техногенных отходов. **Результат:** в процессе восстановительной плавки в газовую фазу переходит преимущественно цинк, а в составе металлической фазы концентрируются свинец, медь и сурьма. При оптимальном составе шихты (67% – свинцовый кек; 9% – шлак силикатный; 2% – стружка железная; 3% – известняк; 12% – кокс) практически полностью переходят в металлическую фазу свинец, медь (>99%), большая часть сурьмы (>88%) и мышьяка (>78%); цинк распределяется между газовой (~67%) и шпейзо-шлаковой (~31%) фазами вместе с окисленным железом (~54%). **Практическая значимость:** получены исходные данные для оптимизации режима восстановительной плавки полиметаллических отходов и промпродуктов, что позволит расширить номенклатуру материалов, содержащих свинец, для комплексной пирометаллургической переработки с получением товарных продуктов цветных металлов.

Ключевые слова: плавка, кек, шихта, возгоны, шлак, штейн, металл, свинец.

Введение

На медеплавильных предприятиях в техногенных отходах содержатся значительные количества цветных и токсичных металлов. Metallургические пыли с высоким содержанием свинца и цинка подвергают сернокислотному выщелачиванию: из растворов получают цинк или его соли; в кеках концентрируют свинец и олово [1–3]. Разработан ряд схем и технологий переработки свинецсодержащих промпродуктов, однако они не нашли широкого промышленного применения, в результате чего проис-

ходит накопление свинецсодержащих отходов. Актуальным является вопрос о создании экологически безопасной, технологически эффективной и экономически выгодной высокопроизводительной схемы по переработке свинецсодержащих промпродуктов и отходов [4–6]. Технологические и экологические недостатки пирометаллургической схемы определяют необходимость ее оптимизации для комплексной переработки полиметаллических отходов и промпродуктов с извлечением свинца [7–9].

Целью работы является изучение зависимостей фазового состава и распределения элементов по продуктам плавки от содержания компо-

© Мальцев Г.И., Тимофеев К.Л., Попов А.И., 2017

нентов исходной шихты, а также возможности термодинамического прогнозирования оптимального состава шихты для восстановительной плавки свинцового кека (35,6% Pb) ОАО «Электроцинк» (г. Владикавказ) с фазовым составом, мас. %: 45,84 – PbCO₃; 6,84 – ZnS; 5,2 – ZnOFe₂O₃; 3,1 – SnO; 2,28 – Fe₂O₃; 2,8 – SiO₂; 1,7 – CaO; 1,6 – As₂O₃; 1,1 – Sb₂O₃; 0,6 – CuO, и силикатного шлака (22,5% Pb) плавки медеэлектролитного шлака АО «Уралэлектромедь» с фазовым составом, мас. %: 30,0 – SiO₂; 24,24 – PbO; 23,58 – Sb₂O₃; 3,3 – CaO; 1,43 – Fe₂O₃; 0,79 – As₂O₃; 0,75 – CuO, для максимального перевода свинца в металлическую фазу.

Методика исследований

Для переработки образующихся свинецсодержащих промпродуктов в филиале АО «Уралэлектромедь» «Производство сплавов цветных металлов» (ПСЦМ г. Верх-Нейвинск) специалистами комбината предварительно был предложен следующий годовой состав шихты, т(сух)/мас. %: 600,0/8,7 – шлак силикатный;

4639,0/67,2 – кек свинцовый; 262,6/3,8 – лигносульфонат; 189,8/2,7 – руда железная; 157,0/2,3 – стружка железная; 209,8/3,0 – известняк; 844,1/12,2 – кокс. В результате ожидали получить следующие продукты плавки при 1200°C, т/мас. %: 1844,8/26,7 – свинец черновой; 1828,5/26,5 – шлак; 449,4/6,5 – возгоны (табл. 1). Предстояло выявить влияние отдельных компонентов шихты на состав и количество продуктов восстановительной плавки свинцового кека и силикатного шлака. При выполнении балансовых расчетов многокомпонентных составов равновесия в гетерофазной системе «газ–жидкость–твердое» использовали функцию «Equilibrium Composition» программы «Outotec's Chemical Reaction and Equilibrium Software HSC Chemistry» [10–13]. За основу в качестве базового варианта была взята шихтовка, предложенная специалистами ОАО «Электроцинк», с соответствующим содержанием, т: 810,3 – C; 149,2 – Fe; 115,9 – FeO; 110,2 – CaO, которому соответствуют единичные коэффициенты массы ($K_{C, Fe, FeO, CaO} = 1,0$).

Таблица 1

Состав компонентов шихты и продуктов плавки, т/мас. %

Материал	Pb	Cu	Zn	As	Sn	Sb
Поступило						
Шлак силикатный	135,0/22,5	3,7/0,6	–	3,4/0,6	–	118,4/19,7
Кек свинцовый	1649,2/35,6	23,2/0,5	278,3/6,0	55,8/1,2	125,9/2,7	39,4/0,9
Получено						
Свинец черновой	1595,0/86,5	23,6/1,3	0,8/0,05	23,7/1,3	89,4/4,8	126,3/6,8
Шлак	44,6/2,4	1,6/0,1	77,9/4,3	13,6/0,7	29,0/1,6	18,9/1,0
Возгоны	135,6/30,2	1,4/0,3	194,8/43,4	21,3/4,7	6,7/1,5	11,4/2,5
Материал	Fe	Bi	SiO ₂	CaO	Au, кг/гг ⁻¹	Ag
Поступило						
Шлак силикатный	6,0/1,0	–	180,0/30,0	19,5/3,3	15,8/26,3	1,95/0,32
Кек свинцовый	185,6/4,0	7,0/0,2	128,5/2,8	78,9/1,7	3,3/0,7	0,55/0,01
Руда железная	90,1/47,5	–	4,4/2,3	4,9/2,6	–	–
Стружка железная	149,2/95,0	–	–	–	–	–
Известняк	0,5/0,2	–	2,9/1,4	110,2/52,5	–	–
Кокс	12,7/1,5	–	64,6/7,7	4,5/0,5	–	–
Получено						
Свинец черновой	–	6,3/0,3	–	–	18,1/9,8	2,37/0,13
Шлак	417,4/22,8	0,5/<0,01	357,5/19,6	204,9/11,2	0,4/0,2	0,05/<0,01
Возгоны	22,2/4,9	0,1/<0,01	21,7/4,8	12,2/2,7	0,4/0,8	0,05/0,011

Результаты и их обсуждение

При выполнении термодинамических расчетов равновесных систем продуктов плавки изменяли исходное содержание указанных соединений и элементов в следующих пределах:

- углерод 444–1150 т ($K_C = 0,55–1,42$);
- железо 70,5–246 т ($K_{Fe} = 0,47–1,65$);
- оксид железа 57,5–158 т ($K_{FeO} = 0,64–1,75$);
- оксид кальция 100–278 т ($K_{CaO} = 0,46–1,28$).

Значения степени перехода элементов из состава исходной шихты в продукты плавки от содержания углерода в шихте по программе «Outotec's Chemical Reaction and Equilibrium Software HSC Chemistry» в сравнении с данными предварительного расчета (прогноз) представлены в табл. 2–3.

Таблица 2

Распределение элементов (%) в возгоны и шлаковую фазу от содержания углерода

K_C	C, %	Pb	Sb	Sn	Zn	Sn	Fe
		Возгоны			Шлак		
0,548	94,4	0,14	100	1,24	42,9	98,76	3,78
0,671	77,6	0,13	100	1,27	35,9	98,73	2,88
0,796	65,86	0,12	100	1,30	30,7	98,7	2,32
0,919	57,2	0,116	100	1,32	26,8	98,68	1,95
1,043	50,6	0,112	100	1,34	23,6	98,66	1,68
1,166	45,3	0,109	100	1,35	21,1	98,65	1,47
1,283	41,05	0,107	100	1,36	19,1	98,64	1,31
1,419	37,5	0,105	100	1,37	17,4	98,63	1,18
Прогноз	50	7,6	7,2	5,3	28,0	23,0	95,0

Таблица 3

Распределение элементов (%) в штейновую и металлическую фазы от содержания углерода

K_C	C, %	Fe	Zn	Fe	Pb	Zn	Cu	Bi
		Штейн		Металл				
0,548	94,4	12,00	20,42	84,22	99,86	36,68	100	100
0,671	77,6	11,96	20,53	85,16	99,87	43,57	100	100
0,796	65,86	11,93	20,60	85,75	99,88	48,7	100	100
0,919	57,2	11,91	20,65	86,14	99,84	52,55	100	100
1,043	50,6	11,90	20,68	86,42	99,88	55,72	100	100
1,166	45,3	11,89	20,71	86,64	99,891	58,19	100	100
1,283	41,05	11,88	20,73	86,81	99,893	60,17	100	100
1,419	37,5	11,87	20,74	86,95	99,895	61,86	100	100
Прогноз	50	–	70,0	–	89,4	0,3	88	90

Определены количественный и фазовый состав продуктов плавки для базового варианта шихтовки, т / мас. %:

- возгоны (1934,22/100): 1560/80,65 CO₂; 370/19,13 SbO; 2,31/0,12 PbS; 1,91/0,1 SnO;
- шлаковая фаза (280,4/100): 146/52,07 SnO; 51/18,19 ZnO; 49,9/17,8 Zn₂SiO₄; 22,1/7,88 ZnSiO₃; 9,25/3,3 FeO; 0,46/0,16 2FeO·SiO₂; 1,69/0,6 SnO₂;
- штейновая фаза (276,55/100): 85,8/31,03 ZnS; 188/67,98 FeAs₂; 2,75/0,99 FeS;
- металлическая (элементная) фаза (3542,29/100): 648/18,29 C; 606/17,1 Fe; 1920/54,2 Pb; 320/9,03 Zn; 39,3/1,11 Cu; 8,99/0,25 Bi.

Зависимость фазового состава продуктов плавки от содержания углерода в шихте представлена на рисунке.

После выполнения расчетов выявлены следующие зависимости:

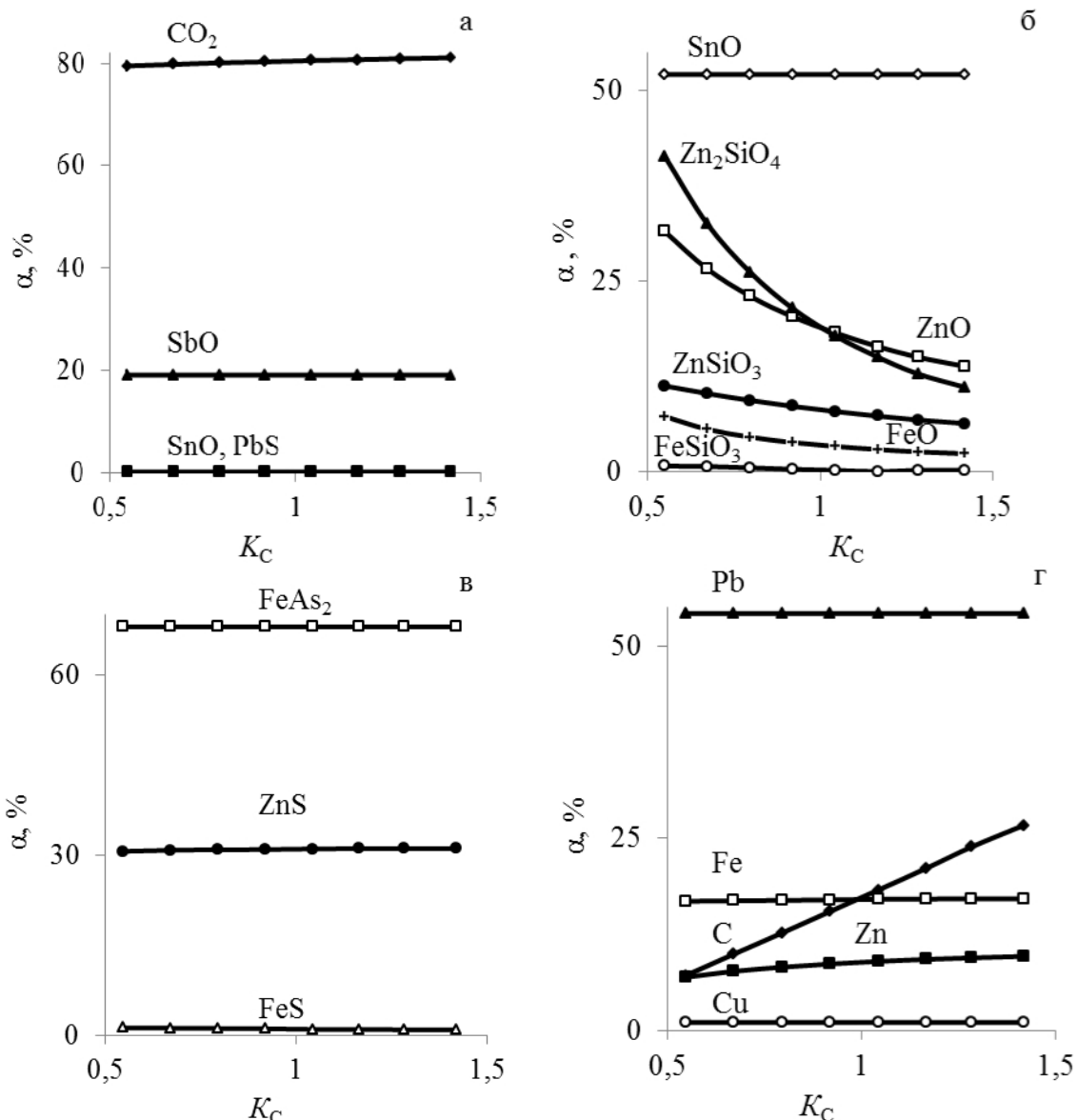
– в газовую фазу полностью переходит сурьма (прогноз 7,2% Sb); менее 1% свинца (прогноз 7,6% Pb) и ~1,3% олова (прогноз 5,3% Sn); количество возгоняемого углерода в составе CO₂ постоянно (~50% от базового значения 844,1 т) и не зависит от содержания кокса в шихте (444–1150 т);

– в шлак полностью переходит олово (прогноз 23% Sn); 3,8–1,2% железа (прогноз 95% Fe); 42,9–17,4% цинка (прогноз 28% Zn);

– в штейн переходят ~20,5% цинка и ~12% железа; суммарно в шлак и штейн переходят в базовом варианте 44,3% цинка (28% Zn прогноз) и 13,6% железа (прогноз 95% Fe);

– в металлической фазе остаются практически полностью (≥99,9%) медь, висмут (прогноз 88–90% Cu, Bi) и свинец (прогноз ~90% Pb), больше половины цинка (~55% Zn); сюда же отнесен избыток реагентов, не востребуемых в химических реакциях восстановления – железо (~86% Fe) и углерод 5,6–62,5% (49,4% C для базового варианта), обеспечивающий тепловой режим плавки.

При изменении содержания в шихте железа металлического ($K_{Fe} = 0,47–1,65$) и оксида железа ($K_{FeO} = 0,64–1,75$) различия в распределении элементов по продуктам плавки, по сравнению с базовым вариантом шихтовки, не превышают одного процента. В случае оксида кальция ($K_{CaO} = 0,46–1,28$), уменьшается содержание цинка в шлаковой фазе в интервале 27,2–21,6% за счет возрастания его количества в металлической фазе 52,2–57,7%; по остальным элементам изменений, в сравнении с базовым вариантом, не выявлено.



Зависимость фазового состава продуктов плавки: возгоны (а); шлак (б); штейн (в); металлическая (элементарная) (г) от содержания углерода в шихте

Итак, выполненный балансовый расчет многокомпонентных составов равновесия в гетерофазной системе «газ–жидкость–твердое» по программе «Outotec's Chemical Reaction and Equilibrium Software HSC Chemistry» показал, что:

- в базовом варианте шихтовки задан практически двукратный избыток кокса как восстановителя оксидов металлов;
- свинец практически полностью переходит в металлическую фазу, как и медь с висмутом;
- железо лишь на 13–14% окисляется в реакциях восстановления с переходом в виде сульфида и оксида в штейно-шлаковую фазу, подавляющее его количество остается в элементной форме;

– цинк приблизительно поровну распределяется между металлической и штейно-шлаковой фазами;

– сурьма полностью возгоняется.

Для проверки адекватности результатов выполненных расчетов перевода свинца в металлическую фазу проведены лабораторные плавки при $1150\text{ }^\circ\text{C}$ и единичных коэффициентах массы ($K_{C, Fe, FeO, CaO} = 1,0$) шихты состава, г(сух)/%: 10,2/12,9 – шлак силикатный; 50,0/63,3 – кек свинцовый; 2,9/3,7 – лигносульфонат; 2,3/2,9 – руда железная; 1,7/2,2 – стружка железная; 2,3/2,9 – известняк; 9,6/12,2 – кокс. В результате получены следующие продукты плавки, г/%: 24,1/30,5 – свинец черновой; 15,9/20,1 – штейно-шлаковая фаза; 5,14/6,5 – пылегазовая фаза (табл. 4).

Компоненты шихты и продукты лабораторной плавки, г/%

Материал	Pb	Fe	As	Sb	Cu	Zn
Поступило						
Шлак силикатный	2,3/22,5	0,1/1,0	0,06/0,6	2,01/19,7	0,06/0,6	–
Кек свинцовый	17,8/35,6	2,0/4,0	0,6/1,2	0,45/0,9	0,25/0,5	3,0/6,0
Руда железная	–	1,09/47,5	–	–	–	–
Стружка железная	–	1,62/95,0	–	–	–	–
Известняк	–	<0,01/0,2	–	–	–	–
Кокс	–	0,14/1,5	–	–	–	–
Получено						
Свинец черновой	20,6/85,5	–	1,03/4,26	2,17/9,0	0,31/1,29	0,01/0,04
Шлаковая фаза	0,3/1,9	2,27/14,3	0,14/0,89	0,07/0,46	0,05/0,33	0,92/5,8
Газовая фаза	0,02/0,4	–	–	0,21/4,1	–	2,0/38,9
Невязка баланса	–0,82/4,1	+2,73/54,6	–0,51/77,3	+0,01/0,4	+0,05/16,1	–0,07/2,3

Заключение

Лабораторные плавки подтвердили некоторые положения балансового расчета по программе «Outotec's Chemical Reaction and Equilibrium Software HSC Chemistry», а именно: количественный перевод свинца и меди (~ 100% Pb, Cu) из составов силикатного шлака и свинцового кека в металлическую фазу; переизбыток в шихте металлического железа и железной руды (FeO) в качестве восстановителя (54% Fe от исходного количества в шпейзо-шлаковой фазе). Не совпали результаты по сурьме, которая возгонялась лишь на 8,5% и на 88,2% перешла в металлическую фазу вместе с 78,8% As, что, вероятно, объясняется невозможностью разделения шпейзовой и металлической фазы при данных содержаниях компонентов. Цинк в меньшей степени представлен в шлаковой фазе (30,7%), поскольку 66,7% его количества сконцентрировалось в газовой фазе.

Итак, на примере восстановительной плавки свинецсодержащих промпродуктов показано, что использование балансового расчета многокомпонентных составов равновесия в гетерофазной системе «газ–жидкость–твердое» по программе «Outotec's Chemical Reaction and Equilibrium Software HSC Chemistry» позволяет оптимизировать предварительный состав исходной шихты, т(сух)/мас. %: 600,0/10,89 – шлак силикатный; 4639,0/84,17 – кек свинцовый; 262,6/4,78 – лигно-сульфонат; 60,8/1,09 – руда железная; 50,0/0,91 – стружка железная; 100,0/1,81 – известняк; 400,0/17,26 – кокс, в частности, сократить содержание восстановителей (оксид железа, металлическое железо, кокс) и шлакообразующих компонентов (оксид кальция), а также минимизировать количество контрольных плавков для уточнения количества и состава образующихся продуктов.

Список литературы

- Li Y., Su Z., Qiao Q., 2015, Integrated assessment of process pollution prevention and end-of-pipe control in secondary lead smelting, Resources. Conservation and Recycling, In Press, Corrected Proof., Available online 23. 12. 2015.
- Bai L., Qiao Q., Li Y., 2015, Substance flow analysis of production process: a case study of a lead smelting process, Journal of Cleaner Production, 104, 502–512.
- De la Campa A. M. S., Sánchez-Rodas D., Castanedo Y.G., 2015, Geochemical anomalies of toxic elements and arsenic speciation in airborne particles from Cu mining and smelting activities: Influence on air quality, Journal of Hazardous Materials, 291, 18–27.
- Trpčevská J., Hofková B., Briančin J., 2015, The pyrometallurgical recovery of zinc from the coarse-grained fraction of zinc ash by centrifugal force, International Journal of Mineral Processing, 143, 25–33.
- Ebin B., Isik M.I., 2016, Chapter 5 – Pyrometallurgical Processes for the Recovery of Metals from WEEE, WEEE Recycling, 107–137.
- Binnemans K., Jones P.T., Blanpain B., 2015, Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: a critical review, Journal of Cleaner Production, 99, 17–38.
- Пат. 2094509 Российская Федерация, МПК С22В13/02, С22В7/00. Способ получения свинца из отходов / Г.Ф. Казанцев, Н.М. Барбин, Г.К. Моисеев, Л.А. Маршук, Л.Е. Ивановский, Н.А. Ватолин, заявитель и патентообладатель Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН. № 94029711/02; заявл. 08.08.1994; опубл. 27.10.1997.
- Пат. 2114927 Российская Федерация, МПК С22В13/02, F27В17/00. Способ пирометаллургической переработки свинецсодержащих материалов и печь для его осуществления / А.В. Гречко, Е.И. Калнин, А.Д. Бессер, А.В. Тарасов; заявитель и патентообладатель ОАО Институт «Гинцветмет». № 97108450/02; заявл. 21.05.1997; опубл. 10.07.1998.
- Научно-технический отчет о выполнении 5 этапа Госу-

- дарственного контракта № 16.740.11.0522 от 16.05.2011 / ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»; Руководитель С.В. Карелов. ГРНТИ 53.37.13. Екатеринбург, 2013. 125 с. Отв. исполн. О.С. Анисимова, С.В. Мамяченков.
10. Torres C.M., Taboada M.E., Graber T.A., 2015, The effect of seawater based media on copper dissolution from low-grade copper ore, *Miner. Eng.*, 71, 139–145.
 11. Puts G.J., Crouse P.L., 2014, The influence of inorganic materials on pyrolysis of polytetrafluoroethylene. Pt. 1: The

- sulfates and fluorides of Al, Zn, Cu, Ni, Co, Fe, and Mn, *J. Fluorine Chem.*, 168, 260–267.
12. Sundman B., Lu X.-G., Ohtani H., 2015, The implementation of an algorithm to calculate thermodynamic equilibria for multi-component systems with non-ideal phases in a free software, *Comput. Mater. Sci.*, 101, 127–137.
 13. Littlejohn P., J. Vaughan J., 2012, Selectivity of commercial and novel mixed functionality cation exchange resins in mildly acidic sulfate and mixed sulfate-chloride solution, *Hydrometallurgy*, 121-124, 90–99.

Поступила 20.02.17.

Принята в печать 30.05.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-24-30>

THERMODYNAMIC PREDICTION OF REDUCTION SMELTING OF LEAD CAKE

Gennady I. Maltsev – D.Sc. (Eng.), Senior Researcher, Lead Specialist of the Research Center Uralelectromed JSC, Verkhnyaya Pyshma, Russia. E-mail: mgi@elem.ru

Konstantin L. Timofeev – Ph.D. (Eng.), Chief of Hydrometallurgy Uralelectromed JSC, Verkhnyaya Pyshma, Russia. E-mail: K.Timofeev@elem.ru

Anatoliy I. Popov – Head of Laboratory at the Research Center Uralelectromed JSC, Verkhnyaya Pyshma, Russia. E-mail: An.Popov@elem.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): This article examines the possibility of creating an environmentally friendly, technologically efficient and cost-effective high-performance reprocessing technology for lead-containing middlings and wastes. Using the example of the pyrometallurgical technology of reduction smelting applied to lead cake (~35% Pb) and silicate slag (~22 % Pb), the authors describe the current problems related to the optimization of traditional methods used in complex processing of polymetallic middlings from waste, with non-ferrous metals being turned into marketable products through computer simulation. **Objectives:** This study aims to look at how the phase composition and the element distribution depend on the primary charge composition, as well as to analyse the possibility of using a thermodynamic study for identifying the optimal composition of the charge used for reduction smelting of lead cake at the site of Electro zinc OJSC (Vladikavkaz) and of silicate slag. **Methods Applied:** With the help of Outotec's HSC Chemistry software package, balance calculations were performed for multicomponent equilibrium compositions in a heterogeneous gas–liquid–solid system during the reduction smelting of lead cake and silicate slag. **Originality:** The original features of this research include simultaneous smelting of lead cake and silicate slag and the use of metal shavings and iron ore, together with coke, as reducing agents, which enable the disposal of industrial waste. **Findings:** In the process of reduction smelting, it is primarily zinc that reacts to transform into gas, whereas lead, copper and antimony are concentrated within the metal phase. With the optimal composition of the charge, %: 67 – lead cake; 9 –

silicate slag; 2 – iron turnings; 3 – limestone; 12 – coke; lead, copper (>99%), most of the antimony (>88 %) and arsenic (>78%) almost completely transform into the metal phase; zinc, together with oxidized iron (~54%), is distributed between the gas phase (~67%) and the speiss-slag phase (~31%). **Practical Relevance:** Initial data were obtained for optimized reduction smelting of polymetallic wastes and middlings. This will enable to expand the range of lead-containing materials that can be used in end-to-end pyrometallurgical processing to produce marketable products from non-ferrous metals.

Keywords: Melting, cake, mixture, sublimates, slag, matte, metal, lead.

References

1. Li Y., Su Z., Qiao Q., 2015, Integrated assessment of process pollution prevention and end-of-pipe control in secondary lead smelting, *Resources. Conservation and Recycling*, In Press, Corrected Proof., Available online 23. 12. 2015.
2. Bai L., Qiao Q., Li Y., 2015, Substance flow analysis of production process: a case study of a lead smelting process, *Journal of Cleaner Production*, 104, 502–512.
3. De la Campa A. M. S., Sánchez-Rodas D., Castanedo Y.G., 2015, Geochemical anomalies of toxic elements and arsenic speciation in airborne particles from Cu mining and smelting activities: Influence on air quality, *Journal of Hazardous Materials*, 291, 18–27.
4. Trpčevská J., Hofková B., Briancin J., 2015, The pyrometallurgical recovery of zinc from the coarse-grained fraction of zinc ash by centrifugal force, *International Journal of Mineral Processing*, 143, 25–33.

5. Ebin B., Isik M. I., 2016, Chapter 5 – Pyrometallurgical Processes for the Recovery of Metals from WEEE, WEEE Recycling, 107–137.
6. Binnemans K., Jones P. T., Blanpain B., 2015, Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: a critical review, *Journal of Cleaner Production*, 99, 17–38.
7. Kazantsev G.F., Barbin N.M., Moiseev G.K., Marshuk L.A., Ivanovskiy L.E., Vatolin N.A. *Sposob polucheniya svinca iz otkhodov* [Method for recovering lead from waste]. Patent RF, no. 2094509, 1994.
8. Grechko A.V., Kalnin E.I., Besser A.D., Tarasov A.V. *Sposob pirometallurgicheskoy pererabotki svinecsoderzhashih materialov i pech' dlja ego osushchestvlenija* [Pyrometallurgical processing of lead-containing materials and the furnace necessary for the process]. Patent RF, no. 2114927, 1997.
9. *Nauchno-tehnicheskij otchet o vypolnenii 5 etapa Gosudarstvennogo kontrakta № 16.740.11.0522 ot 16.05.2011* [Technical report on the implementation of the 5th stage of Public Contract No. 16.740.11.0522 dated 16 May 2011]. UrFU named after the first President of Russia B.N. Eltsin; Project leader: S.V. Karelov. GRNTI 53.37.13. Ekaterinburg, 2013, 125 p.
10. Torres C. M., Taboada M. E., Graber T. A., 2015, The effect of seawater based media on copper dissolution from low-grade copper ore, *Miner. Eng.*, 71, 139–145.
11. Puts G. J., Crouse P. L., 2014, The influence of inorganic materials on pyrolysis of polytetrafluoroethylene. Pt. 1: The sulfates and fluorides of Al, Zn, Cu, Ni, Co, Fe, and Mn, *J. Fluorine Chem.*, 168, 260–267.
12. Sundman B., Lu X.-G., Ohtani H., 2015, The implementation of an algorithm to calculate thermodynamic equilibria for multi-component systems with non-ideal phases in a free software, *Comput. Mater. Sci.*, 101, 127–137.
13. Littlejohn P., J. Vaughan J., 2012, Selectivity of commercial and novel mixed functionality cation exchange resins in mildly acidic sulfate and mixed sulfate-chloride solution, *Hydrometallurgy*, 121-124, 90–99.

Received 20/02/17
Accepted 30/05/17

Образец для цитирования

Мальцев Г.И., Тимофеев К.Л., Попов А.И. Термодинамическое прогнозирование восстановительной плавки свинцового кека // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 24–30. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-24-30>

For citation

Maltsev G.I., Timofeev K.L., Popov A.I. Thermodynamic prediction of reduction smelting of lead cake. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 24–30. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-24-30>
