

# Металлургия техногенных и вторичных ресурсов

УДК 669.053 + 669.2/.8 + 669.21

DOI: 10.14529/met160319

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ ПЫЛЕЙ МЕДЕПЛАВИЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

*К.Л. Тимофеев, Г.И. Мальцев, А.Т. Мусин*

*АО «Уралэлектромедь», г. Верхняя Пышма*

Предмет исследования составляют вторичные пыли, образующиеся при плавке металлургических пылей, шлаков и клинкера, содержащих медь, цинк, драгоценные металлы и др., на шахтной (Ш) и руднотермической (РТ) печах, не имеющие реализации и технологии дальнейшей переработки, следующего состава, % (Ш/РТ): 1,5/2,1 Cu; 35,0/14,2 Pb; 19,1/11,8 Zn; 10,7/31,6 As; 1,4/0,9 Sb; 3,7/3,5 S; 4,4/2,0 Fe; 1,8/6,3 Cd; 0,4/1,9 Sn; 0,3/0,6 Te; 0,5/0,4 Bi; 1,0/0,6 [г/т] Au; 71,8/29,6 [г/т] Ag.

Цель работы заключается в обосновании пирометаллургической технологии переработки вторичных пылей, обеспечивающей извлечение свинца и цинка в коллективный концентрат (продукт Pb–Zn), а также перевод мышьяка в состав отдельного продукта, пригодного для захоронения.

При выполнении балансовых расчетов равновесных составов в гетерофазной системе «газ – жидкость – твердое» использовали функцию «Equilibrium Composition» программы «Outotec's Chemical Reaction and Equilibrium Software HSC Chemistry». Исходили из предположения, что продуктами восстановительной плавки вторичных пылей являются: газовая фаза, в которую переходят летучие соединения серы, цинка, мышьяка; шлак, получаемый с флюсами (CaO/SiO<sub>2</sub>; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); штейно-штейповая фаза – железо-мышьяковистые соединения; металлическая фаза – свинцовый сплав.

В режиме обжига (600–650 °С) вторичной пыли нежелательный переход легко возгоняемых соединений мышьяка в газовую фазу усиливается по мере возрастания исходного содержания элемента в сырье и уменьшения количества извести в шихте.

При плавлении (1300–1350 °С) шихты, содержащей вторичную пыль (~ 32 % As) и удельные количества компонентов к массе пыли, %: 25,0 известь; 80,0 Fe-стружка; 9,0 каменный уголь, получена штейно-штейповая фаза состава, %: 26,3–29,6 As; 59,3–61,4 Fe; 0,7–1,7 Pb; 0,1–0,2 Zn, которую можно рассматривать как As-продукт, пригодный для захоронения.

Применение термодинамического прогнозирования (функция «Equilibrium Composition») с варьированием удельного количества следующих компонентов шихты к массе вторичной пыли, %: 1,0–14,5 Na<sub>2</sub>O; 0,7–9,7 SiO<sub>2</sub>; 1,3–14,8 CaO; 4,1–31,1 FeO; 1–10 C; 20–47 Fe, показало, что при уменьшении в системе количества восстановителей (Fe, FeO, C) и возрастании количества флюсовых компонентов (CaO, Na<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub>) в исследованных интервалах возможно увеличение содержания мышьяка в шлаковой фазе с ~ 20 до ~ 65 %.

Область применения результатов – прогнозирование равновесных составов образующихся фаз при пирометаллургической переработке промежуточных продуктов и отходов предприятий цветной металлургии.

*Ключевые слова:* плавка; шлак, шихта; возгоны; шлак; штейн; мышьяк.

### Введение

При плавке металлургических пылей, шлаков и клинкера, содержащих медь, цинк, драгоценные металлы и др., на шахтной (Ш) и руднотермической (РТ) печах образуются вторичные пыли (продукт Pb–Zn), не имеющие реализации и технологии дальнейшей переработки, следующего состава, % (Ш/РТ): 1,5/2,1 Cu; 35,0/14,2 Pb; 19,1/11,8 Zn; 10,7/31,6 As; 1,4/0,9 Sb; 3,7/3,5 S; 4,4/2,0 Fe; 1,8/6,3 Cd; 0,4/1,9 Sn; 0,3/0,6 Te; 0,5/0,4 Bi; 1,0/0,6 [г/т] Au; 71,8/29,6 [г/т] Ag [1, 2]. Целью работы является обоснование пирометаллургической технологии переработки вторичных пылей, обеспечивающей

извлечение свинца и цинка, а также вывод мышьяка путём перевода его в отдельный продукт, пригодный для захоронения.

### Методика исследований

Навески вторичной пыли с компонентами шихты (известковое молоко, железная стружка, уголь, шлак металлургический), помещенные в графитовые тигли, нагревали в муфельной печи в режимах обжига (600–650 °С) и плавления (1300–1350 °С) в течение 1,5 ч. Полученный огарок после обжига и продукты плавки (черновой свинец, штейно-штейповая фаза, шлак, пыль) взвешивали

и анализировали на содержание элементов, после чего расчетным путем определяли их распределение по фазам и продуктам.

При плавлении вторичных пылей с получением штейно-шпейзовой фазы (Fe–As) шихту готовили следующим образом: пыль дозировали с известью, заливали водой и перемешивали мешалкой 1 ч, затем выдерживали 5–6 ч в муфеле при 85–90 °С. После сушки к полученному материалу добавляли расчетное количество железной стружки, угля и шихту плавил. Продукты плавки взвешивали и анализировали на содержание As, Fe, Pb, Zn.

При выполнении балансовых расчетов равновесных составов в гетерофазной системе «газ – жидкость – твердое» использовали функцию «Equilibrium Composition» программы «Outotec's Chemical Reaction and Equilibrium Software HSC Chemistry» [3–6]. Исходили из предположения, что продуктами восстановительной плавки вторичных пылей являются:

- газовая фаза, в которую переходят летучие соединения серы, цинка, мышьяка;
- шлак, получаемый с флюсами ( $\text{CaO-SiO}_2$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ );
- штейно-шпейзовая фаза – железо-мышьяковистые соединения;
- металлическая фаза – свинцовый сплав.

Коэффициенты активности всех химических соединений в термодинамических расчетах принимались равными единице.

На основе предварительных балансовых расчетов определен рациональный состав (%) исходной шихты (100 кг) (табл. 1).

В ходе проведенных работ исследовали влияние удельного количества (%) восстановителей (углерод, железо металлическое) и флюсов (оксидов кальция, натрия, кремния, железа) по отношению к вторичной пыли, а также температуры плавки (1200–1350 °С) на распределение основных элементов шихты по продуктам пирометаллургического процесса.

### Результаты и их обсуждение

Показано, что при обжиге (600–650 °С) нежелательный переход легко возгоняемых соединений мышьяка в газовую фазу усиливается по мере возрастания исходного содержания элемента во вторичной пыли и уменьшения удельного расхода извести к массе вторичной пыли (рис. 1).

При плавлении (1300–1350 °С) шихты, содержащей вторичную пыль (12,1–29,5 % As) и удельные количества компонентов к массе пыли, %: 5–25 CaO; 40–83 Fe; 3–11 C, были получены Pb-сплав, штейно-шпейзовая (As–Fe) фаза, шлак и возгоны, конденсированные в пыли.

Установлено:

1. Количество свинца в металлической фазе возрастает с 8,0–9,3 до 33,0–44,5 % по мере сни-

жения содержания мышьяка во вторичной пыли, соответственно, с 29,5 до 12,1 %.

2. Цинк на 97–99 % переходит в возгоны из всех исследованных образцов вторичной пыли.

3. При высоком содержании мышьяка (12–29 % As) во вторичных пылях ПТ-печи с ростом удельного количества извести (5–25 %) к массе вторичной пыли снижается извлечение мышьяка в газовую и шлаковую фазы и возрастает его переход в штейно-шпейзовую фазу с 40–45 до 85,1–93,0 % (рис. 2).

4. Из шихты, содержащей вторичную пыль (~ 32 % As) и удельные количества компонентов к массе пыли, %: 25 известь; 80 Fe-стружка; 9 каменный уголь, получена штейно-шпейзовая фаза состава, %: 26,3–29,6 As; 59,3–61,4 Fe; 0,7–1,7 Pb; 0,1–0,2 Zn, которую можно рассматривать как As-продукт, пригодный для захоронения.

При замене в составе шихты Fe-стружки на шлак металлургического завода состава, %: 39–46  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ; 25–32  $\text{Fe}_{\text{мет}}$ ; 10–11 CaO; 11–14  $\text{SiO}_2$ , в удельном количестве 270–350 % от массы пыли ПТ или хвосты флотации конвертерных шлаков состава, %: 44–45  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ; 0,5–0,7 Cu; 4,5–5,0 Zn; 1,1–1,3  $\text{S}_{\text{общ}}$ ; 1,1–1,3 MgO; 3,0–3,3 CaO; 18–20  $\text{SiO}_2$ , в удельном количестве 200 %, массы пыли ПТ по результатам плавки было установлено:

1. Отсутствует металлическая фаза. Свинец сосредоточен преимущественно в штейно-шпейзовой фазе.

2. Не менее 90 % цинка переходит в возгоны.

3. Количественный выход штейно-шпейзовой фазы с содержанием мышьяка 25,2–28,7 % составил не менее 70 %, а извлечение в нее мышьяка 42,2–66,6 %.

4. Низкое содержание пыли ПТ в шихте (~ 20 %) и отсутствие черного свинца в металлической фазе, не позволяет признать целесообразным данный вариант получения As-продукта для захоронения.

Целью термодинамического прогнозирования с использованием функции «Equilibrium Composition» является поиск возможных альтернативных вариантов состава исходной шихты для плавления вторичных металлургических пылей с получением As-продукта, пригодного для захоронения.

Варьировали расчетное содержание следующих компонентов шихты в удельных количествах к массе вторичной пыли, %: 1,0–14,5  $\text{Na}_2\text{O}$ ; 0,7–9,7  $\text{SiO}_2$ ; 1,3–14,8 CaO; 4,1–31,1 FeO; 1–10 C; 20–47 Fe. При этом переход мышьяка в состав штейно-шпейзовой (ШШ) фазы изменялся в соответствии с расчетом согласно данным табл. 2 в интервале, %: 58,4–51,7 CaO; 44,5–42,9  $\text{Na}_2\text{O}$ ; 44,1–43,4  $\text{SiO}_2$ ; 44,1–55,9 FeO; 44,6–70,4 C; 28,7–76,0 Fe.

Таким образом, в системе при отсутствии металлической фазы по мере возрастания количества флюсовых компонентов (CaO,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ ) переход мышьяка в штейно-шпейзовую фазу несколько

Таблица 1

Содержание соединений и элементов в исходной шихте, кг (%)

	% мас.	Pb	Cu	Zn	Fe	S	As	Sb	Si	Ca	Al	O	C	Na	Прочие
PbS	0,720	0,624				0,097									
PbO	21,382	19,849										1,533			
Cu <sub>2</sub> S	0,410		0,328			0,083									
CuSO <sub>4</sub>	2,467		0,982			0,495						0,989			
Cu <sub>2</sub> O	1,026		0,911									0,115			
ZnS	0,036			0,024		0,012									
ZnO	15,766			12,67								3,099			
FeS	0,114				0,073	0,042									
FeSO <sub>4</sub>	2,074				0,763	0,438						0,874			
FeO	6,266				4,093							1,173			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,603				0,422							0,181			
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,021				0,015							0,006			
As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	6,945					2,715	4,230								
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,510						4,174					1,337			
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	9,603						6,260					3,342			
Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	0,614					0,174		0,440							
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,826							0,690				0,136			
SiO <sub>2</sub>	2,119								0,523			0,596			
CaO	1,254									0,181		0,072			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,263										0,139	0,124			
Na <sub>2</sub> O	1,000											0,410		0,590	
C	19,875												19,875		
Fe	1,000				1,000										
Прочие	0,107														0,107
<b>Итого:</b>	100,00	20,47	2,22	12,69	7,14	4,05	14,66	1,13	0,99	0,90	0,14	15,03	19,88	0,59	0,11

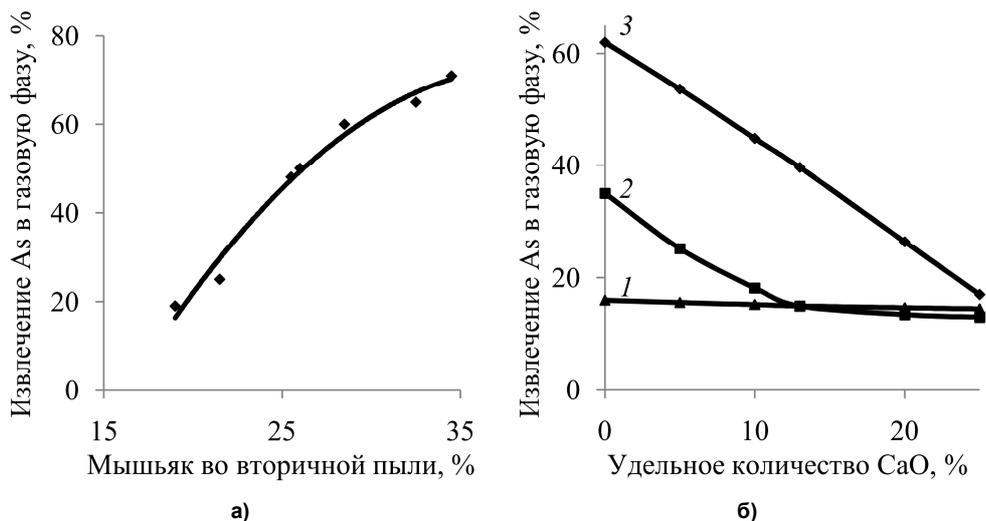


Рис.1. Зависимость извлечения мышьяка в газовую фазу при обжиге от его содержания во вторичной пыли (а), %: 12,1 (1); 23,2 (2); 29,5 (3) и удельного количества извести к массе вторичной пыли (б)

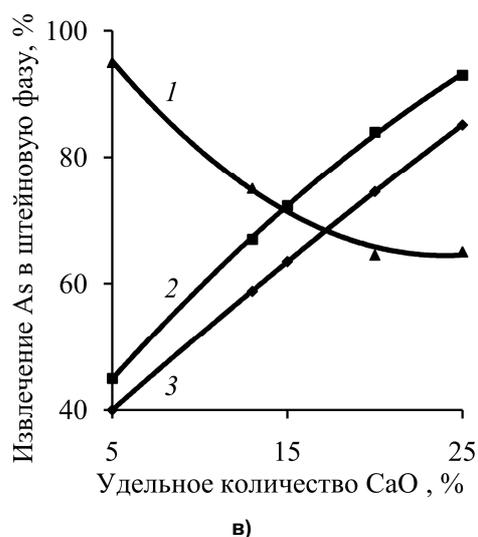
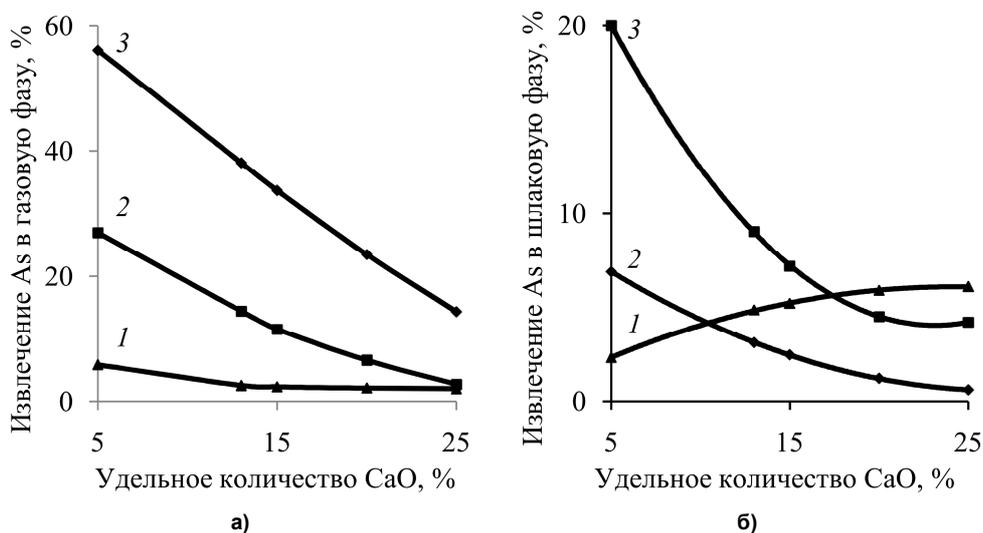


Рис. 2. Зависимость извлечения мышьяка при плавнении в фазы: газовую (а); шлаковую (б); штейно-штейзовую (в) от удельного количества извести к массе вторичной пыли при исходном количестве мышьяка во вторичной пыли, %: 29,5 (1); 23,2 (2); 12,1 (3)

Таблица 2  
Расчётные значения степени перевода мышьяка из состава вторичных пылей в ШШ фазу (%)  
от удельного количества компонентов шихты (%)

Na <sub>2</sub> O/As	1,0/44,5	4,0/44,1	7,0/43,6	10,0/43,2	14,5/42,9
SiO <sub>2</sub> /As	0,7/44,1	2,7/43,9	4,7/43,7	6,7/43,5	9,7/43,4
CaO/As	1,3/58,4	4,3/56,7	7,3/54,2	10,3/53,1	14,8/51,7
FeO/As	4,1/44,1	12,1/47,3	20,1/50,6	28,1/53,8	31,1/55,9
C/As	1,0/44,6	3,0/51,0	5,0/58,9	7,0/63,4	10,0/70,4
Fe/As	20,0/28,7	26,0/40,1	33,0/51,8	40,0/63,4	47,0/76,0

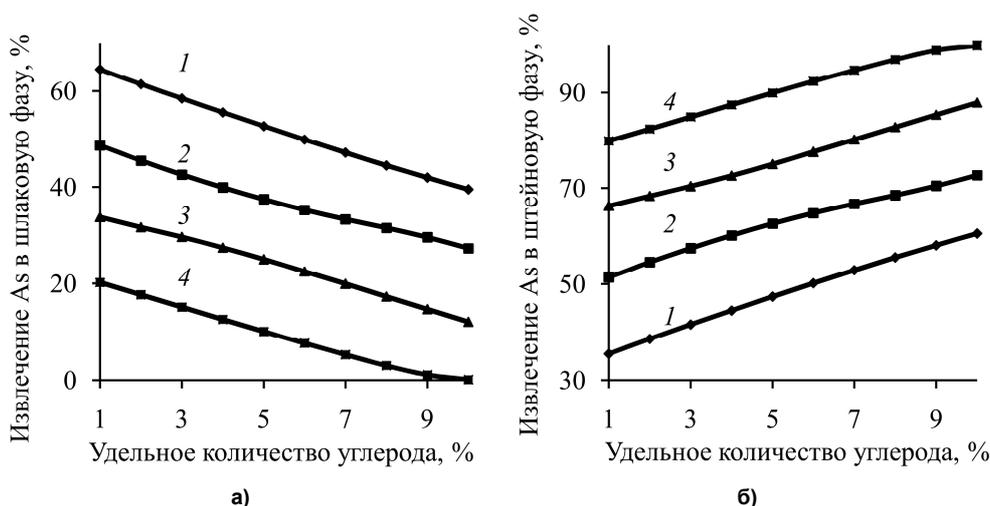


Рис. 3. Зависимость извлечения As при плавлении 1350 °С в шлаковую (а) и штейно-штейзовую (б) фазы от удельного количества углерода и железа, %: 20 (1); 30 (2); 40 (3); 50 (4) к массе вторичной пыли

Таблица 3  
Экспериментальные ( $Y_{\text{экс}}$ ) и расчётные ( $Y_{\text{рас}}$ ) значения степени перевода мышьяка  
из состава вторичных пылей в штейно-штейзовую фазу

Удельное количество, %		Y, %		$(Y_{\text{экс}} - Y_{\text{рас}})/Y_{\text{экс}}, \%$
Fe-стружка	Уголь	Опытные	Расчётные	
25	4,5	70,7	55,6	21,3
40	7,0	84,8	80,4	5,2
50	9,0	98,3	98,9	0,6

снижается при увеличении его содержания в шлаковой фазе. Увеличение в системе количества восстановителей (FeO, Fe, C) заметно смещает распределение мышьяка в штейно-штейзовую фазу (рис. 3).

Для проверки адекватности результатов выполненных расчетов перевода мышьяка в штейно-штейзовую фазу проведены плавки шихты состава, мас. %: 37,5 пыль (Ш); 12,9 пыль (PT); 8,0 известь; 15,0 сода; 25–50 Fe-стружка; 4,5–9,0 уголь, при температуре 1300–1350 °С (табл. 3).

Выявленные расхождения между экспериментальными и рассчитанными значениями степени перевода мышьяка из состава вторичных пылей не превышают ~ 5 % от величины опытных значений ( $Y_{\text{экс}}$ ) при высоком удельном количестве восстановителей к массе вторичной пыли, %:  $\geq 40$  Fe;  $\geq 7$  C, нивелирующих присутствие в составе шихты пыли (Ш) с низким содержанием мышьяка и под-

тверждают адекватность представленной в аналитической форме регрессионной зависимости степени перевода мышьяка в штейно-штейзовую фазу ( $Y_{1,2}$ , %) в зависимости от удельного количества металлического железа ( $X_1$ , %) и углерода ( $X_2$ , %) к массе вторичной пыли:

$$Y_{1,2} = 17,721 + 1,15X_1 + 0,094X_1X_2 - 0,003X_1^2 - 0,053X_2^2; R^2 = 0,999.$$

#### Закключение

1. В режиме обжига (600–650 °С) вторичной пыли нежелательный переход легко возгораемых соединений мышьяка в газовую фазу усиливается по мере возрастания исходного содержания элемента в сырье и уменьшения количества извести в шихте.

2. При плавлении (1300–1350 °С) шихты, содержащей вторичную пыль (~ 32 % As) и удельные количества компонентов к массе пыли, %:

25,0 известь; 80,0 Fe-стружка; 9,0 каменный уголь, получена штейно-штейсовая фаза состава, %: 26,3–29,6 As; 59,3–61,4 Fe; 0,7–1,7 Pb; 0,1–0,2 Zn, которую можно рассматривать как As-продукт, пригодный для захоронения.

3. Применение термодинамического прогнозирования (функция «Equilibrium Composition») с варьированием удельного количества следующих компонентов шихты к массе вторичной пыли, %: 1,0–14,5 Na<sub>2</sub>O; 0,7–9,7 SiO<sub>2</sub>; 1,3–14,8 CaO; 4,1–31,1 FeO; 1–10 C; 20–47 Fe, показало, что при уменьшении в системе количества восстановителей (Fe, FeO, C) и возрастании флюсовых компонентов (CaO, Na<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub>) в исследованных интервалах возможно увеличение содержания мышьяка в шлаковой фазе с ~ 20 до ~ 65 %.

### Литература

1. Пат. 2180692 Российская Федерация. Способ переработки медьсодержащих шлаков / С.Г. Майзель. – Заявл. 07.09.1995; опубл. 20.03.2002.

2. Плавка в жидкой ванне / под ред. А.В. Ваниюкова. – М.: Metallurgy. – 1988. – 208 с.

3. Littlejohn, P. Selectivity of Commercial and Novel Mixed Functionality Cation Exchange Resins in Mildly Acidic Sulfate and Mixed Sulfate-Chloride Solution / P. Littlejohn, J. Vaughan // *Hydrometallurgy*, 2012. – Vol. 121–124. – P. 90–99. DOI: 10.1016/j.hydromet.2012.04.001

4. Puts, G.J. The Influence of Inorganic Materials on Pyrolysis of Polytetrafluoroethylene. Part I: The Sulfates and Fluorides of Al, Zn, Cu, Ni, Co, Fe and Mn / G.J. Puts, P.L. Crouse // *Journal of Fluorine Chemistry*. – 2014. – Vol. 168. – P. 260–267. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2014.05.004

5. Sundman, B. The Implementation of an Algorithm to Calculate Thermodynamic Equilibria for Multi-Component Systems with Non-Ideal Phases in a Free Software / B. Sundman, X.-G. Lu, H. Ohtani // *Computational Materials Science*. – 2015. – Vol. 101. – P. 127–137. DOI: 10.1016/j.commatsci.2015.01.029

6. The Effect of Seawater Based Media on Copper Dissolution from Low-Grade Copper Ore / C.M. Torres, M.E. Taboada, T.A. Graber et al. // *Minerals Engineering*. – 2015. – Vol. 71. – P. 139–145. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.11.008

**Тимофеев Константин Леонидович**, канд. техн. наук, главный гидрометаллург, АО «Уралэлектромедь», г. Верхняя Пышма; K.Timofeev@elem.ru.

**Мальцев Геннадий Иванович**, д-р техн. наук, с.н.с., главный специалист Исследовательского центра, АО «Уралэлектромедь», г. Верхняя Пышма; mgi@elem.ru.

**Мусин Арсен Тахирович**, заместитель начальника цеха по производству филиала ПСЦМ, АО «Уралэлектромедь», г. Верхняя Пышма; A.Musin@elem.ru.

Поступила в редакцию 6 мая 2016 г.

DOI: 10.14529/met160319

## THERMODYNAMIC ANALYSIS OF PYROMETALLURGICAL PROCESSING OF SECONDARY COPPER SMELTER DUSTS

**K.L. Timofeev**, K.Timofeev@elem.ru,

**G.I. Mal'tsev**, mgi@elem.ru,

**A.T. Musin**, A.Musin@elem.ru

JSC "Uralelektromed", Verkhnyaya Pyshma, Russian Federation

The object of research is secondary dust formed during melting of metallurgical dusts, slags and clinker, containing copper, zinc, precious metals, etc., on a shaft (S) and thermal (T) furnaces, not having realization and technologies of further processing, of the following composition, % (S/T): 1,5/2,1 Cu; 35,0/14,2 Pb; 19,1/11,8 Zn; 10,7/31,6 As; 1,4/0,9 Sb; 3,7/3,5 S; 4,4/2,0 Fe; 1,8/6,3 CDs; 0,4/1,9 Sn; 0,3/0,6 Te; 0,5/0,4 Bi; 1,0/0,6 [g/t] of Au; 71,8/29,6 [g/t] of Ag.

The purpose of the work consists in justification of pyrometallurgical technology of processing secondary dusts, providing extraction of lead and zinc in a collective concentrate (Pb–Zn product), and also transfer of arsenic to separate product suitable for disposal.

When performing balance calculations of equilibrium compositions in heterogeneous system “gas – liquid – solid” the Equilibrium Composition function of the Outotec's Chemical Reaction and Equilibrium Software HSC Chemistry program was used. Made an assumption that products of the reduction smelting of secondary dusts are: a gas phase into which pass volatile compounds of sulfur, zinc, arsenic; the slag received with fluxes (CaO·SiO<sub>2</sub>; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); a matte-speiss phase – iron-arsenical compounds; a metal phase – a lead alloy.

In the roasting mode (600–650 °C) of secondary dust undesirable transition of easily sublimated compounds of arsenic to a gas phase amplifies in process of increase of initial content of the element in raw materials and decrease of lime amount in furnace charge.

During melting (1300–1350 °C) of the furnace charge containing secondary dust (~ 32 % of As) and specific amounts of components to the mass of dust, %: 25.0 lime; 80.0 Fe-turnings; 9.0 mineral coal, the matte-speiss phase of composition, %: 26.3–29.6 As; 59.3–61.4 Fe; 0.7–1.7 Pb; 0.1–0.2 Zn has been received, which can be considered as the As-product suitable for disposal.

Application of thermodynamic prediction (Equilibrium Composition function) with a variation of specific amounts of the following components of furnace charge to the mass of secondary dust, %: 1.0–14.5 Na<sub>2</sub>O; 0.7–9.7 SiO<sub>2</sub>; 1.3–14.8 CaO; 4.1–31.1 FeO; 1–10 C; 20–47 Fe, showed that decreasing the amount of reducers (Fe, FeO, C) and increasing the amount of flux components (CaO, Na<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub>) in the system in the studied intervals, it is possible to increase the content of arsenic in the slag phase from ~ 20 to ~ 65 %.

Range of application of results is the prediction of equilibrium compositions of the formed phases at pyrometallurgical processing of the intermediate products and wastage of the enterprises of nonferrous metallurgy.

*Keywords: melting; slimes; furnace charge; sublimates; slag; matte; arsenic.*

### References

1. Mayzel' S.G. *Sposob pererabotki med'soderzhashchikh shlakov* [Method for Processing Copper-Bearing Slag]. Patent RF, no. 2180692, 1995.
2. *Plavka v zhidkoy vanne* [Melting in the Liquid Bath]. Vanyukov A.V. (Ed.). Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 208 p.
3. Littlejohn P., Vaughan J. Selectivity of Commercial and Novel Mixed Functionality Cation Exchange Resins in Mildly Acidic Sulfate and Mixed Sulfate-Chloride Solution. *Hydrometallurgy*, 2012, vol. 121–124, pp. 90–99. DOI: 10.1016/j.hydromet.2012.04.001
4. Puts G.J., Crouse P.L. The Influence of Inorganic Materials on Pyrolysis of Polytetrafluoroethylene. Part 1: The Sulfates and Fluorides of Al, Zn, Cu, Ni, Co, Fe and Mn. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2014, vol. 168, pp. 260–267. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2014.05.004
5. Sundman B., Lu X.-G., Ohtani H. The Implementation of an Algorithm to Calculate Thermodynamic Equilibria for Multi-Component Systems with Non-Ideal Phases in a Free Software. *Computational Materials Science*, 2015, vol. 101, pp. 127–137. DOI: 10.1016/j.commatsci.2015.01.029
6. Torres C.M., Taboada M.E., Graber T.A., Herreros O.O., Ghorbani Y., Watling H.R. The Effect of Seawater Based Media on Copper Dissolution from Low-Grade Copper Ore. *Minerals Engineering*, 2015, vol. 71, pp. 139–145. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.11.008

*Received 6 May 2016*

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Тимофеев, К.Л. Термодинамический анализ пирометаллургической переработки вторичных пылей медеплавильных предприятий / К.Л. Тимофеев, Г.И. Мальцев, А.Т. Мусин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 127–133. DOI: 10.14529/met160319

### FOR CITATION

Timofeev K.L., Mal'tsev G.I., Musin A.T. Thermodynamic Analysis of Pyrometallurgical Processing of Secondary Copper Smelter Dusts. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 127–133. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160319