



Оригинальная статья

УДК 669.162.275.8

DOI 10.17073/0368-0797-2022-3-170-178



ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЦИНКА ИЗ ШЛАМОВ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

М. В. Клеоновский¹, О. Ю. Шешуков^{1,2}, М. А. Михеенков²,
Е. Ю. Лозовая¹

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

² Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

Аннотация. Предприятия черной металлургии непрерывно наполняют отвалы сталеплавильными и доменными шламами с повышенным содержанием цинка. Шламы, занимающие значительные территории предприятий, не вовлечены в производство и наносят вред окружающей среде. Поскольку цинк приводит к образованию настывей в доменной печи, производители не могут вовлечь данные шламы в агломерационный передел. Кроме того, работа со шламами может привести к таким проблемам, как уменьшение содержания железа в агломерате, снижение производительности агломашин, увеличение колебания химического состава агломерата. При этом цинкосодежащие шламы могут стать ценным вторичным продуктом. Цинк остается дефицитным металлом, что побуждает разрабатывать технологии переработки цинкосодежащих материалов. Извлечение цинка из шламов затруднено, поскольку он находится не в оксидной, а в сульфатной или сульфидной форме. В работе дана оценка возможности извлечения цинка из шламов с использованием программного пакета FactSage. Представлены результаты термодинамических расчетов возможности извлечения цинка из четырех типов шламов двух Российских комбинатов черной металлургии – АО «ЕВРАЗ НТМК» и ПАО «МЕЧЕЛ». Представлены данные химического и фазового анализов этих шламов, а также смоделированные графики зависимостей извлечения цинка из них. Графики строились на основе получаемых данных из пакета FactSage. Варьировалась добавка восстановителя в шлам, а также температура происходящего процесса. Кроме того, была оценена возможность отказа от углерода в роли восстановителя. Для экономии восстановителя подбирались оптимальная смесь шламов предприятия, при которой можно минимизировать расход кокса.

Ключевые слова: цинк, шламы, металлизация, извлечение цинка, FactSage, сульфиды, фазовый состав, термодинамический анализ, вторичные ресурсы, переработка отходов

Для цитирования: Клеоновский М.В., Шешуков О.Ю., Михеенков М.А., Лозовая Е.Ю. Термодинамическое моделирование восстановления цинка из шламов черной металлургии // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 3. С. 170–178.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-3-170-178>

Original article

THERMODYNAMIC MODELING OF ZINC RECOVERY FROM FERROUS METALLURGY SLUDGE

M. V. Kleonovskii¹, O. Yu. Sheshukov^{1,2}, M. A. Mikheenkov²,
E. Yu. Lozovaya¹

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

² Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science (101 Amundsen Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

Abstract. Ferrous metallurgy enterprises continuously fill dumps with steelmaking and blast furnace sludge with high zinc content. Sludge occupying significant territories of enterprises is not involved in production and harms the environment. Since zinc leads to the formation of deposits in the blast furnace, manufacturers cannot involve this sludge in sinter processing. In addition, working with sludge can lead to problems such as decrease in iron content in the sinter, decrease in productivity of sintering machines, and increase in fluctuations in the sinter chemical composition. At the same time, zinc-containing sludge can become a valuable secondary product. Zinc remains a scarce metal, which encourages the development of technologies for processing zinc-containing materials. Extraction of zinc from sludge is difficult because it is not in oxide, but in sulfate or sulfide forms. In this paper, the possibilities of zinc extraction from sludge using the FactSage software package are evaluated. The authors present results of thermodynamic calculations of the possibility of zinc extraction from four types of sludge from two Russian ferrous metallurgical plants – EVRAZ NTMK and MECHEL. The data of chemical and phase analyses of this sludge are considered, as well as simulated graphs of zinc extraction dependencies from

them. The graphs were built on basis of the received data from FactSage package. Addition of the reducing agent to the sludge varied, as well as temperature of the process. In addition, the possibility of abandoning carbon as a reducing agent was evaluated. To save the reducing agent, an optimal mixture of the company’s sludge was selected, in which coke consumption can be minimized.

Keywords: zinc, sludge, metallization, zinc extraction, FactSage, sulfides, phase composition, thermodynamic analysis, secondary resources, waste processing

For citation: Kleonovskii M.V., Sheshukov O.Yu., Mikheenkov M.A., Lozovaya E.Yu. Thermodynamic modeling of zinc recovery from ferrous metallurgy sludge. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 3, pp. 170–178. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-3-170-178>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на территории ряда предприятий черной металлургии накоплено большое количество доменных и сталеплавильных шламов с повышенным содержанием цинка. Шламы, занимающие значительные территории предприятий, не вовлечены в производство и наносят вред окружающей среде. Производители не могут вовлечь данные шламы в доменный передел, поскольку они содержат большое количество цинка, который приводит к образованию настывлей в колошниковой зоне доменной печи [1 – 2]. Соединения цинка встречаются в пыли дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и в колошниковой пыли доменных печей [3 – 5]. В данных видах пыли цинк находится, в основном, в оксидной форме (ZnO) [6 – 8] и для его извлечения используется вельц-процесс, реализуемый во вращающихся печах [9 – 11]. В условиях вельц-процесса в сырьевую смесь добавляется углеродсодержащий материал, который обеспечивает восстановление оксида цинка и его возгон при температуре около 1100 °С. В работах [12 – 13] показано, что цинк в пыли металлургических агрегатов может находиться не в чистой оксидной форме, а в виде твердых растворов сложных железосиликатных соединений. В медных шлаках цинк может находиться в виде прочной шпинели франклинита (ZnO·Fe₂O₃) [14]. В некоторых техногенных образованиях, таких как шлаки от конвертации медных руд, и шламах от производства синтетических волокон цинк находится в сульфидной форме (ZnS) [15 – 16]. Извлечение цинка из таких техногенных образований при помощи вельц-процесса затруднено. Для успешного извлечения цинка из сульфидной формы необходим анализ физико-химических особенностей извлечения цинка из обеих форм и разработка технологии извлечения цинка из сульфидной формы, а также преобразования продуктов обжига в ценные товарные продукты.

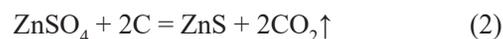
Так в работах [17 – 18] сульфидный цинк преобразуют в оксидный при окислительном обжиге. Также оценена возможность карботермического восстановления сульфида цинка известняком с образованием сульфида кальция CaS [19].

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

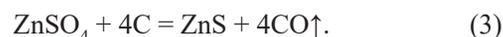
Вельц-процесс основан на восстановлении оксида цинка до металлического цинка с помощью углеродсодержащего материала [20 – 21] по реакции



В шламах цинк может находиться как в сульфатной, так и в сульфидной форме. В присутствии углерода при нагреве сульфат цинка ZnSO₄ преобразуется в сульфид [22 – 25] по реакции



или



Оценка термодинамической возможности протекания реакций осуществлялась путем расчета свободной энергии Гиббса. Термодинамический анализ реакций (2) и (3) приведен в табл. 1.

Данные, представленные в табл. 1, свидетельствуют, что реакция (2) может протекать при комнатной температуре, а реакция (3) протекает при температуре выше 200 °С. В любом случае, при нагреве в восстановительных условиях выше температуры 200 °С в шламах будет присутствовать только сульфидная форма цинка. Восстановление цинка из сульфидной формы возможно по реакции

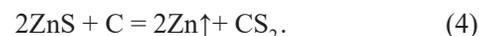


Таблица 1

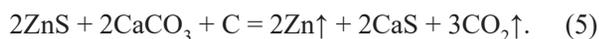
Результаты термодинамического анализа реакций преобразования сульфатной формы цинка в сульфидную

Table 1. Results of thermodynamic analysis of reactions of zinc sulfate form conversion to sulfide

Реакция	Свободная энергия Гиббса ΔG, кДж/моль, при температуре, °С				
	0	50	100	150	200
ZnSO ₄ + 2C = ZnS + 2CO ₂ ↑	-109,4	-127,6	-145,7	-163,7	-181,7
ZnSO ₄ + 4C = ZnS + 4CO↑	139,4	103,6	67,7	31,8	-3,9

Оценка термодинамической возможности извлечения цинка по реакции (4) осуществлялась путем расчета свободной энергии Гиббса. Результаты расчетов приведены в табл. 2. Они свидетельствуют, что энергия Гиббса реакции (4) становится отрицательной только при температуре выше 2000 °С. Для реализации на практике подобной технологии потребуются использование специальных высокотемпературных агрегатов (например, дуговых печей), что экономически не целесообразно. Осуществление обменных реакций с преобразованием сульфидной формы цинка в оксидную возможно с металлами, находящимися в ряду напряжений металлов левее цинка (металлы, имеющие большее сродство к электрону: Li, K, Ba, Sr, Ca, Na, Mg, Al, Mn).

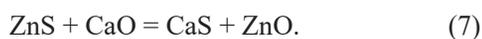
Наиболее привлекательными для преобразования сульфидной формы цинка в оксидную с экономической точки зрения являются соли Ca и Mg, встречающиеся в природе в виде известняка, магнезита и доломита. При использовании известняка для разложения сульфида цинка и возгона цинка протекает реакция



Данная реакция при нагревании проходит в несколько стадий. Разложение известняка начинается при нагреве до температуры 720 °С



и завершается при температуре 920 °С. Выше этой температуры протекает обменная реакция



При появлении оксида цинка с ним начинает взаимодействовать углерод и завершает разложение оксида цинка по реакции (1).

Оценка термодинамической возможности извлечения цинка по реакции (5) осуществлялась путем расчета энергии Гиббса. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Результаты расчетов свидетельствуют, что термодинамически протекание реакции (5) возможно выше температуры 1100 °С, при которой энергия Гиббса становится отрицательной. Также результаты расчетов показывают, что термодинамическое предпочтение данной реакции при температуре 1100 °С в 3 раза выше, чем реакции (1).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились с использованием пакета FactSage – программы, заслужившей мировое признание в моделировании термодинамических металлургических процессов. Так, в более ранних публикациях коллег, с его помощью уже изучалось поведение соединений цинка [26] и меди [27 – 28]. В работах [29 – 30] моделировалось превращение фаз при тепловой обработке, а также были получены данные о фазовых равновесиях [31 – 33]. Авторами настоящей работы проведены исследования возможности переработки цинкосодержащих шламов черной металлургии. В частности, для расчетов взяты данные химического (табл. 4) и фазового (табл. 5) анализов шламов предприятий АО «ЕВРАЗ НТМК» и ПАО «МЕЧЕЛ».

С помощью исследования совокупных данных химического и фазового анализов, полученных в лаборатории, проведена оценка полного фазового состава

Таблица 2

Результаты термодинамического анализа возможности извлечения цинка по реакции (4)

Table 2. Results of thermodynamic analysis of the possibility of zinc extraction by reaction (4)

Реакция	Энергия Гиббса ΔG , кДж/моль, при температуре, °С				
	0	500	1000	1500	2000
$2\text{ZnS} + \text{C} = 2\text{Zn}\uparrow + \text{CS}_2$	660,5	483,0	306,5	133,1	-32,1

Таблица 3

Результаты термодинамического анализа возможности извлечения цинка по реакции (5)

Table 3. Results of thermodynamic analysis of the possibility of zinc extraction by reaction (5)

Реакция	Энергия Гиббса ΔG , кДж/моль, при температуре, °С				
	0	800	900	1000	1100
$2\text{ZnS} + 2\text{CaCO}_3 + \text{C} = 2\text{Zn}\uparrow + 2\text{CaS} + 3\text{CO}_2\uparrow$	742	152	82	12	-56

Таблица 4

Химический состав шламов, % (по массе)

Table 4. Chemical composition of sludge (mass. %)

Шлам	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	V ₂ O ₅	Fe _{общ}	Zn	S	C
Доменный	6,9	6,2	0,30	2,20	0,37	0,700	55,2	5,10	1,10	9,8
Мартеновский	0,9	0,7	0,45	1,10	1,40	0,100	73,9	5,50	0,40	0
Конвертерный	14,9	1,6	0,10	2,24	0,70	0,054	52,2	0,35	0,18	1,2
ЦВС	6,5	11,4	4,30	1,90	0,40	0,050	36,0	2,55	0,74	17,7

Таблица 5

Фазовый состав шламов, % (по массе)

Table 5. Phase composition of sludge (mass. %)

Фаза	Химическая формула	Шлам			
		доменный	мартеновский	конвертерный	ЦВС
Гематит	Fe ₂ O ₃	53,6	33,2	42,84	21,56
Магнетит	Fe ₃ O ₄	17,5	17,9	29,03	36,08
Кальция карбонат	CaCO ₃	8,8	–	13,50	42,36
Углерод	CaCO ₃	9,6	–	–	–
Сульфат цинка	Zn ₃ O(SO ₄) ₂	10,5	11,0	–	–
Магнезиоферрит	Mg _x FeO _y	–	37,9	–	–
Кварц	SiO ₂	–	–	14,63	–
Итого:		100,0	100,0	100,00	100,00

Таблица 6

Полный фазовый состав шламов

Table 6. Complete phase composition of sludge

Шлам	CaO	CaCO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	V ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	Zn ₃ (SO ₄) ₂	ZnO	C
Мартеновский	1,03	–	0,80	0,52	1,26	1,60	0,11	55,00	29,66	2,78	7,23	0
Доменный	–	12,38	6,23	0,30	2,21	0,37	0,70	41,80	13,65	6,70	5,82	9,84
Конвертерный	20,29	–	2,18	0,14	3,05	0,95	0,07	42,37	28,71	–	0,59	1,63
ЦВС	7,98	–	14,00	5,28	2,33	0,49	0,06	16,54	27,68	–	3,90	21,74

шламов, используемых в моделировании процесса (табл. 6). Химический анализ шламов получен на рентгенофлуоресцентном спектрометре «S4 Explorer» (Bruker AXS GmbH, Германия), количественный рентгенофазовый анализ – на дифрактометре STADI-P (STOE, Германия). Съемка производилась в Cu Kα-излучении (40 кВ, 30 мА), графитовый монохроматор, в диапазоне углов рассеяния 2θ = 10 – 70 град., с шагом 0,02 град. и выдержкой 2 с. Анализ результатов выполнен с использованием базы данных PDF-2 (Release 2008 RDB 2.0804).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные расчеты показали, что в случаях с конвертерным шламом и шламом ЦВС при нагреве до 1300 °С цинк полностью восстанавливается и удаляется в газовую фазу. В шламе ЦВС высокое содержание углерода, поэтому добавок восстановителя не требуется. В свою очередь, в конвертерном шламе высокое содержание CaO, который частично снижает расход восстановителя при извлечении цинка. Содержание цинка в данном шламе низкое, что также приво-

дит к полному восстановлению. Таким образом, шламы «ПАО МЕЧЕЛ» достаточно нагреть до 1300 °С для полного удаления цинка.

Процесс можно сделать более экономически выгодным, снизив рабочую температуру до 1100 °С. При данной температуре цинк из шлама ЦВС по-прежнему полностью восстанавливается, однако для достижения такого же результата с конвертерным шламом необходима добавка углерода. На рис. 1 представлена зависимость восстановления цинка из шлама ККЦ от добавки углерода. Так, для полного восстановления цинка, необходимо ввести 0,15 кг углерода сверх массы 100 кг шлама. Добавки углерода можно избежать, смешав конвертерный шлак со шламом ЦВС, в котором углерод содержится в избытке. На рис. 2 представлена зависимость количества восстановленного цинка от соотношения шламов ККЦ и ЦВС в смеси. Для успешного восстановления цинка достаточно ввести в шлак ККЦ более 0,8 % (по массе) шлама ЦВС.

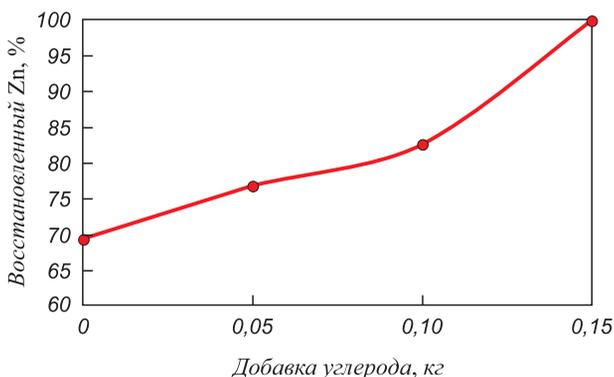


Рис. 1. Зависимость количества восстановленного цинка из конвертерного шлама при 1100 °С от добавки углерода

Fig. 1. Dependence of the amount of reduced zinc from converter sludge at 1100 °C on carbon addition

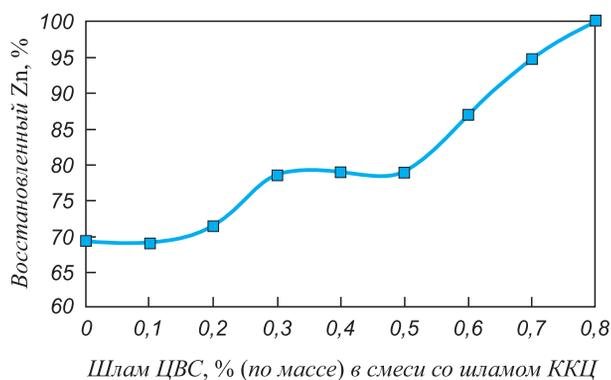


Рис. 2. Зависимость количества восстановленного цинка от соотношения шламов ККЦ и ЦВС в смеси при 1100 °С

Fig. 2. Dependence of the amount of reduced zinc on the ratio of converter and water supply shops sludge in the mixture at 1100 °C

Картина несколько иная в случае со шламами «ЕВРАЗ НТМК». Доменный шлак содержит высокое количество углерода и цинк полностью восстанавливается при нагреве до 1300 °С без каких-либо добавок. Однако в мартеновском шламе углерод отсутствует. Соответственно требуется добавка восстановителя, что приводит к удорожанию процесса. На рис. 3 представлена зависимость количества восстановленного цинка от добавки углерода. Для экономии углерода и снижения затрат будет целесообразно смешивать доменный и мартеновский шламы АО «ЕВРАЗ НТМК». На рис. 4 представлена зависимость количества восстановленного цинка от соотношения доменного и мартеновского шлама в смеси. Таким образом, для достижения полного удаления цинка из смеси шламов необходимо добавить не менее 55 % доменного шлама к мартеновскому. В таких пропорциях можно успешно перерабатывать шламы АО «ЕВРАЗ НТМК». Однако, при необходимости соотношение можно сместить, добавив 2 кг углерода на 100 кг смеси шла-

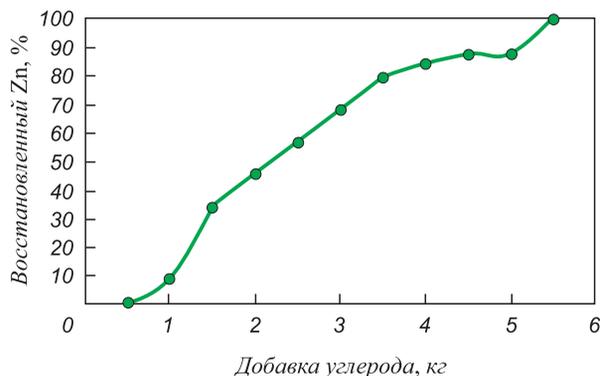


Рис. 3. Зависимость количества восстановленного цинка из мартеновского шлама при 1300 °С от добавки углерода

Fig. 3. Dependence of the amount of reduced zinc from open-hearth furnace sludge at 1300 °C on carbon addition

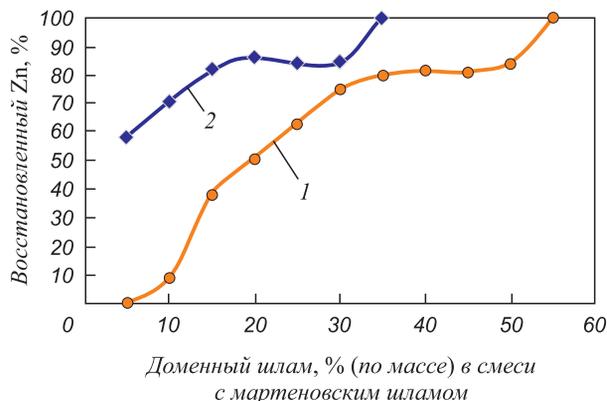


Рис. 4. Зависимость количества восстановленного цинка от соотношения доменного и мартеновского шлама в смеси: 1 – без С; 2 – с добавкой 2 кг С

Fig. 4. Dependence of the amount of reduced zinc on the ratio of blast and open-hearth furnaces sludge in the mixture: 1 – without carbon; 2 – with addition of 2 kg of carbon

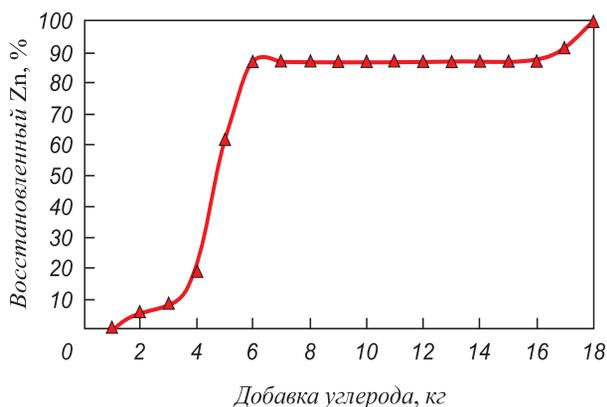


Рис. 5. Зависимость количества восстановленного цинка из мартеновского шлама при 1100 °С от добавки углерода

Fig. 5. Dependence of the amount of reduced zinc from open-hearth furnace sludge at 1100 °C on carbon addition

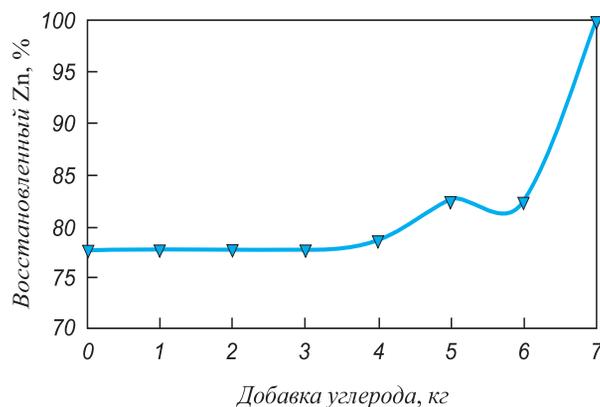


Рис. 6. Зависимость количества восстановленного цинка из доменного шлама при 1100 °С от добавки углерода

Fig. 6. Dependence of the amount of reduced zinc from blast furnace sludge at 1100 °C on carbon addition

мов. В этом случае для полного восстановления цинка долю доменного шлама можно сократить до 35 %.

Кроме того, для шламов АО «ЕВРАЗ НТМК» также построены графики зависимостей восстановления цинка от добавки углерода при 1100 °С (рис. 5, 6). Для полного удаления цинка из мартеновского шлама необходимо ввести 18 кг углерода сверх массы 100 кг шлама, в случае с доменным эта величина составляет 7 кг. В обоих случаях из-за высокой стоимости кокса процесс не является целесообразным. Стоит отметить, что на этих двух графиках ярко выражены зоны, в которых степень восстановления цинка не повышается с увеличением добавки углерода. Такие плато можно заметить на всех графиках зависимости степени восстановления цинка от количества введенного углерода. Происходит это из-за очередности восстановления соединений, находящихся в шлаках. Для того, чтобы извлечь цинк из прочного соединения сульфида цинка (ZnS), необходимо полностью восстановить вюстит (FeO) до металлического железа.

Выводы

С помощью пакета FactSage смоделированы условия восстановления цинка из шламов двух предприятий – ПАО «МЕЧЕЛ» и АО «ЕВРАЗ НТМК». Согласно полученным данным, процессы успешно протекают в диапазоне температур 1100 – 1300 °С. В зависимости от химического и фазового составов шлама необходима соответствующая температура и добавка восстановителя. Проведенные расчеты показали возможность эффективной переработки шламов с высоким содержанием цинка. Однако построенные зависимости могут значительно отличаться от реальных процессов. Поэтому их следует рассматривать как предварительные расчеты перед началом проведения экспериментов. Опираясь на полученные данные, планируется провести серию экспериментов по восстановлению цинка и спроектировать максимально эффективную технологию переработки цинкосодержащих шламов металлургических предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Козлов П.А., Панышин А.М., Дюбанов В.Г., Селиванов Е.Н. Разработка и промышленная реализация комплексной и ресурсоэнергосберегающей технологии и аппаратуры для утилизации техногенных отходов черной и цветной металлургии с извлечением цинка, свинца, олова, меди и железа в товарные продукты // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: Труды научно-практической конференции с международным участием. Екатеринбург, 2015. С. 29–32.
2. Лотош В.Е. Переработка отходов природопользования. Екатеринбург: Полиграфист, 2007. 503 с.
3. McClelland J.M., Metius G.E. Recycling ferrous & nonferrous waste streams with FASTMET // JOM. 2003. Vol. 55. No. 8. P. 30–34. <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0101-3>
4. Ma N. Recycling of basic oxygen furnace steelmaking dust by in process separation of zinc from the dust // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 112. P. 4497–4504. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.009>
1. Kozlov P.A., Pan'shin A.M., Dyubanov V.G., Selivanov E.N. Development and industrial implementation of complex and resource-saving technology and equipment for the disposal of technogenic waste of ferrous and non-ferrous metallurgy with the extraction of zinc, lead, tin, copper and iron into commercial products. In: *Prospects for the Development of Metallurgy and Mechanical Engineering Using Completed Fundamental Research and R&D: Proceedings of the Sci. and Pract. Conf. with Inter. Participation. Yekaterinburg, 2015*, pp. 29–32. (In Russ.).
2. Lotosh V.E. *Recycling of Environmental Management Waste*. Yekaterinburg: Poligrafist, 2007, 503 p. (In Russ.).
3. McClelland J.M., Metius G.E. Recycling ferrous & nonferrous waste streams with FASTMET. *JOM*. 2003, vol. 58, no. 8, pp. 30–34. <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0101-3>
4. Ma N. Recycling of basic oxygen furnace steelmaking dust by in process separation of zinc from the dust. *Journal of Cleaner Production*. 2016, vol. 112, pp. 4497–4504. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.009>

5. Аксельрод Л.М., Мальцев В.А., Меламуд С.Г., Баранов А.П. Экологические и иные проблемы переработки цинксодержащих пылей дуговых сталеплавильных печей // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2012. № 7. С. 91–96.
6. Баранов А.П., Федосов И.Б., Тлеухов Н.В., Woolett A., Wynter В.Р. Практика переработки цинксодержащей пыли электрометаллургического производства стали по новейшей технологии английской компании Zincox Resources Pls в республике Корея // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2014. № 11. С. 71–76.
7. Грудинский П.И., Дюбанов В.Г., Леонтьев Л.И., Козлов П.А. Исследование процесса разложения феррита цинка в ходе прокатки пыли электроплавки стали в присутствии извести // *Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований. Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов: Труды конгресса с международным участием и конференции молодых ученых*. Екатеринбург: Институт металлургии УрО РАН, 2017. С. 182–184.
8. Алпатова А.А., Симонян Л.М., Исакова Н.Ш. Изучение процесса пылеобразования при дуговом нагреве оцинкованной стали // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 5. С. 293–299. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-5-293-299>
9. Симонян Л.М., Алпатова А.А. Прогнозирование поведения цинка и свинца при выплавке электростали // *Металлург*. 2016. № 7. С. 36–37.
10. Стовпченко А.П., Камкина Л.В., Пройдак Ю.С., Деревянченко И.В., Кучеренко О.Л., Бондаренко М.Ю. Теоретические и экспериментальные исследования состава и восстановимости пыли дуговых сталеплавильных печей // *Электрометаллургия*. 2009. № 8. С. 29–36.
11. Рожков А.И., Логвин В.В. Анализ химического состава пыли дуговых сталеплавильных печей // *Вестник КИГИТ*. 2012. № 10 (28). С. 45–47.
12. Селиванов Е.Н., Тюшняков С.Н., Панкратов А.А. Формы нахождения цинка в пыли доменных печей // *Металлург*. 2018. № 3. С. 35–39.
13. Тюшняков С.Н., Селиванов Е.Н., Панкратов А.А. Формы нахождения цинка в пыли газоочистки электросталеплавильных печей // *Металлург*. 2018. № 6. С. 8–13.
14. Mast R.E., Kent G.H. Fuming furnaces recover zinc and lead from copper slag // *Journal of Metals*. 1955. No. 8. P. 877–884.
15. Nadirov R.K., Syzdykova L.I., Zhussupova A.K., Muratbek T. Recovery of value metals from copper smelter slag by ammonium chloride treatment // *International Journal of Mineral Processing*. 2013. Vol. 124. P. 145–149. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.07.009>
16. Chai L.-Y., Ke Y., Zhou B.-S., Xue K., Chen J. Separation and recovery of ZnS from sulfidized neutralization sludge via the hydration conversion of CaSO₄ into bulk CaSO₄·2H₂O crystals // *Separation and Purification Technology*. 2015. Vol. 154. P. 76–81. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.09.029>
17. Halli P., Hamuyuni J., Leikola M., Lundstrom M. Developing a sustainable solution for recycling electric arc furnace dust via organic acid leaching // *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 124. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.011>
18. Мунц В.А., Ивакина С.А., Чойнзонов Д.Б. Изучение кинетики окисления сульфидного цинкового концентрата в печи кипящего слоя // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2017. Том 17. № 3. С. 34–42.
19. Толокнов Д.А., Селиванов Е.Н., Гуляева Р.И. Термодинамические закономерности восстановления сульфида меди и цинка в среде монооксида углерода // *Компьютерное моделирование физико-химических свойств стекол и расплавов: Труды XI Российского семинара*. Курган: Курганский государственный университет, 2012. С. 48–50.
20. Михеенков М.А., Шешуков О.Ю., Некрасов И.В., Егизарьян Д.К. Особенности переработки клинкера вельц-процесса
5. Axel'rod L.M., Mal'tsev V.A., Melamud S.G., Baranov A.P. Ecological and other problems of processing zinc-containing dusts of arc steelmaking furnaces. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2012, no. 7, pp. 91–96. (In Russ.).
6. Baranov A.P., Fedosov I.B., Tlekhugov N.V., Woolett A., Wynter B.P. Practice of processing zinc-containing dust of electrometallurgical steel production using the latest technology of the English company Zincox Resources Pls in the Republic of Korea. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2014, no. 11, pp. 71–76. (In Russ.).
7. Grudinskiy P.I., Dyubanov V.G., Leont'ev L.I., Kozlov P.A. Investigation of zinc ferrite decomposition during calcination of dust of electric steel melting in presence of lime. In: *Fundamental Research and Applied Development of Processing and Utilization of Technogenic Formations. Ural Market of Scrap, Industrial and Municipal Waste: Proceedings of the Congress with Int. Participation and Conf. of Young Scientists*. Yekaterinburg: Institute of Metallurgy of the UB RAS, 2017, pp. 182–184. (In Russ.).
8. Alpatova A.A., Simonyan L.M., Isakova N.Sh. The study of dust formation during arc melting of zinc-coated steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 5, pp. 293–299. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-5-293-299>
9. Simonyan L.M., Alpatova A.A. Prediction of zinc and lead behavior during steel electric smelting. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 7–8, pp. 676–678. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0350-3>
10. Stovpchenko A.P., Kamkina L.V., Proidak Yu.S., Derevyanchenko I.V., Kucherenko O.L., Bondarenko M.Yu. Theoretical and experimental studies of composition and recoverability of dust of arc steelmaking furnaces. *Elektrometallurgiya*. 2009, no. 8, pp. 29–36. (In Russ.).
11. Rozhkov A.I., Logvin V.V. Analysis of chemical composition of dust of arc steelmaking furnaces. *Vestnik KIGIT*. 2012, no. 10 (28), pp. 45–47. (In Russ.).
12. Selivanov E.N., Tyushnyakov S.N., Pankratov A.A. Forms of zinc occurrence in blast-furnace dust. *Metallurgist*. 2018, vol. 62, no. 3–4, pp. 225–230. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0649-3>
13. Tyushnyakov S.N., Selivanov E.N., Pankratov A.A. Forms of zinc found in electric steel smelting furnace gas cleaning dust. *Metallurgist*. 2018, vol. 62, no. 5–6, pp. 485–492. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0685-z>
14. Mast R.E., Kent G.H. Fuming furnaces recover zinc and lead from copper slag. *Journal of Metals*. 1955, no. 8, pp. 877–884.
15. Nadirov R.K., Syzdykova L.I., Zhussupova A.K., Muratbek T. Recovery of value metals from copper smelter slag by ammonium chloride treatment. *International Journal of Mineral Processing*. 2013, vol. 124, pp. 145–149. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.07.009>
16. Chai L.-Y., Ke Y., Zhou B.-S., Xue K., Chen J. Separation and recovery of ZnS from sulfidized neutralization sludge via the hydration conversion of CaSO₄ into bulk CaSO₄·2H₂O crystals. *Separation and Purification Technology*. 2015, vol. 154, pp. 76–81. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.09.029>
17. Halli P., Hamuyuni J., Leikola M., Lundstrom M. Developing a sustainable solution for recycling electric arc furnace dust via organic acid leaching. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 124, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.011>
18. Munts V.A., Ivakina S.A., Choinzonov D.B. Kinetics of oxidation of sulfide zinc concentrate in a fluidized bed furnace. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetika*. 2017, vol. 17, no. 3, pp. 34–42. (In Russ.).
19. Toloknov D.A., Selivanov E.N., Gulyaeva R.I. Thermodynamic regularities of copper and zinc sulfide recovery in carbon monoxide environment. In: *Computer Modeling of Physico-Chemical Properties of Glasses and Melts: Proceedings of the 11th Russ. Seminar*. Kurgan: Kurgan State University, 2012, pp. 48–50. (In Russ.).
20. Mikheenkov M.A., Sheshukov O.Yu., Nekrasov I.V., Egizaryan D.K. Features of processing clinker welz-process sludge con-

- шлама, содержащего сульфид цинка // Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья. Материалы Международной научно-практической конференции, приуроченной к 90-летию со дня основания института “Уралмеханобр”, 2019. С. 394–396.
21. Sheshukov O.Yu., Mikheenkov M.A., Lobanov D.A. Zinc technogenic formations: physico-chemical features of its extraction // *Solid State Phenomena*. 2020. Vol. 299. P. 1139–1151. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.1139>
 22. Sheshukov O.Yu., Mikheenkov M.A., Egiazaryan D.K. Features of zinc extraction from sulfide forms // *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 989. P. 228–234. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.228>
 23. Шешуков О.Ю., Михеенков М.А., Некрасов И.В., Егиазарьян Д.К. Оценка возможности извлечения сульфатных форм цинка из шламов АО «ЕВРАЗ НТМК» и получения металлофлюса после извлечения цинка из шламов // Международная научно-техническая конференция «Промышленное производство и металлургия». Нижний Тагил, 18–19 июня, 2020. С. 327–329.
 24. Михеенков М.А., Шешуков О.Ю., Некрасов И.В., Егиазарьян Д.К. Особенности извлечения сульфидных форм цинка из техногенных образований // Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья. Материалы Международной научно-практической конференции, приуроченной к 90-летию со дня основания института «Уралмеханобр», 2019. С. 387–389.
 25. Михеенков М.А., Шешуков О.Ю., Некрасов И.В., Егиазарьян Д.К. Оценка возможности комплексной переработки техногенных образований, содержащих сульфид цинка // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований «Техноген-2019», 2019. С. 368–372.
 26. Han J., Liu W., Zhang T., Xue K., Li W., Jiao F., Qin W. Mechanism study on the sulfidation of zno with sulfur and iron oxide at high temperature // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. P. 425–436. <https://doi.org/10.1038/srep42536>
 27. Banerjee A., Mohanty A., Das Biswas R., Chakravarty S., Mishra P.R., Sahu R., Chakravarty K. Distribution of mineral species in different coal seams of talcher coalfield and its transformation behavior at varying temperatures // *International Journal of Coal Science and Technology*. 2016. Vol. 3. No. 2. P. 97–103. <https://doi.org/10.1007/s40789-016-0127-0>
 28. Zhang B.J., Niu L.P., Zhang T.A., Li Z.Q., Zhang D.L., Zheng C. Alternative reduction of copper matte in reduction process of copper slag // *ISIJ International*. 2017. Vol. 57. No. 5. P. 775–781. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-631>
 29. Kostov A., Živković D., Friedrich B. Thermodynamic predicting of Si–Me (Me = Ti, Al) binary systems // *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. 2007. Vol. 43. No. 1. P. 29–38. <https://doi.org/10.2298/JMMB0701029K>
 30. Qiu G., Chen L., Zhu J., Lv X., Bai C. Effect of Cr₂O₃ addition on viscosity and structure of ti-bearing blast furnace slag // *ISIJ International*. 2015. Vol. 55. No. 7. P. 1367–1376. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.55.1367>
 31. Myers P.D., Goswami D.Y. Thermal energy storage using chloride salts and their eutectics // *Applied thermal engineering*. 2016. Vol. 109. P. 889–900. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.046>
 32. Jiang M., Fan X., Liu H., Wang Z. Predicting gaseous pollution of sintered brick preparation from yellow phosphorus slag // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2019. Vol. 28. No. 3. P. 1719–1725. <https://doi.org/10.15244/pjoes/89900>
 33. Набиева А.А., Куленова Н.А., Мамыаченков С.В. Термодинамическое моделирование процесса грубого обезжелезивания с использованием программного продукта FactSage // Вестник Восточно-казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. 2019. № 2. С. 43–47.
 21. Sheshukov O.Yu., Mikheenkov M.A., Lobanov D.A. Zinc technogenic formations: physico-chemical features of its extraction. *Solid State Phenomena*. 2020, vol. 299, pp. 1139–1151. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.1139>
 22. Sheshukov O.Yu., Mikheenkov M.A., Egiazaryan D.K. Features of zinc extraction from sulfide forms. *Materials Science Forum*. 2020, vol. 989, pp. 228–234. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.228>
 23. Sheshukov O.Yu., Mikheenkov M.A., Nekrasov I.V., Egiazar'yan D.K. Assessment of the possibility of extracting zinc sulfate forms from the sludge of EVRAZ NTMK JSC and obtaining metalloflux after zinc extraction from the sludge. In: *Int. Sci. and Tech. Conf. "Industrial Production and Metallurgy" Nizhny Tagil, June 18–19, 2020*, pp. 327–329. (In Russ.).
 24. Mikheenkov M.A., Sheshukov O.Yu., Nekrasov I.V., Egiazar'yan D.K. Features of extracting zinc sulfide forms from technogenic formations. In: *Current Trends in the Theory and Practice of Mining and Processing of Mineral and Man-Made Raw Materials. Materials of the Int. Sci. and Pract. Conf. dedicated to the 90th Anniversary of the Founding of the Uralmexhanobr Institute*. 2019, pp. 387–389. (In Russ.).
 25. Mikheenkov M.A., Sheshukov O.Yu., Nekrasov I.V., Egiazar'yan D.K. Assessment of the possibility of complex processing of technogenic formations containing zinc sulfide. In: *Fundamental Research and Applied Development of Processing and Utilization of Technogenic Formations "TECHNOGEN-2019"*. 2019, pp. 368–372. (In Russ.).
 26. Han J., Liu W., Zhang T., Xue K., Li W., Jiao F., Qin W. Mechanism study on the sulfidation of zno with sulfur and iron oxide at high temperature. *Scientific Reports*. 2017, vol. 7, pp. 425–436. <https://doi.org/10.1038/srep42536>
 27. Banerjee A., Mohanty A., Das Biswas R., Chakravarty S., Mishra P.R., Sahu R., Chakravarty K. Distribution of mineral species in different coal seams of talcher coalfield and its transformation behavior at varying temperatures. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2016, vol. 3, no. 2, pp. 97–103. <https://doi.org/10.1007/s40789-016-0127-0>
 28. Zhang B.J., Niu L.P., Zhang T.A., Li Z.Q., Zhang D.L., Zheng C. Alternative reduction of copper matte in reduction process of copper slag. *ISIJ International*. 2017, vol. 57, no. 5, pp. 775–781. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-631>
 29. Kostov A., Živković D., Friedrich B. Thermodynamic predicting of Si–Me (Me = Ti, Al) binary systems. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. 2007, vol. 43, no. 1, pp. 29–38. <https://doi.org/10.2298/JMMB0701029K>
 30. Qiu G., Chen L., Zhu J., Lv X., Bai C. Effect of Cr₂O₃ addition on viscosity and structure of ti-bearing blast furnace slag. *ISIJ International*. 2015, vol. 55, no. 7, pp. 1367–1376. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.55.1367>
 31. Myers P.D., Goswami D.Y. Thermal energy storage using chloride salts and their eutectics. *Applied Thermal Engineering*. 2016, vol. 109, pp. 889–900. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.046>
 32. Jiang M., Fan X., Liu H., Wang Z. Predicting gaseous pollution of sintered brick preparation from yellow phosphorus slag. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2019, vol. 28, no. 3, pp. 1719–1725. <https://doi.org/10.15244/pjoes/89900>
 33. Nabieva A.A., Kulenova N.A., Mamyachenkov S.V. Thermodynamic modeling of rough decontamination using the FactSage software product. *Vestnik Vostochno-kazakhstanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbaeva*. 2019, no. 2, pp. 43–47. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Михаил Витальевич Клеоновский, аспирант кафедры «Металлургия железа и сплавов», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

ORCID: 0000-0002-8874-9061

E-mail: kleonovskiy@yandex.ru

Олег Юрьевич Шешуков, д.т.н., профессор, директор Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, главный научный сотрудник лаборатории порошковых, композиционных и нано-материалов, Институт металлургии УрО РАН

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Михаил Аркадьевич Михеенков, д.т.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии черных металлов, Институт металлургии УрО РАН

Елизавета Юрьевна Лозовая, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия железа и сплавов», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

E-mail: e.yu.lozovaya@urfu.ru

Mikhail V. Kleonovskii, Postgraduate of the Chair “Metallurgy of Iron and Alloys”, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

ORCID: 0000-0002-8874-9061

E-mail: kleonovskiy@yandex.ru

Oleg Yu. Sheshukov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Chief Researcher of the Laboratory of Powder, Composite and Nano-Materials, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Mikhail A. Mikheenkov, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory “Pyrometallurgy of Ferrous Metals”, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Elizaveta Yu. Lozovaya, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Metallurgy of Iron and Alloys”, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

E-mail: e.yu.lozovaya@urfu.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

М. В. Клеоновский – написание текста рукописи, получение и анализ данных, обзор публикаций по теме статьи, получение данных для анализа.

О. Ю. Шешуков – научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования.

М. А. Михеенков – получение данных для моделирования, доработка текста.

Е. Ю. Лозовая – анализ данных, содействие в написании статьи.

M. V. Kleonovskii – writing the text, obtaining and analyzing data for analysis, reviewing publications on the article topic, obtaining data.

O. Yu. Sheshukov – scientific guidance, formation of the basic concept, goals and objectives of the study.

M. A. Mikheenkov – obtaining data for modeling, revision of the text.

E. Yu. Lozovaya – data analysis, assistance in writing the text.

Поступила в редакцию 08.12.2021

После доработки 27.01.2022

Принята к публикации 24.02.2022

Received 08.12.2021

Revised 27.01.2022

Accepted 24.02.2022