

ФІЗИЧНА ХІМІЯ ТА ТЕОРІЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 669.054.83

© Маслов В.А.¹, Трофимова Л.А.², Дан Л.А.³

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЖЕЛЕЗОГРАФИТОВЫХ ОТХОДОВ МЕТАЛУРГИИ

В работе на модельных монодисперсных образцах вюстит-углерод и магнетит-углерод продолжены исследования кинетики карботермического самовосстановления дисперсных железографитовых отходов металлургического производства. Получены кинетические кривые их карботермического самовосстановления при температурах 970 и 1050°С. На основании этих кривых подтверждена двухстадийная схема процесса и его топочимический характер.

Ключевые слова: карботермическое самовосстановление, вюстит, магнетит.

Маслов В.О., Трофимова Л.О., Дан Л.О. Моделивання процесу карботермічного самовідновлення дисперсних залізо-графітових відходів. В роботі на модельних зразках вюстит-вуглець та магнетит-вуглець продовжені дослідження кінетики карботермічного самовідновлення дисперсних залізо графітових відходів металургійного виробництва. Отримані криві їх карботермічного самовідновлення при температурах 970 та 1050°С. На підставі цих кривих підтверджена двохстадійна схема процесу та його топочімічний характер.

Ключові слова: карботермічне самовідновлення, вюстит, магнетит.

V.O. Maslov, L.O. Trofimova, L.O. Dan. Process of carbothermal self-recovering of disperse Fe-C waste materials of metallurgical production modelling. Investigation of carbothermic self-recovering kinetics of metallurgical production Fe-C waste materials has been continued in this work for model monodisperse wustite-carbon and magnetite-carbon samples. On the strength of the results of differential thermal analysis the temperature of the beginning of the interaction in polydisperse material was determined. It should be more than 960°С. Kinetic curves of carbothermic self-recovering at 970°С and 1050°С were obtained on monodisperse model samples. During the study of high-temperature processing kinetics of Fe-C waste materials the amount of removed oxygen was determined from the volume and composition of the emitted gas phase. The method comprising simultaneous volume - dynamic and gas analyses was used. Analysis of the results showed that with increase in temperature the maximum rate of oxygen removal was achieved faster and had greater value. Analysis of the gas phase showed that at the initial stage of the process CO content was low over the whole operating temperature range. Then it increased and CO/CO₂ ratio remained constant till the experiment was over. The concentration of CO for all temperatures being studied was about 75%, the rest was CO₂. It convincingly indicated that the process is out of equilibrium with the gas phase and shifting towards CO₂ formation. It was found that the completion of the first

¹ д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, maslov_v_o@pstu.edu

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, leonid-dan@mail.ru

³ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, leonid-dan@mail.ru

stage of the process is characterized by virtually zero magnetic properties of the material, i.e. by obtaining pure wustite. The obtained results confirmed the two-stage scheme of carbothermic process of dispersed Fe-C waste materials self-recovering and its topochemical nature. Studies of electrophysical and magnetic properties of the samples after the carbothermic self-recovering have been made. We found that for the studied materials the value of the specific saturation magnetization keeps growing during the process, reaching $179 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ for wustite-carbon sample. The obtained value of the specific electric resistance varies slightly from $1,7\cdot 10^{-4}$ to $2,7\cdot 10^{-4} \text{ Ohms}\cdot\text{m}$.

Keywords: *carbothermal self-recovering, wustite, magnetite.*

Постановка проблеми. Дисперсные железорафитовые отходы миксерного отделения металлургического производства (ЖГО) содержат оксиды железа (Fe_xO_y) в виде FeO , Fe_3O_4 и Fe_2O_3 . При этом основная часть находится в виде магнетита Fe_3O_4 . Размер частиц оксидов железа, в основном, менее 0,16 мкм. Частицы графита имеют чешуйчатую форму с медианными размерами 0,1-1,0 мкм при толщине 1-30 нм [1].

В исходном состоянии ЖГО обладают большой неоднородностью по размерам частиц и невысоким уровнем магнитных свойств. Их удельная намагниченность насыщения, σ_s , находится на уровне 14,2-22,1 $\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$.

Анализ последних исследований и публикаций. Проведенные ранее нами исследования показали, что при помощи карботермического самовосстановления (КТСВ) из дисперсных железорафитовых отходов металлургического производства можно получить композиционный материал, обладающий уникальным комплексом электрофизических свойств [2].

Цель статьи – продолжение исследования кинетических особенностей КТСВ дисперсных ЖГО металлургического производства.

Изложение основного материала. В настоящей работе продолжены исследования кинетических особенностей КТСВ дисперсных ЖГО металлургического производства. Учитывая найденную ранее [3] зависимость уровня электрофизических свойств ЖГО от их дисперсности из полидисперсного материала были подготовлены монодисперсные образцы фракции (-0,1 + 0,063) с содержанием графита 23%. Термографический анализ проводили ранее на необработанных образцах дисперсных ЖГО с содержанием графита 42% [4]. Для получения истинных кинетических зависимостей монодисперсные образцы были термически обработаны. При получении образцов с вюститной матрицей образцы нагревали без доступа воздуха и выдерживали при температуре $670\pm 10^\circ\text{C}$ в течение трех часов, что приводило к полной потере ими магнитных свойств. Для получения магнетитовой матрицы образцы выдерживали при температуре $600\pm 10^\circ\text{C}$.

На первом этапе исследований, как и в работе [4], для определения температур начала взаимодействия был проведен дифференциальный термический анализ (ДТА) исследуемых необработанных дисперсных ЖГО. Для получения достоверной информации, особенно в области высоких температур, ДТА проводили по ступенчатому режиму: вначале нагрев со скоростью 10 градусов в минуту до температуры 850°C , а затем – со скоростью 2 градуса в минуту.

Полученные результаты (рисунок 1) показывают, что на кривой ДТА имеются три участка. Первый эндоэффект наблюдали при температурах 60-200 $^\circ\text{C}$. При этом на холодных частях реактора с пробой наблюдали конденсацию капелек воды. Таким образом, первый пик эндоэффекта соответствует удалению из образца гигроскопической влаги.

При 500-850 $^\circ\text{C}$ наблюдали меньший по высоте, но растянутый во времени эндоэффект. Одновременно с этим в реакторе происходило небольшое газовыделение за счет выделения адсорбированных газов и гидроксидов.

Проведенный при 900 $^\circ\text{C}$ и длительной выдержке дополнительный опыт показал, что при этой температуре получается немагнитный материал, т.е. все соединения железа переводятся в вюстит. Следовательно, пики, соответствующие восстановлению гематита и магнетита на термограмме сливаются в один пик. Это может быть следствием большой скорости нагрева на данном этапе анализа.

Третий пик эндоэффекта начинается при $960\pm 5^\circ\text{C}$ и сопровождается наибольшим эндоэффектом. С этого момента начинается интенсивное газовыделение. Этот пик ДТА является

следствием эндоэффекта восстановления вюстита графитом. С ростом температуры интенсивность газовыделения увеличивается, а величина эндоэффекта растет. Предельной температурой при проведении термографических исследований была температура 1000°C.

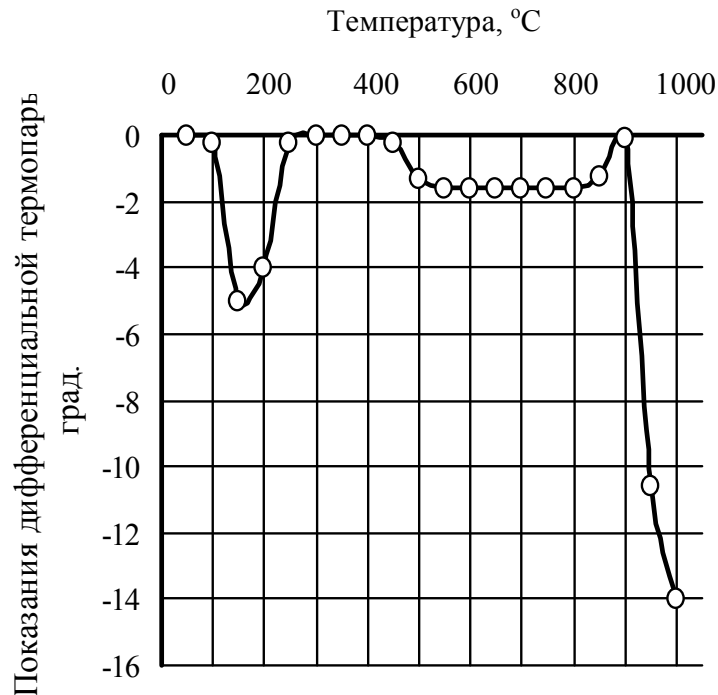


Рис. 1 – Термограмма ЖГО

Анализ полученных результатов и сопоставление их с термодинамикой протекания реакции Белла-Будуара показывает, что КТСВ дисперсных ЖГО должно проводиться при температурах более 960°C.

При исследовании кинетики КТСВ на основе ДТА в качестве базовых выбрали температуры: 970°C, 990°C, 1030°C и 1050°C.

Согласно общепринятой теории, процесс восстановления оксидов железа твердым углеродом является процессом с участием газообразного восстановителя [5-7 и др.]. В сфере реакции присутствуют твердые и газообразные реагенты. Известно, если химический процесс протекает при участии разных фаз, то реакция проходит на границе их раздела [8-12]. Поэтому процесс, исследуемый в настоящей работе, топохимический по своей природе.

Современная топохимия рассматривает подобные процессы как двухстадийные [10]. Первая стадия взаимодействия газа с твердым веществом заключается в образовании зародышей продукта на поверхности твердого реагента, их рост и слияние.

На второй стадии происходит образование сплошной тонкой оболочки продукта на всей реакционной поверхности с последующим продвижением фронта реакции вглубь твердого реагента. При этом происходит снижение скорости процесса под действием двух факторов: уменьшения реакционной поверхности и усиления влияния диффузионного сопротивления из-за увеличивающейся толщины слоя твердого продукта.

Исходя из этого, дальнейшие эксперименты было сориентированы на выявления топохимической природы рассматриваемого процесса КТСВ.

При изучении кинетики высокотемпературной обработки ЖГО определяли количество удаленного кислорода по объему и составу выделившейся газовой фазы. Для этого использовали методики, включающие одновременно волюмодинамический и газовый анализы [11].

На рис. 2 в качестве примера приведены первичные данные эксперимента по КТСВ образца «вюстит-углерод» при 1050°C. После введения реактора в печь изотермический процесс начинался через 2,5 мин. Начиналось газовыделение, достигавшее максимума интенсивности на 5 минуте. Обращает на себя внимание, что кривая $\Sigma V_{уд}$ имеет S-образную форму.

Анализ полученных результатов показал, что с ростом температуры максимум скорости достигался быстрее и имел большую величину. Так, для 970°С максимум интенсивности газовой выделения приходился на 10-ю минуту и имел величину 2,25 мл/г·мин; для 990°С – на 6-ю и был равен 5,1 мл/г·мин; при 1050°С эти величины были, соответственно, 4 мин и 11 мл/г·мин.

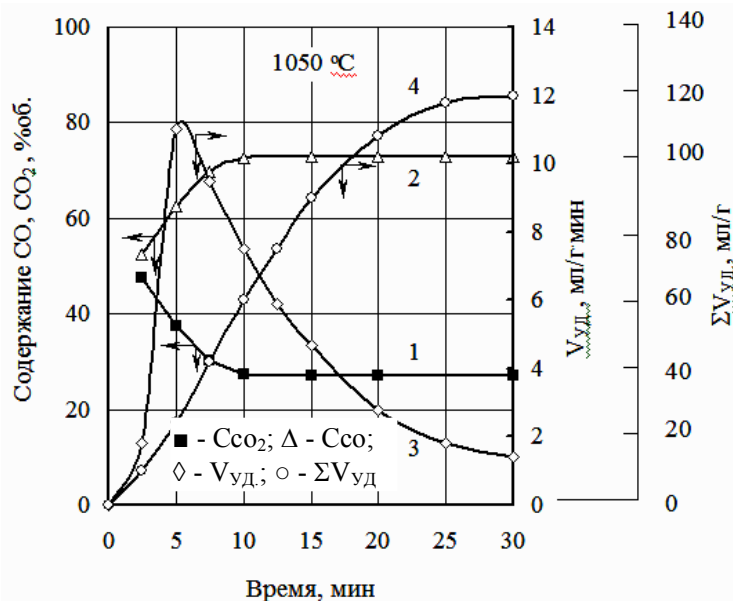


Рис. 2 – Кинетика карботермического самовосстановления образцов FeO по данным волюмодинамического и хроматографического анализов

За одно и то же время от начала процесса объем выделившихся газообразных продуктов реакции был различен и возрастал с ростом температуры. Например, за 20 минут обработки при 970°С выделялось около 35, при 990°С – около 50, а при 1050°С – 120 мл/г газов. Это количество является предельным, что говорит о полном восстановлении.

Анализ газовой фазы показал следующее. На начальной стадии процесса содержание CO для всего рабочего диапазона температур невысоко. Затем происходит его повышение и далее до момента прекращения опыта соотношение CO/CO₂ остается постоянным. При этом концентрация CO для всех исследованных температур составляет около 75%, остальное – CO₂. Это указывает на протекание процесса в неравновесном по газовой фазе режиме со смещением в сторону образования CO₂.

Расчет скоростей удаления кислорода из образцов дал следующие результаты. С ростом температуры увеличивается скорость процесса. При этом если для 970°С кривая скорости сглажена, то для 990°С наблюдали ярко выраженный максимум. Дальнейший рост температуры увеличивает значение величины максимума и смещает его в сторону начала процесса. Крутизна падения скорости после прохождения максимума также изменяется. Для более низких температур кривая более пологая.

Полученные результаты подтверждают топахимическую природу процесса карботермического самовосстановления образца «FeO-C» [8 и др.].

Для образцов «магнетит – углерод», в отличие от предыдущего эксперимента, практически не удалось обнаружить разделение стадий Fe₃O₄→FeO и FeO→Fe (рис. 3).

Процесс карботермического самовосстановления образцов «магнетит-углерод» при всех рабочих температурах протекал практически одинаково. Как и в случае системы «вюстит-углерод», вначале наблюдали резкое увеличение газовой выделения, проходившее через максимум. Величина максимума интенсивности газовой выделения увеличивалась с ростом температуры опыта. Для температуры 970°С она равнялась 7,9 мл/г, для температуры 1030°С – 12,1 мл/г, а для 1050°С – 13,5 мл/г. С ростом температуры наблюдали смещение пика в сторону начала процесса. При этом для температуры эксперимента 970°С максимум приходился на четвертую минуту, а при 1050°С – на вторую.

После прохождения экстремума интенсивности газовыделение снижается, причем скорость снижения зависит от температуры не так сильно, как для образцов «вюстит-углерод».

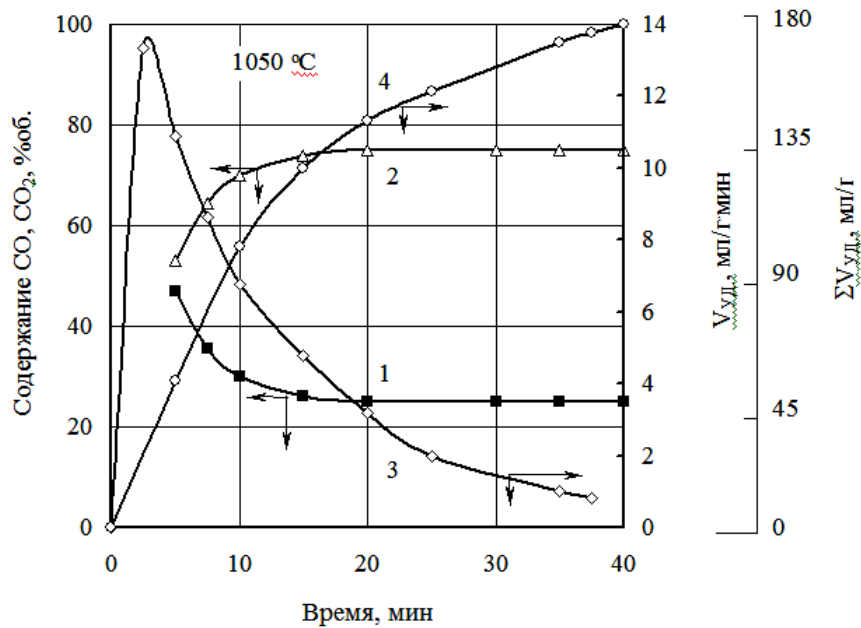


Рис. 3 – Кинетика карботермического самовосстановления образцов Fe₃O₄ по данным волюмодинамического и хроматографического анализов

Интегральная величина газовой выделения также зависит от температуры. Характер кривой для различных температур сходен. Тем не менее, для одного и того же времени процесса (например, 40 мин) абсолютное значение этой величины различно. Так для 970°C она равна 110, для 1030°C ~ 170, а для 1050°C ~ 180 мл/г.

Рассчитали скорости удаления кислорода из образца. В отличие от образцов системы «вюстит-углерод», для образцов с магнетитом влияние температуры не столь велико. Уже при температуре 970°C максимум скорости четко выражен. В рабочем диапазоне температур максимум скорости меняется от 4,8 моль/г·с при 970°C до 8,6 моль/г·с при 1050°C. Так же как и в предыдущей группе опытов при достижении степени восстановления ~ 50% величины скоростей для всех температур становятся близкими. Это объясняется возникновением и усилением диффузионного торможения процесса из-за перехода его вглубь частиц с образованием слоя продуктов.

Анализ газовой фазы для исследуемого вида образцов показал схожесть ее изменения с изменением газовой фазы образцов вюстит-углерод. В обеих группах опытов в начале процесса наблюдали высокое содержание CO₂ при низком содержании CO. Затем, после достижения максимума скорости газовой выделения газовый состав стабилизируется и не изменяется до завершения опыта.

Отсутствие четко выраженной стадии Fe₃O₄→FeO для образцов «магнетит-углерод» можно объяснить следующим. В случае карботермического самовосстановления свежеприготовленных образцов этого вида наблюдается влияние так называемой «предыстории образца» на его активность [10]. Свежеприготовленный образец имеет на своей поверхности значительное количество дефектов кристаллической структуры; с течением времени эти дефекты в основном сглаживаются, а активность образца в топочимических процессах снижается. Материал образцов, использовавшихся в наших опытах, имел короткую «предысторию» и имел высокую дефектность поверхности. Это вызывало повышенную активность магнетита в ходе КТСВ. Таким образом, стадия Fe₃O₄→FeO начиналась еще при нагреве образца до рабочей температуры и к выходу установки на режим уже завершалась. Таким образом, в основное время эксперимента проходило уже восстановление вюstitа, на которое накладывалось продолжение начавшейся ранее стадии Fe₃O₄→FeO.

Возможен также вариант, при котором протекают параллельные реакции $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}$ и $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$. При этом параметры процессов накладываются друг на друга, оказывая взаимное влияние.

Несмотря на различия в ходе КТСВ образцов «вюстит-углерод» и «магнетит-углерод», результаты кинетических исследований последних также подтверждают топохимическую природу процесса карботермического самовосстановления образца « $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-C}$ » [8 и др.].

С практической точки зрения представляет интерес исследовать кинетику изменения электрофизических свойств составляющих ЖГО фаз. Исследовали изменение удельной намагниченности насыщения, σ_s , образцов «вюстит-углерод» и «магнетит-углерод» в процессе КТСВ при различных температурах. Результаты экспериментов приведены на рис. 4.

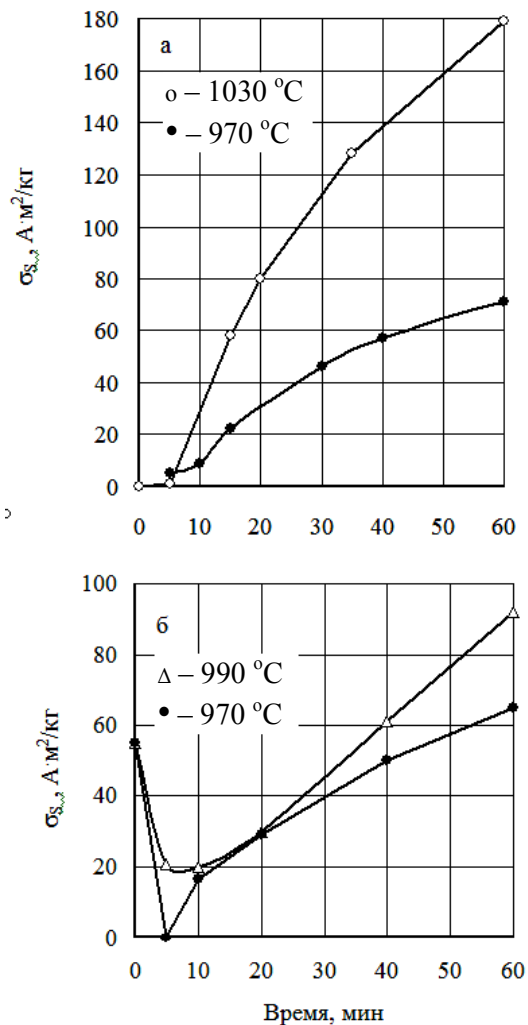


Рис. 4 – Изменение магнитных свойств образцов вюстита (а) и магнетита (б) в процессе карботермического самовосстановления

Исходное значение σ_s образца «вюстит-углерод» составляло $4,4 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Через 5 минут после начала процесса при 1030°C σ_s образца уменьшилась до $1 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ (см. рис. 4, а). Очевидно, что на первом этапе процесса при наличии большого количества углекислого газа в атмосфере реактора происходило доокисление образца до практически чистого вюстита. Затем начиналось резкое повышение величины σ_s . При $\tau = 20$ минут удельная намагниченность насыщения достигала $80 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$, а для $\tau = 60$ мин – $179 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ (для железного порошка $\sigma_s = 230 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$).

При температуре карботермического самовосстановления 970°C процесс также не характеризовался резким повышением σ_s . Только к 13-й минуте удельная намагниченность насыщения превосходила исходную для данного образца. Для этой температуры кривая располагалась

ниже, чем для 1030⁰С, и даже при $\tau = 60$ мин σ_s не превышала 80 А·м²/кг.

Для образца «магнетит-углерод» (см. рис. 4, б) также было характерно снижение уровня магнитных свойств в начале эксперимента. Объяснялось это тем, что происходил распад магнитного оксида с образованием немагнитного – FeO. При этом магнитные свойства не падали до нуля, так как параллельно с разложением магнетита шло разложение вюститита, что в какой-то степени компенсировало снижение величины σ_s . Примерно через 15 мин от начала эксперимента начинался рост σ_s , который продолжался до его окончания.

После 60 мин обработки при 990⁰С величина σ_s достигала значения 96 А·м²/кг, что превышало ее значение для образца «вюститит-углерод» и свидетельствовало о более активном протекании процесса для данного типа образцов.

Проведение процесса при 970⁰С характеризовалось значительным снижением уровня магнитных свойств (при $\tau = 5$ мин $\sigma_s \approx 0$). По-видимому, при низких температурах происходило вначале быстрое восстановление Fe₃O₄ до FeO, а уже затем начиналось более медленное восстановление вюститита.

Таким образом, при поддержании определенного соотношения времени обработки и рабочей температуры из монодисперсного сырья ЖГО можно получить продукт с заданными значением σ_s .

Изменение удельного электросопротивления по ходу процесса не столь велико, поскольку в начале его имеется значительный избыток графита – материала с высокой электропроводностью, а уменьшение его количества по ходу процесса компенсируется образованием электропроводящей металлической фазы. В качестве примера в таблице приведены результаты, полученные для образцов, подвергавшихся обработке при температуре 1050⁰С.

Таблица

Удельное объемное электрическое сопротивление образцов для различного времени обработки при 1050⁰С

Образец τ , мин	Удельное электросопротивление, ρ , 10 ⁻⁴ , Ом·м			
	0	10	30	60
FeO+C	1,7	1,9	2,1	2,4
Fe ₃ O ₄ +C	1,8	2,0	2,3	2,7

Выводы

1. Для монодисперсных систем «вюститит-углерод» и «магнетит-углерод» получены кинетические кривые карботермического самовосстановления при температурах 970-1050⁰С. Установлено, что во всем рабочем диапазоне температур для системы «магнетит-углерод» не наблюдается заметного лимитирования стадии Fe₃O₄→FeO, что связано с использованием в опытах свежеприготовленных образцов, имевших повышенную реакционную способность.

2. На основании полученных кинетических кривых КТСВ дисперсных образцов «вюститит-углерод» и «магнетит-углерод» подтверждена двухстадийная схема процесса их карботермического самовосстановления, что указывает на его топохимическую природу. При этом завершение первой стадии процесса характеризуется практически нулевыми магнитными свойствами материала, т.е. наличием чистого вюститита.

3. Проведены исследования электрофизических и магнитных свойств образцов прошедших карботермическое самовосстановление. Установлено, что для изученных материалов величина σ_s непрерывно растет в ходе осуществления процесса, достигая 179 А·м²/кг у образца «вюститит-углерод» (для железного порошка $\sigma_s = 230$ А·м²/кг). Полученная величина ρ_v изменяется незначительно и находится на уровне 1,7-2,7·10⁻⁴ Ом·м.

Список использованных источников:

1. Maslov V.A. Structural-morphological and electrophysical characteristics of disperse iron-graphite metallurgical wastes / V.A. Maslov, L.A. Trofimova, L.A. Dan // Steel in translation. – 2009. – Vol. 39. – №7. – Pp. 551-555.

2. Маслов В.А. Дисперсные железографитовые отходы металлургического производства как сырье для получения новых материалов / В.А. Маслов, Л.А. Трофимова, Л.А. Дан // Сталь. – 2009. – №3. – С. 67-70.
3. Маслов В.А. О кинетических особенностях высокотемпературной обработки дисперсных железографитовых отходов металлургического производства / В.А. Маслов, Л.А. Трофимова, Л.А. Дан // Известия ВУЗов, Черная металлургия. – 2008. – №9. – С. 53-55.
4. Дифференциальный термический анализ кинетики карботермического самовосстановления дисперсных ЖГО металлургического производства / В.А. Маслов, Ю.П. Пустовалов, Л.А. Трофимова, В.Э. Макеев // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2003. – Вип. 13. – С. 76-79.
5. Филиппов С.И. Теория металлургических процессов / С.И. Филиппов. – М.: Металлургия, 1967. – 279 с.
6. Ростовцев С.Т. Теория металлургических процессов / С.Т. Ростовцев. – М.: Металлургиздат, 1956. – 516 с.
7. Есин О.А. Физическая химия пирометаллургических процессов / О.А. Есин, П.В. Гельд. – Свердловск: Металлургиздат, 1962. – Ч.1. Реакции между газообразными и твердыми фазами. – 671 с.
8. Термодинамика процессов восстановления окислов металлов / Г.И. Чуфаров [и др.]. – М.: Металлургия, 1970. – 440 с.
9. Крылов О.В. Развитие современных представлений о кинетике гетерогенных реакций в работах С.З. Рогинского / О.В. Крылов // Проблемы кинетики и катализа. XV. Механизм и кинетика гетерогенных реакций. – М.: Наука, 1973. – С. 5-11.
10. Розовский А.Я. Гетерогенные химические реакции (кинетика и макрокинетика) / А.Я. Розовский. – М.: Наука, 1960. – 324 с.
11. Маслов В.А. Исследование кинетики карботермического самовосстановления железографитовых отходов металлургического производства / В.А. Маслов, Л.А. Трофимова // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2004. – Вип. 14. – С. 41-43.
12. Князев В.Ф. Бескоксовая металлургия железа / В.Ф. Князев, А.И. Гиммельфарб, А.М. Немецов. – М.: Металлургия, 1972. – 272 с.

Bibliography:

1. Maslov V.A. Structural-morphological and electrophysical characteristics of disperse iron-graphite metallurgical wastes / V.A. Maslov, L.A. Trofimova, L.A. Dan // Steel in translation. – 2009. – Vol. 39. – №7. – Pp. 551-555.
2. Maslov V.A. Dispersed Fe-C metal production waste as raw material for production of new materials / V.A. Maslov, L.A. Trofimova, L.A. Dan // Steel. – 2009. – №3. – Pp. 67-70. (Rus.)
3. Maslov V.A. Kinetic peculiarities of high-temperature processing of dispersed Fe-C metallurgical wastes / V.A. Maslov, L.A. Trofimova, L.A. Dan // College news, Ferrous metallurgy. – 2008. №9. – Pp. 53-55. (Rus.)
4. Differential thermal analysis of the kinetics of carbothermic self-reduction disperse Fe-C wastes / V.A. Maslov, Y.P. Pustovalov, L.A. Trofimova, V.E. Makeev // Reporter of the Priazovskyi state technical university : Collection of scientific works / PSTU. – Mariupol, 2003. – Issue 13. – Pp. 76-79. (Rus.)
5. Filippov S.I. Theory of metallurgical processes / S.I. Filippov. – M.: Metallurgy, 1967. – 279 p. (Rus.)
6. Rostovtsev S.T. Theory of metallurgical processes / S.T. Rostovtsev. – M.: Metallurgizdat, 1956. – 516 p. (Rus.)
7. Esin O.A. Physical chemistry pyrometallurgical processes / O.A. Esin, P.V. Geld. – Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1962. – Part 1. The reaction between gaseous and solid phases. – 671 p. (Rus.)
8. Thermodynamics of the processes of recovery of oxides of metals / G.I. Chufarov [and others]. – Metallurgy, 1970. – 440 p. (Rus.)
9. Krylov O.V. The Development of modern ideas about the kinetics of heterogeneous reactions in the works of C.Z. Roginski / O.V. Krylov // Kinetics and catalysis. XV. The mechanism and kinetics of heterogeneous reactions. – M.: Nauka, 1973. – Pp. 5-11. (Rus.)
10. Rozovsky A.J. Heterogeneous chemical reactions (kinetics and macrokinetics) / A.J. Rozovsky. –

- М.: Science, 1960. – 324 p. (Rus.)
11. Maslov V.A. Study of kinetics of carbothermic self - reduction of Fe-C metallurgical wastes / V.A. Maslov, L.A. Trofimova // Reporter of the Priazovskyi state technical university: collection of scientific works / PSTU. – Mariupol, 2004. – Issue 14. – Pp. 41-43. (Rus.)
12. Knyazev V.F. Coke-free metallurgy of iron / V.F. Knyazev, A.I. Gimmelfarb, A.M. Nemenov. – М.: Metallurgy, 1972. – 272 p. (Rus.)

Рецензент: А.М. Скрещцов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 23.02.2015

УДК 669.054.8.001.573

© Волошин В.С.¹, Бурко В.А.², Харабет В.В.³

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ В МЕТАЛЛУРГИИ

Приведены основные принципы математического моделирования технологических процессов, направленных на вычленение отдельных компонентов сырьевой базы производства в продуктивную базу и исследование их динамики при прохождении от одного передела к другому с целью поиска путей повышения их потребительской стоимости. Предложена модель, которая позволяет проследить динамику изменения структуры любого компонента, содержащего углерод, начиная с самого емкого материала – угольной шихты до их размещения в отходящих газах и пыли, шлаках и готовом металле. Приведенная в работе модель позволяет достаточно быстро оценить основные направления движения компонентов сырьевой базы, содержащих углерод и его соединения с тем, чтобы получить, по возможности замкнутые циклы движения этих материалов или их модификации в рамках одного и того же производства. Отдельный компонент сырьевой базы рассматривается в равной степени и в готовой продукции, и в отходах. Подчеркнута равнозначность этих параллельных процессов в любой производственной системе.

Ключевые слова: модель, металлургия, отход, углерод, графы, сырьевая база.

Волошин В.С., Бурко В.А., Харабет В.В. Математична модель вуглецевмісних відходів в металургії. Наведено основні принципи математичного моделювання технологічних процесів, спрямованих на виокремлення окремих компонентів сировинної бази виробництва в продуктивну базу і дослідження їх динаміки при проходженні від одного переділу до іншого з метою пошуку шляхів підвищення їх споживчої вартості. Запропоновано модель, яка дозволяє простежити динаміку зміни структури будь-якого компонента, що містить вуглець, починаючи з самого емного матеріалу - вугільної шихти до їх розміщення у відхідних газах і пилу, шлаках і готовому металі. Наведена в роботі модель дозволяє досить швидко оцінити основні напрямки руху компонентів сировинної бази, що містять вуглець і його сполуки з тим, щоб отримати, по можливості замкнуті цикли руху цих матеріалів або їх модифікації в рамках одного і того ж виробництва. Окремий компонент сировинної бази розглядається в рівній мірі і в готовій продукції, і у відходах. Підкреслена рівнозначність цих паралельних процесів в будь-якій виробничій системі.

Ключові слова: модель, металургія, відхід, вуглець, графи, сировинна база.

¹ д-р техн. наук, ректор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, burko@mariupol.org.ua

³ канд. пед. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь