

УДК 669.054.82

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА. ЧАСТЬ 1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ*

*Дильдин А.Н., к.т.н., доцент кафедры «Техника и технология
производства материалов» (andildin@mail.ru)*

*Трофимов Е.А., д.х.н., профессор кафедры «Техника и технология
производства материалов» (tea7510@gmail.com)*

*Чуманов И.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой
«Общая металлургия» (chumanoviv@susu.ac.ru)*

Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоуст
(456217, Россия, Челябинская обл., Златоуст, ул. Тургенева, 16)

Аннотация. Задача использования отвальных шлаков сталеплавильного производства как техногенного источника металлургического сырья до сих пор не имеет рационального решения и требует новых идей и подходов. В последние годы показано, что утилизация шлака может быть организована так, чтобы в результате получать не только стройматериалы, но и металл, пригодный для дальнейшей переработки и использования. Целью настоящей работы стало теоретическое изучение возможности и целесообразности восстановительной обработки сталеплавильных шлаков с целью получения металлической и оксидной фаз, которые могут быть использованы в металлургической промышленности и индустрии строительных материалов. Объектом исследования стал шлак со шлаковых отвалов Златоустовского металлургического завода. Для термодинамического моделирования процессов, протекающих в ходе восстановления вещества шлаковых отвалов, использован программный комплекс FactSage (версия 6.4). Моделировалось восстановление шлака трех разных составов, отличающихся содержанием FeO (15, 10 и 5 % (по массе)). Моделирование выполнено для интервала температур 750 – 1650 °С с шагом в 5 °С при давлении газовой фазы, равном 0,1 МПа. При моделировании принималось, что в систему в качестве восстановителя введено заведомо избыточное количество углерода. Основные результаты проведенных расчетов для удобства анализа представлены в виде зависимостей различных характеристик от температуры. Результаты моделирования показывают, в частности, что при температурах выше 1340 °С железо восстанавливается и переходит в состав расплава практически полностью. Аналогично ведут себя никель и медь. В то же время установлено, что на полное извлечение марганца в состав металлического расплава в ходе восстановления углеродом рассчитывать не приходится. Даже при максимальном извлечении марганца в металл, в составе шлака и газа остаются заметные его количества. Проведена оценка объемов газообразных веществ, образующихся в процессе восстановления при различных температурах. Результаты моделирования определенно указывают на то, что в составе газовой фазы во всем рассматриваемом интервале температур будет преобладать угарный газ. Получена также информация об изменении энтальпии системы в зависимости от температуры, которая позволяет оценить затраты тепловой энергии, необходимые для приведения системы в состояние, при котором интересующие процессы восстановления становятся возможны.

Ключевые слова: термодинамический анализ, сталеплавильные шлаки, высокотемпературное восстановление, расплав.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-5-12

Исследования, направленные на совершенствование методики переработки и утилизации металлургических шлаков (включая сталеплавильный шлак) не теряют своей актуальности [1 – 5]. Традиционно сталеплавильные и доменные шлаки находят применение в производстве строительных материалов и изделий [6 – 11]. Наряду с традиционными подходами активно развиваются новые направления переработки шлаков [12, 13]. Однако способы, используемые в настоящее время, позволяют лишь частично решить проблему утилизации шлаковых отвалов. Переработка сталеплавильных шлаков представляет собой особенно трудную задачу [14 – 16]. В последние годы показано, что утилизация шлака может быть организована так, чтобы в

результате получать не только стройматериалы, но и металл, пригодный для дальнейшей переработки и использования [17 – 20].

Переработка отвальных шлаков сталеплавильного производства с целью извлечения металлической составляющей должна включать этап высокотемпературного восстановления вещества. Эффективность этапа восстановления зависит от температурных условий и активности компонентов, определяемых составом шлака и вносимых добавок [21, 22].

Ключевыми проблемами, стоящими перед разработчиками технологий переработки шлаков, являются:

- определение оптимального температурного режима процесса жидкофазного восстановления;
- состав и последовательность процедур подготовки шлакового материала к высокотемпературному восстановлению.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57414X0090.

С целью создания наиболее эффективной схемы восстановления металлической составляющей шлаков в рамках настоящего исследования было теоретически изучено влияние параметров проведения этого процесса на его результаты.

Для термодинамического моделирования высоко-температурного восстановления вещества шлаковых отвалов использован программный комплекс FactSage [23, 24] (версия 6.4). Моделировался процесс, в котором восстановителем выступал твердый углерод. Сведения о составе шлака, использованные в процессе моделирования в качестве исходных, приведены в таблице. Массив использованных данных о составе шлаков получен отчасти из литературных источников [14, 22, 25], а отчасти стал результатом обобщения собственных анализов состава шлаковых отвалов Златоустовского металлургического завода. Некоторые данные о химическом и фазовом составе этих шлаков приведены в работах [26, 27].

Принято, что содержание FeO в шлаке составляет 15 % (по массе) (см. таблицу). Поскольку при переработке шлаков часто используется магнитная сепарация, снижающая содержание железа в шлаке, определенный интерес представляет влияние уменьшения содержания железа на результаты восстановительных процессов. Поэтому моделирование проводилось и для двух составов шлака с пониженным содержанием FeO (10 и 5 %) (см. таблицу).

Моделирование выполнено для интервала температур 750 – 1650 °С с шагом в 5 °С при давлении газовой фазы, равном 0,1 МПа. Термодинамический расчет проводился на 100 г шлака. При моделировании принималось, что в систему введено заведомо избыточное

количество углерода (графита). Согласно предварительным расчетам, на 100 г шлака избранного состава достаточно брать 10 г углерода.

Для моделирования использованы базы FSstel, FToxid, FactPS. Выбор растворов из общего их количества осуществлялся в процессе предварительного моделирования методом исключения из списка тех фаз переменного состава, которые не проявляют себя в качестве существующих. В ходе расчета допускалось нахождение в системе всех веществ из использованных баз за вычетом дублирующихся (приоритетный порядок – FSstel, FToxid, FactPS) и являющихся компонентами избранных растворов (это исключение производится в автоматическом режиме).

Основные результаты проведенных расчетов для удобства анализа представлены в виде зависимостей масс компонентов и составов изученных фаз от температуры.

Рассмотрим результаты моделирования восстановления шлака базового состава.

На рис. 1 представлены зависимости масс основных конденсированных фаз, присутствующих в системе, от температуры. Помимо представленных на рисунке, согласно результатам моделирования в системе могут присутствовать в небольшом количестве (менее 2 г) перовскит, сульфид марганца, фосфат кальция и FeV₂O₄.

Из рис. 1 следует, что металлический расплав в изучаемой системе может появиться уже при температурах 1070 – 1080 °С. Его количество с увеличением температуры постепенно растет (несколько понижаясь при температурах порядка 1200 °С, но затем вновь увеличиваясь). При этом жидкий шлак возникает в системе при

Составы шлаков, использованные в процессе моделирования, % (по массе)

Slag compositions used in the modeling process

Компонент шлака	Базовый состав	Шлак, обедненный по Fe	Шлак, сильно обедненный по Fe	Известные результаты экспериментального изучения
FeO	15,00	10,00	5,00	3,72 – 43,88
SiO ₂	25,50	27,00	28,50	17,7 – 26,6
CaO	30,00	31,76	33,53	21,9 – 47,4
MgO	11,40	12,07	12,74	6,2 – 18,5
Al ₂ O ₃	8,00	8,47	8,94	4,1 – 9,8
MnO	3,20	3,39	3,58	2,14 – 5,00
Cr ₂ O ₃	3,50	3,71	3,91	1,6 – 11,3
TiO ₂	1,00	1,06	1,12	0,23 – 2,75
V ₂ O ₅	0,16	0,17	0,18	0,12 – 0,36
NiO	0,15	0,16	0,17	0,05 – 0,34
Cu ₂ O	0,03	0,03	0,03	менее 0,05
CaSO ₃	1,06	1,12	1,18	0,07 – 0,35 (содержание серы)
Ca ₃ P ₂ O ₈	1,00	1,06	1,12	0,04 – 0,41 (содержание фосфора)
Сумма	100	100	100	

температуре порядка 1270 °С. Его количество быстро растёт и достигает максимума при температуре порядка 1460 °С. При этой же температуре в системе исчезает последняя твёрдая оксидная фаза. Очевидно, что до этой температуры образованию консолидированного металлического расплава (объединению капелек жидкого металла) будет препятствовать большое количество твёрдых оксидных фаз, несмотря на то, что значительные количества металлического расплава появляются в системе при существенно меньших температурах.

Существенный интерес представляет состав металлического расплава, образующегося в системе. Оценить изменения, происходящие в этом составе, позволяет рис. 2. Согласно представленным данным, в период возникновения металлического расплава содержание железа в нем максимально и достигает величины порядка 90 % (по массе). С увеличением температуры содержание железа падает, поскольку восстанавливаются и пополняют собой металлический расплав другие элементы (в существенных количествах это хром и марганец).

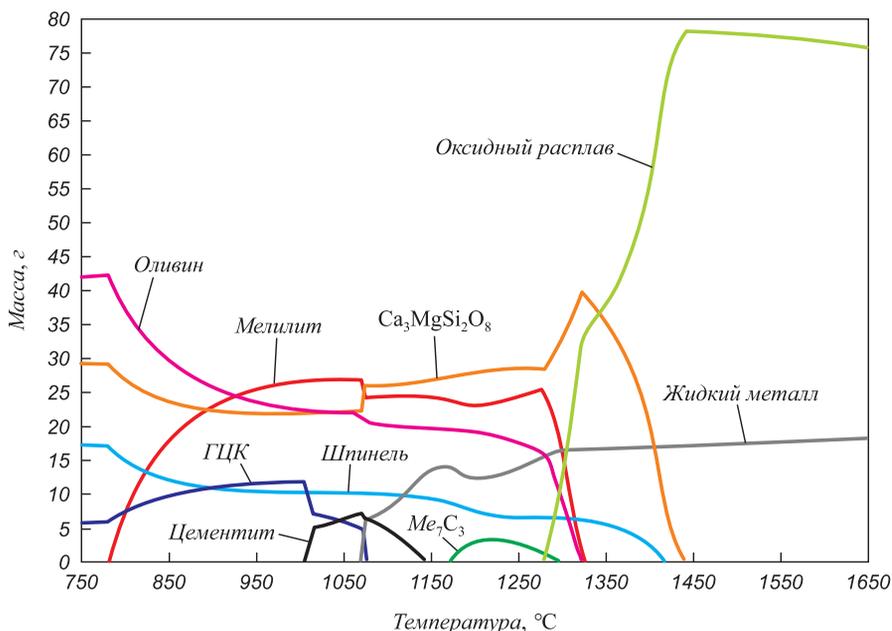


Рис. 1. Массы основных конденсированных фаз в зависимости от температуры

Fig. 1. The weights of the main condensed phases depending on temperature (in relation to 100 g of slag)

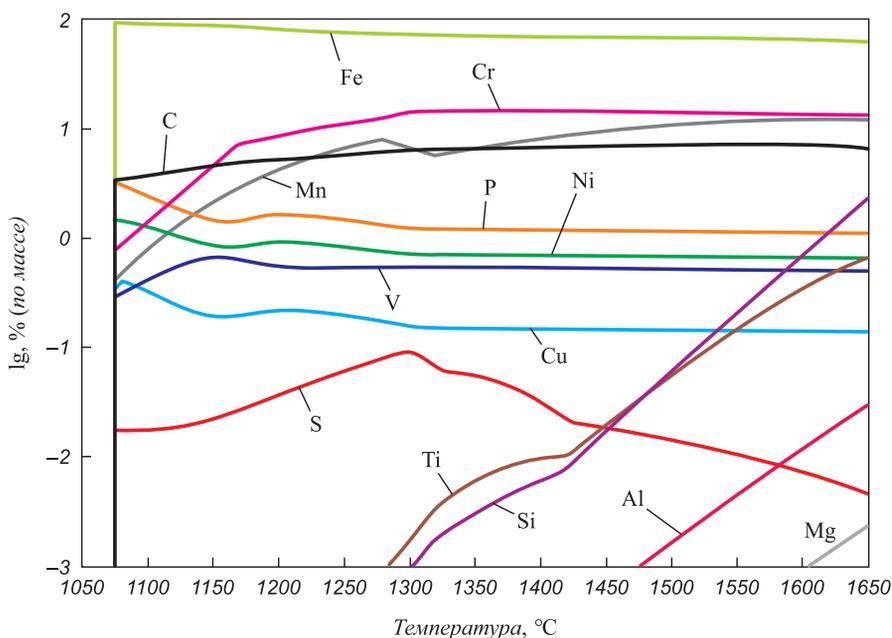


Рис. 2. Состав жидкого металла (массовые доли компонентов) в зависимости от температуры

Fig. 2. Composition of the liquid metal (mass fractions of components) depending on the temperature

нец). Также с ростом температуры несколько увеличивается доля растворенного в металле углерода.

По характеру изменения содержания минорных примесных элементов в составе металла можно выделить две группы – первую, к которой относятся никель, фосфор, медь и ванадий, содержание которых (как и содержание хрома) до температуры 1350 °С выходит на практически постоянный уровень, и вторую – к которой относятся элементы, содержание которых в составе металла первоначально чрезвычайно мало, однако с ростом температуры устойчиво возрастает. К последней группе относятся кремний, титан, алюминий и магний. Содержание кремния растет настолько, что к 1650 °С выходит на уровень порядка 2 – 3 % (по массе).

Основным компонентом, извлекаемым в процессе восстановления в металлическую фазу, является железо. Расчеты показывают, что если при низких температурах железо содержится в составе различных оксидных фаз (а также в составе аустенита), то затем, в интервале 1020 – 1340 °С, заметное количество железа присутствует в системе в виде твердых карбидных растворов, а после 1340 °С практически вся масса железа сосредоточена в составе металлического расплава. Следовательно при таких температурах железо восстанавливается и переходит в состав расплава практически полностью. Аналогично ведут себя никель и медь.

Иным образом ведет себя марганец. До температуры порядка 1270 °С марганец присутствует в системе в виде твердого раствора монооксидов, оливина, твердого сульфидного раствора, в составе металлического расплава, а также в виде карбидных растворов. После 1270 °С существенная часть марганца попадает в шлаковый расплав, откуда с ростом температуры постепенно восстанавливается и переходит в со-

став жидкого металла. При этом, вплоть до верхней границы рассматриваемого интервала температур, марганец присутствует в составе шлака в заметных количествах. Помимо этого, начиная с температур порядка 1400 °С, становится заметным и увеличивается содержание марганца в газовой фазе. Результаты моделирования показывают, что на полное извлечение марганца в состав металлического расплава в ходе восстановления углеродом рассчитывать не приходится. Даже при максимальном извлечении марганца в металл, в составе шлака и газа остается заметное количество марганца.

Из всех конденсированных оксидных фаз наибольший интерес представляет шлаковый расплав. Его состав сложен и представлен, прежде всего, оксидами, и помимо этого, как минимум, еще и сульфидными компонентами. При этом состав шлака с ростом температуры существенно меняется (за счет восстановления тяжелых металлов), но при температуре порядка 1470 °С содержание основных компонентов (CaO, SiO₂, MgO, Al₂O₃) выходит на практически постоянный уровень – выше 41 % CaO, порядка 33 % SiO₂, около 15 % MgO и 9 % Al₂O₃.

Особый интерес представляет состав газовой фазы. Моделирование предусматривало возможность существования в составе газовой фазы 95 веществ. Учитывая относительно большое количество образующегося газа (около 10 г на 110 г общей массы системы при температуре 1500 °С), его состав важен с точки зрения экологической безопасности процесса.

Результаты моделирования показаны на рис. 3. Состав газовой фазы представлен в виде десятичных логарифмов мольных долей компонентов в зависимости от температуры.

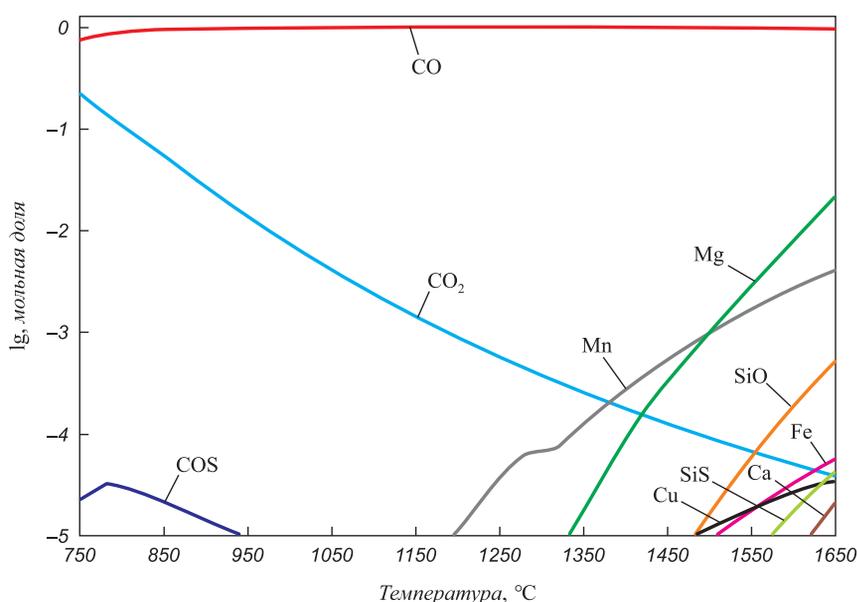


Рис. 3. Состав (десятичные логарифмы мольных долей) газовой фазы

Fig. 3. Gas phase structure (decimal logarithms of the molar fractions)

Результаты моделирования указывают на то, что в составе газовой фазы во всем рассматриваемом интервале температур будет преобладать угарный газ. При температурах, необходимых для образования консолидированного металлического расплава (1450 – 1500 °С), содержание компонентов газовой фазы (кроме CO) менее 1 %. При этом преобладающее большинство компонентов присутствует в составе газовой фазы в совершенно незначительных количествах.

Влияние уменьшения содержания железа в шлаке на основные параметры процесса показано на рис. 4, 5.

Данные, представленные на рис. 4, позволяют заключить, что обработка шлака с пониженным содержанием железа позволит получить меньшее количество металлического расплава, но при этом не скажется принципиально на его результативности.

Данные рис. 5 позволяют оценить объемы газообразных веществ, образующихся в процессе восстановления

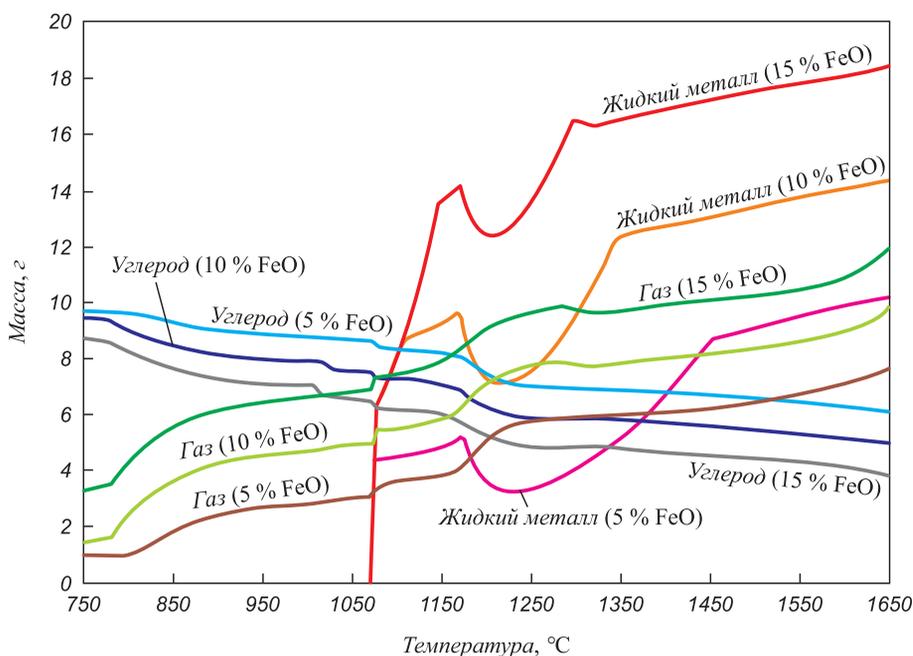


Рис. 4. Влияние состава шлака на массы некоторых фаз

Fig. 4. The effect of slag composition on the weights of some phases

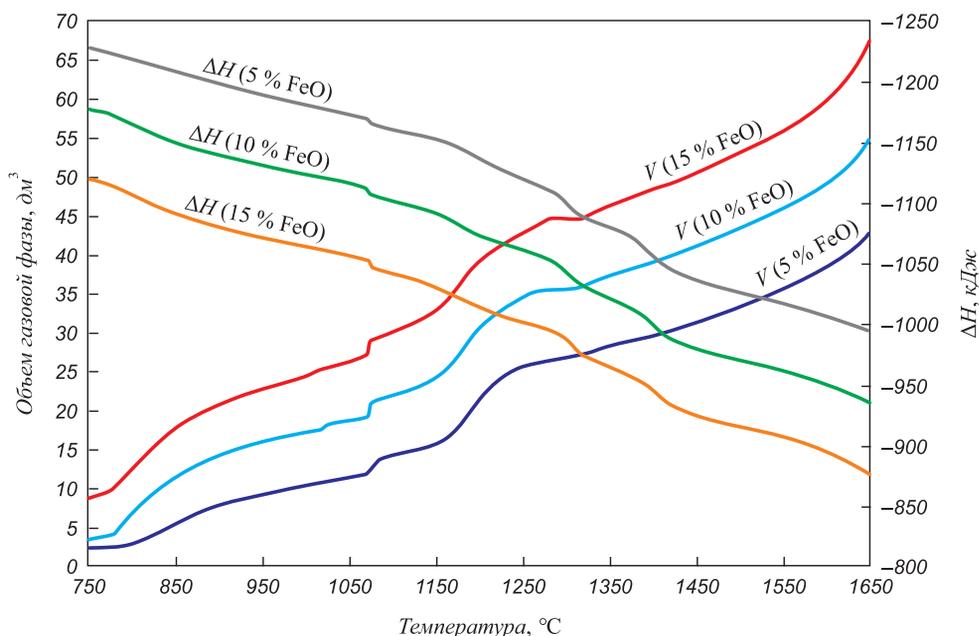


Рис. 5. Объем газовой фазы и энтальпия реакционной массы в зависимости от состава шлака и температуры

Fig. 5. The gas phase volume and reaction mass enthalpy depending on the slag composition and temperature

ния при различных температурах. Представленная также на этом рисунке информация об изменении энтальпии системы в зависимости от температуры позволяет оценить затраты тепловой энергии, необходимые для приведения системы в состояние, при котором интересующие процессы становятся возможны. Для температуры 25 °С энтальпии смесей равны: ΔH_{298}^0 (15 % FeO) = -1218 кДж; ΔH_{298}^0 (10 % FeO) = -1266,3 кДж; ΔH_{298}^0 (5 % FeO) = -1315,7 кДж.

Согласно результатам моделирования, например, для перехода от состояния 110 г исходной смеси на основе базового состава при 25 °С к состоянию системы при 1500 °С потребуется порядка 300 кДж тепловой энергии. Проведенный расчет не учитывает тепловые потери, которые неизбежно будут сопровождать высокотемпературный процесс, однако и данные, полученные для идеальных условий, могут быть полезны.

Выводы. Результаты термодинамического моделирования процесса высокотемпературного восстановления сталеплавильных шлаков открывают возможность для определения условий, выполнение которых будет способствовать созданию технологий глубокой переработки отвалов шлаков такого рода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пыриков А.Н., Вильданов С.К., Лиходиевский А.В., Мартынов Н.Н. Пути решения экологических проблем в черной металлургии // *Сталь*. 2008. № 5. С. 99 – 103.
2. Грищенко С.Г., Белокуров Д.Э. Комплекс инновационных ресурсосберегающих технологий и оборудования для рециклинга и экологически безопасной утилизации отходов металлургии и смежных отраслей // *Сталь*. 2010. № 8. С. 86.
3. Гельманова З.С., Филатов А.В. Проекты эффективного применения отходов промышленных предприятий, снижающие нагрузку на окружающую среду // *Металлург*. 2015. № 9. С. 16 – 19.
4. Косырев К.Л., Фоменко А.П., Паршин В.М. и др. Предпосылки и концепция создания энергометаллургических комплексов для переработки техногенных отходов // *Экология и промышленность России*. 2013. № 7. С. 2 – 11.
5. Смирнов Л.А., Грабеклис А.А., Демин Б.Л. Современное состояние переработки шлаков ферросплавного производства // *Сталь*. 2009. № 1. С. 86 – 88.
6. Топоров В.А., Осетров В.Д., Мурзин А.В. и др. Изготовление железосодержащей добавки для производства цемента из отходов сталеплавильного производства // *Металлург*. 2014. № 7. С. 32 – 33.
7. Черноусов П.И. Рециклинг. Технология переработки и утилизации техногенных образований и отходов в черной металлургии. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 428 с.
8. Коростелев А.Б. Рециклинг, переработка отходов и чистые технологии // *Металлург*. 2007. № 1. С. 72 – 74.
9. Федосеева Е.Н., Занозина В.Ф., Зорин А.Д., Самсонова Л.Е. Получение железоксидного пигмента из пыли металлургического производства для использования в строительстве // *Металлург*. 2015. № 5. С. 31 – 35.
10. Леонтьев Л.И., Шешуков О.Ю., Михеенков М.А. и др. Технологические особенности переработки шлаков ДСП и АКП в строительные материалы и опыт утилизации рафинировочного шлака в ОАО СТЗ // *Сталь*. 2014. № 6. С. 106 – 109.
11. Смирнов Л.А., Сорокин Ю.В., Демин Б.Л. и др. Разработка технологии комплексной переработки отвалных шлаков ферросплавного производства // *Сталь*. 2008. № 6. С. 90 – 93.
12. Леонтьев Л.И., Рытвин В.М., Гильварг С.И. и др. Комплексная переработка ферросплавных алюминотермических шлаков // *Сталь*. 2009. № 4. С. 72 – 76.
13. Зоря В.Н., Коровушкин В.В., Пермяков А.А., Волынкина Е.П. Исследование минерального состава и кристаллической структуры железосодержащих компонентов техногенных отходов металлургического комплекса // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2015. Т. 58(5). С. 359 – 366.
14. Das B., Prakash S., Reddy P.S.R., Misra V.N. An overview of utilization of slag and sludge from steel industries // *Resources, Conservation and Recycling*. 2007. Vol. 50 (1). P. 40 – 57.
15. Серегин А.Н., Ермолов В.М., Степанян А.С., Арсентьев В.А. Технология и комплексы оборудования для переработки металлокислотных отходов с выделением товарной продукции // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2010. № 1. С. 35 – 40.
16. Ma N., Houser J.B. Recycling of steelmaking slag fines by weak magnetic separation coupled with selective particle size screening // *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 82. P. 221 – 231.
17. Чижевский В.Б., Шавакулева О.П., Дегодя Е.Ю., Мудрых Н.А. Глубокая переработка сталеплавильных шлаков // *Сталь*. 2014. № 4. С. 124 – 126.
18. Веселовский А.А. Извлечение никеля из отвалного печного шлака шахтной плавки комбината «Южуралникель» // *Металлург*. 2015. № 6. С. 26 – 28.
19. Шакуров А.Г., Журавлев В.В., Паршин В.М. и др. Комплексная переработка жидких сталеплавильных шлаков с восстановлением железа и получением качественной товарной продукции // *Сталь*. 2014. № 2. С. 75 – 81.
20. Сорокин Ю.В., Демин Б.Л., Смирнов Л.А. и др. Переработка шлаков ЭСПЦ в опытной установке барабанного типа с шаровой насадкой // *Сталь*. 2012. № 3. С. 70 – 72.
21. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Рыбенко И.А., Ходосов И.Е. Разработка основ энергоэффективных процессов металлизации с использованием термодинамического моделирования // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2016. Т. 59(4). С. 237 – 244.
22. Shakurov A.G., Zhuravlev V.V., Parshin V.M. etc. Processing of liquid steelmaking slags to obtain commercial products // *Steel in Translation*. 2014. Vol. 44 (2). P. 166 – 172.
23. Bale C.W., Chartrand P., Degterov S.A. etc. FactSage thermochemical software and databases // *Calphad*. 2002. Vol. 26 (2). P. 189 – 228.
24. Bale C.W., Bélisle E., Chartrand P. etc. FactSage thermochemical software and databases – recent developments // *Calphad*. 2009. Vol. 33 (2). P. 295 – 311.
25. Yildirim I.Z., Prezzi M. Chemical, mineralogical and morphological properties of steel slag // *Advances in Civil Engineering*. 2011, Article ID 463638. – 13 p.
26. Дильдин А.Н., Чуманов В.И., Бендера Т.А. Утилизация шлаков сталеплавильного производства // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Металлургия. 2007. № 13 (85). С. 15 – 16.
27. Дильдин А.Н., Чуманов В.И., Чуманов И.В., Еремашев В.Е. Твердофазное восстановление отходов сталеплавильного производства // *Металлург*. 2012. № 2. С. 36 – 40.

Поступила 21 мая 2016 г.

IMPROVEMENT OF DEEP PROCESSING TECHNIQUES FOR WASTE OF STEEL-MELTING PRODUCTION. PART 1. THERMODYNAMIC ANALYSIS

A.N. Dil'din, E.A. Trofimov, I.V. Chumanov

Zlatoust branch of the South Ural State University, Zlatoust, Chelyabinsk Region, Russia

Abstract. The problem of using dump slag in steelmaking production as an industrial source of metallurgical raw materials still has no practical decision and it demands new approaches and ideas. Disposal of slag can be organized so that the result is not only building materials, but metal, suitable for further processing and use in recent years are shown. The purpose of the current work is theoretical study of opportunity and feasibility of steel-melting slag recovery processing to receive metal and oxide phases, which can be used in metallurgy and construction industry. The object of the experimental study was the slag from slag dumps of Zlatoust metallurgical plant (Russian Federation). The programming complex "FactSage" (version 6.4) was used for thermodynamic modeling of the recovery processes of slag dumps. Slag recovery of three different compositions with different content of FeO (15, 10 and 5 wt.%) was modeled. Modeling was performed for the temperature range of 750–1650 °C in step of 5 °C at the pressure gas phase, equal to 0.1 MPa. Excessive amounts of carbon were introduced into the system as a reducing agent in the modeling. The main results of the calculations carried-out for convenience of the analysis are shown in the form of dependences of various characteristics on temperature. The modeling results show in particular that at temperatures above 1340 °C the iron is recovered and goes into the composition of the melt almost completely. Nickel and copper behave similarly. Total recovery of manganese in the composition of the molten metal during the recovery with carbon will not happen. An appreciable amount of manganese remains in the slag composition and gas even at maximum extraction of manganese in the metal. Assessment of the volumes of gaseous substances formed in the process of recovery at different temperatures was carried out. The modeling results indicate that carbon monoxide will dominate the gas phase composition in all the temperature range. Information about the enthalpy change of the system depending on temperature was obtained and allows to assess the costs of thermal energy required to bring the system to the state in which recovery processes become possible.

Keywords: thermodynamics analysis, steelmaking slag, high-temperature recovery, melts.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-5-12

REFERENCES

- Pyrikov A.N., Vil'danov S.K., Likhodievskii A.V., Martynov N.N. Ways of solution of ecological problems in ferrous metallurgy. *Stal'*. 2008, no. 5, pp. 99–103. (In Russ.).
- Grishchenko S.G., Belokurov D.E. Complex of innovative resource-saving technologies and equipment for recycling and ecologically safe utilization of the waste of metallurgy and related industries. *Stal'*. 2010, no. 8, p. 86. (In Russ.).
- Gel'manova Z.S., Filatov A.V. Projects of effective use of industrial wastes for reducing impact on the environment. *Metallurg*. 2015, no. 9, pp. 16–19. (In Russ.).
- Kosyrev K.L., Fomenko A.P., Parshin V.M., Kostin A.S., Zhikharev P.Yu. Prerequisites and concept of creation of the energy-metallurgical complexes for processing of a technogenic waste. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2013, no. 7, pp. 2–11. (In Russ.).
- Smirnov L.A., Grabeklis A.A., Demin B.L. Processing slag from ferroalloy production. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 1, pp. 93–96.
- Toporov V.A., Osetrov V.D., Murzin A.V., Zhilin A.M., Mikurova M.I., Konstantinov K.S. Manufacture of an iron-bearing additive to make cement from steelmaking wastes. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, no. 7, pp. 568–569.
- Chernousov P.I. *Retsikling. Tekhnologiya pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrazovaniy i otkhodov v chernoi metallurgii: monogr.* [Recycling. The technology of processing and recycling of technogenic formations and wastes of ferrous metallurgy: monograph]. Moscow: ID MISiS, 2011, 428 p. (In Russ.).
- Korostelev A.B. Recycling, processing of wastes and clean technologies. *Metallurg*. 2007, no. 1, pp. 72–74. (In Russ.).
- Fedosheeva E.N., Zanozina V.F., Zorin A.D., Samsonova L.E. Preparation of iron oxide pigment from metallurgical production dust for use in construction. *Metallurist*. 2015, vol. 59, no. 5-6, pp. 374–379.
- Leont'ev L.I., Sheshukov O.Yu., Mikheenkov M.A., Stepanov A.I., Zuev M.V., Stepanov I.A. Technological features of recycling of EAF and ladle slags into construction materials and the utilization of refined slag at OJSC "Seversk pipe factory". *Stal'*. 2014, no. 6, pp. 106–109. (In Russ.).
- Smirnov L.A., Sorokin Yu.V., Demin B.L., Gil'varg S.I., Rytvin V.M., Smirnov B.N. Development of the complex processing technology of the dump slag of ferroalloy production. *Stal'*. 2008, no. 6, pp. 90–93. (In Russ.).
- Leont'ev L.I., Rytvin V.M., Gil'varg S.I., Perepelitsyn V.A., Rovnushkin V.A. Processing alumina-bearing ferroalloy slags. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 4, pp. 366–369.
- Zorya V.N., Korovushkin V.V., Permyakov A.A., Volynkina E.P. The research of the mineral composition and crystal structure of iron-containing components of technogenic waste of the metallurgical complex. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 5, pp. 359–366. (In Russ.).
- Das B., Prakash S., Reddy P.S.R., Misra V.N. An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. *Resources, Conservation and Recycling*. 2007, vol. 50 (1), pp. 40–57.
- Seregin A.N., Ermolov V.M., Stepanyan A.S., Arsent'ev V.A. Technology and equipment complexes for processing of metallic wastage with releasing of commercial products. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2010, no. 1, pp. 35–40. (In Russ.).
- Ma N., Houser J.B. Recycling of steelmaking slag fines by weak magnetic separation coupled with selective particle size screening. *Journal of Cleaner Production*. 2014, vol. 82, pp. 221–231.
- Chizhevskii V.B., Shavakuleva O.P., Degodya E.Yu., Mudrykh N.A. Deep processing of steel slags. *Stal'*. 2014, no. 4, pp. 124–126. (In Russ.).
- Veselovskii A.A. Recovery of nickel from discarded slag formed during blast roasting at the Yuzhuralnikel Combine. *Metallurgist*. 2015, vol. 59, no. 6, pp. 461–465.
- Shakurov A.G., Zhuravlev V.V., Parshin V.M., Shkol'nik Ya.Sh., Chertov A.D. Processing of liquid steelmaking slags to obtain commercial products. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 2, pp. 166–172.
- Sorokin Yu.V., Demin B.L., Smirnov L.A., Ivanitsa S.I., Gunenkov V.Yu., Voloshin Yu.A. Processing of electrosmelting slag in a ball-packed drum. *Steel in Translation*. 2012, vol. 42, no. 3, pp. 281–284.
- Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Rybenko I.A., Khodosov I.E. Development of the principles of energy efficient processes of metallization using thermodynamic modeling. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 4, pp. 237–244. (In Russ.).

22. Shakurov A.G., Zhuravlev V.V., Parshin V.M., Shkol'nik Y.S., Chertov A.D. Processing of liquid steelmaking slags to obtain commercial products. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44 (2), pp. 166–172.
23. Bale C.W., Chartrand P., Degterov S.A., Eriksson G., Hack K., Ben Mahfoud R., Melançon J., Pelton A.D., Petersen S. *FactSage Thermochemical Software and Databases*. Calphad. 2002, vol. 26 (2), pp. 189–228.
24. Bale C.W., Bélisle E., Chartrand P., Deckerov S.A., Eriksson G., Hack K., Jung I.H., Kang Y.B., Melançon J., Pelton A.D., Robelin C., Petersen S. *FactSage thermochemical software and databases – recent developments*. Calphad. 2009, vol. 33 (2), pp. -311.
25. Yildirim I.Z., Prezzi M. Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag. *Advances in Civil Engineering*. 2011, Article ID 463638. 13 p.
26. Dil'din A.N., Chumanov V.I., Bendera T.A. Recycling of steelmaking slag. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*. 2007, no. 13 (85), pp. 15–16. (In Russ.).
27. Dil'din A.N., Chumanov V.I., Chumanov I.V., Eremyashev V.E. Solid-phase reduction of waste products from steelmaking. *Metallurgist*. 2012, vol. 56, no. 1-2, pp. 91–96.

Acknowledgements. The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation. The unique identifier of applied researches is RFMEFI57414X0090.

Information about the authors:

A.N. Dil'din, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Technique and technology of materials production"* (andildin@mail.ru)

E.A. Trofimov, *Dr. Sci. (Chem.), Professor of the Chair "Technique and technology of materials production"* (tea7510@gmail.com)

I.V. Chumanov, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of the General Metallurgy* (chumanoviv@susu.ac.ru)

Received May 21, 2016