

ISSN 2091-5527

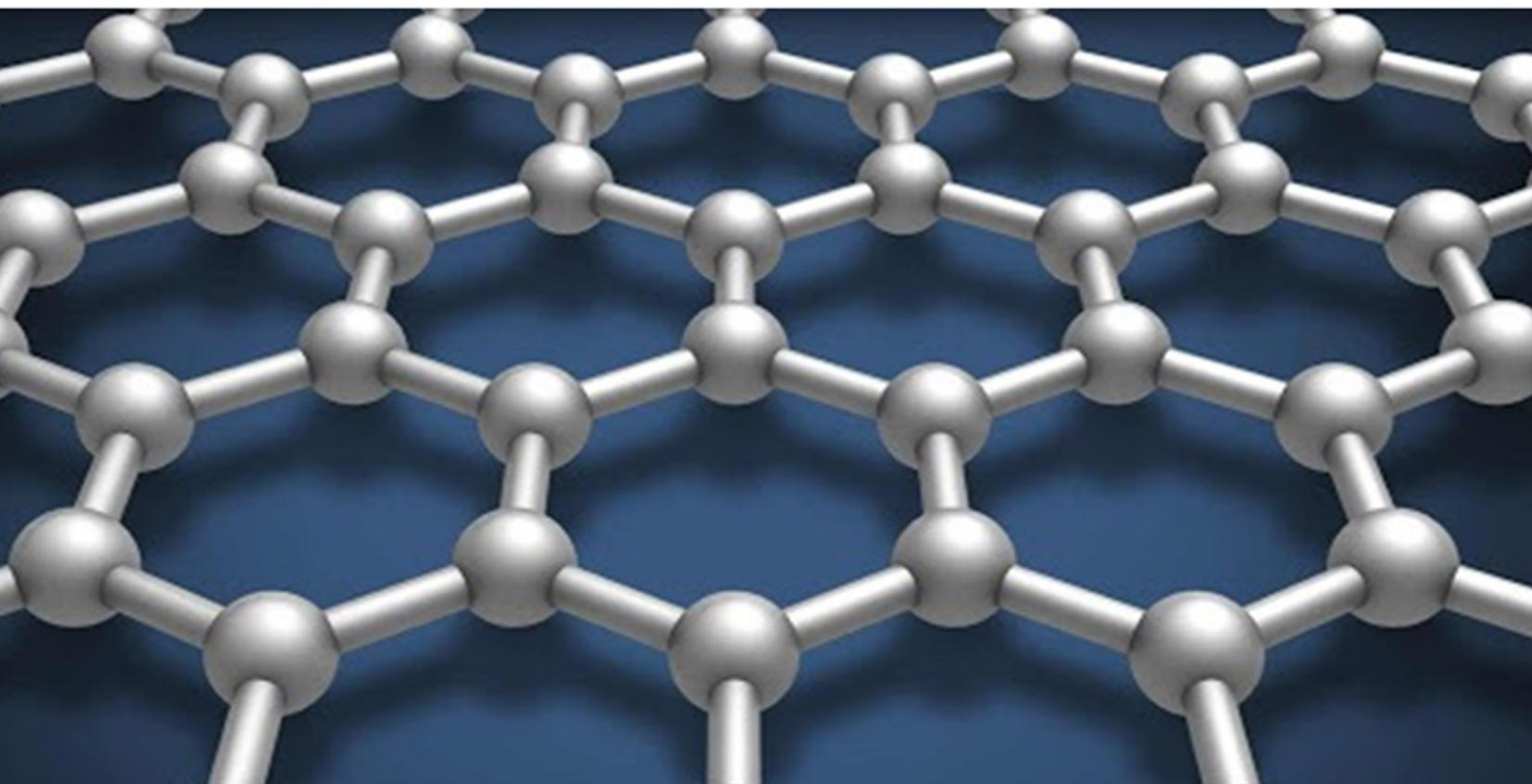
№ 2/2026

Ўзбекистон

Kompozitsion

Materiallar

Ilmiy-texnikaviy va amaliy jurnali



Ўзбекский научно-технический и производственный журнал

Композиционные материалы

УДК669.332.242

МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОНВЕРТЕРНОГО ШЛАКА И КЛИНКЕРА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ

Очилдиев К.Т., Мухаметджанова Ш.А., Маткаримов С.Т., Исмаилов Ж.Б.,
Нуралиев О.У., Акрамов У.А., Чориев Х.И.

Ташкентский государственный технический университет

Аннотация. В работе рассмотрен механизм взаимодействия конвертерного шлака и клинкера, образующегося при переработке цинксодержащего сырья. Показано, что восстановление оксидов металлов (Fe_3O_4 , FeO , Cu_2O и др.) в системе осуществляется за счёт карботермических и металлותרмических процессов. Установлено, что ключевую роль в восстановлении играют углерод и металлическое железо, содержащиеся в клинкере. Описаны стадии электронного переноса, образования промежуточных адсорбционных комплексов и формирования восстановленных форм металлов.

Ключевые слова: конвертерный шлак, клинкер, восстановление, карботермический процесс, металлותרмический процесс, механизм реакции, оксиды металлов.

Введение. Клинкер, образующийся на заключительной стадии процесса производства цинка, представляет собой техногенный отход, содержащий соединения меди, свинца, цинка, железа и других металлов. Однако среди этих компонентов только углерод, оставшийся от кокса, и металлическое железо, восстановленное в процессе вальцевания до металлического состояния, обладают выраженными восстановительными свойствами. При высокотемпературном взаимодействии жидкого конвертерного шлака и клинкера именно металлическое железо и остаточный углерод клинкера восстанавливают магнетит, а также окисленные соединения меди до вюститита и более восстановленных форм [1].

В связи с этим в данном исследовании основные актуальной задачей является разработка научно обоснованного механизма восстановления оксидов металлов с использованием доступных восстановителей, содержащихся в клинкере, а целью работы было изучение механизма взаимодействия конвертерного шлака и клинкера при восстановлении оксидов металлов.

Физико-химическая характеристика системы. Конвертерный шлак представляет собой сложную гетерогенную оксидную систему, формирующуюся в процессе пирометаллургической переработки медных концентратов. Основу его фазового состава составляют оксидные соединения железа и меди, находящиеся в различных степенях окисления и характеризующиеся различной термодинамической устойчивостью.

В составе конвертерного шлака преимущественно присутствуют следующие соединения: Fe_3O_4 ; FeO ; Cu_2O ; Fe_2SiO_4 . Данные фазы формируют высоковязкую расплавленную систему, обладающую значительным содержанием кислорода в связанном состоянии.

Особенностью структуры конвертерного шлака является высокая степень полимеризации силикатной составляющей, а также наличие устойчивых оксидных комплексов железа, в частности магнетита, который оказывает существенное влияние на физико-химические свойства расплава, включая вязкость, плотность и способность к фазовому разделению [2].

Клинкер, образующийся в процессе переработки цинксодержащего сырья, представляет собой техногенный материал восстановительного типа, содержащий значительное количество активных восстановителей. Его состав характеризуется наличием металлического железа Fe^0 , обладающего высокой восстановительной активностью, остаточного углерода (С), способного участвовать в карботермических реакциях, а также оксидных и восстановленных форм железа.

Наличие одновременно металлической и углеродной фаз делает клинкер комплексным восстановителем, способным реализовывать как металлותרмический, так и карботермический механизмы восстановления оксидов металлов.

Следует отметить, что взаимодействие указанных компонентов в системе «конвертерный шлак – клинкер» приводит к формированию условий для протекания интенсивных окислительно-восстановительных процессов. При этом оксидные фазы шлака выступают в качестве окислителей, а компоненты клинкера в роли доноров электронов [3].

Таким образом, рассматриваемая система «конвертерный шлак – клинкер» характеризуется наличием внутреннего восстановительного потенциала, обусловленного термодинамической неустойчивостью части оксидных фаз шлака и высокой реакционной способностью

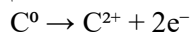
восстановительных компонентов клинкера. Это создаёт предпосылки для протекания самопроизвольных восстановительных процессов при высоких температурах без дополнительного введения внешних восстановителей.

Механизм взаимодействия фаз в системе «конвертерный шлак – клинкер». Взаимодействие конвертерного шлака и клинкера при высокотемпературной обработке носит сложный гетерогенный характер и протекает на границе раздела твёрдой и жидкой фаз. Процесс сопровождается одновременным протеканием карботермических и металлотермических реакций восстановления оксидов металлов.

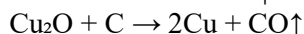
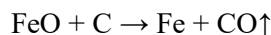
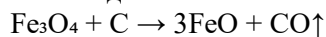
На первой стадии взаимодействия происходит физический контакт фаз с последующим подводом энергии активации. В результате этого увеличивается внутренняя энергия системы, что сопровождается ростом энтропии и повышением реакционной способности компонентов. На границе раздела фаз формируется кратковременный двойной электрический слой, обусловленный перераспределением электронов между восстановителем и оксидной фазой шлака.

Карботермический механизм восстановления. Оксидные соединения железа и меди, обладая высокой электроотрицательностью кислородной составляющей, притягивают валентные электроны восстановителей. В результате этого на поверхности оксидов начинается процесс электронного переноса, приводящий к восстановлению металлов. Карботермический механизм восстановления

Углерод, содержащийся в клинкере, выступает в качестве основного восстановителя и участвует в реакциях:



Передача электронов приводит к восстановлению оксидов металлов:



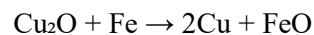
Образующийся оксид углерода (CO) обладает высокой диффузионной способностью и быстро покидает реакционную зону, а дальнейшее участие CO в восстановительных реакциях усиливает общий эффект процесса [4].

Металлотермический механизм восстановления. Металлическое железо, присутствующее в клинкере, также активно

участвует в восстановительных процессах, являясь донором электронов:



В результате протекают реакции:



Металлотермический механизм отличается более высокой кинетической скоростью по сравнению с карботермическим, что связано с более высокой активностью металлического железа [5].

В целом механизм взаимодействия конвертерного шлака и клинкера может быть представлен как последовательная цепь взаимосвязанных стадий, протекающих на границе раздела фаз и в объёме расплава. На первом этапе осуществляется непосредственный контакт между шлаком и клинкером, в результате чего формируется реакционная поверхность взаимодействия. Далее на этой поверхности происходит образование активных центров, обусловленных структурной перестройкой оксидных фаз и локальным перераспределением электронной плотности. На следующей стадии начинается процесс электронного переноса от восстановительных компонентов клинкера (углерода и металлического железа) к оксидным соединениям шлака. Этот этап является ключевым, поскольку именно он определяет переход металлов из окисленного состояния в более низкие степени окисления. В результате последующего развития процесса происходит восстановление ионов железа и меди до низших валентных форм или до металлического состояния. Завершающей стадией является удаление образующихся газообразных продуктов реакции, в первую очередь оксида углерода (CO) и углекислого газа (CO₂), из реакционной зоны. Их выделение способствует смещению равновесия в сторону образования продуктов восстановления и тем самым интенсифицирует общий процесс.

Таким образом, механизм взаимодействия конвертерного шлака и клинкера представляет собой многостадийный процесс, включающий карботермическое, металлотермическое и газофазное восстановление оксидов металлов. Совокупное действие углерода и металлического железа обеспечивает высокую эффективность восстановления, что подтверждает целесообразность использования клинкера как комплексного восстановителя в переработке металлургических шлаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ochildiev Q.T., Khasanov A.S., Khojiev Sh.T. Comparative evaluation of the efficiency of various materials in the process of reducing magnetite from slag melt // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – Москва, 2022. – № 11(104), часть 7. – С. 22-24.

- Очилдиев К.Т., Мухаметджанова Ш.А., Маткаримов С.Т., Исмаилов Ж.Б., Нуралиев О.У., Акромов У.А., Чориев Х.И.** Термодинамический анализ процессов восстановления оксидов металлов конвертерного шлака клинкером 172
- Марданова Ю.У., Камалова Д.И., Абед Н.С.** Исследование структуры полупроводниковых композиционных полимерных материалов на основе полиметилметакрилата методом ИК-спектроскопии..... 176
- Jalilov Sh.N., Karomatov S., Safarov A.R.** Mochevino-formaldegid smolasini kraxmal, melamin va PVX asosida modifikatsiyalab olingan yelimlovchi-bog'lovchilarning fizik-kimyoviy tahlil usullarini o'rganish..... 179

6. Проблемные обзоры

- Нормаматов А.М., Эркаев А.У., Эркаева Н.А., Шамаксудова Д.С. Бобокулов А.Н.** Сув тозалаш иншооти чўкиндисини комплекс қайта ишлаш 181
- Абед Н.С., Негматов С.С., Сергиенко В.П., Бухаров С.Н., Косимов Ш.Б., Туляганова В.С., Шамсиева С.С., Эшқобилов О.Х., Джабаров Б.Т.** Влияние электропроводящих и полупроводниковых наполнителей на электризацию полимерных покрытий при трении с хлопком-сырцом 185
- Mamirov A.M., Olimov L.O.** Granullangan kremniy nanozarralarini qarshilik vositasi bilan qizdirib biriktirish orqali kremniy sirtida metallokompozit omik kontaktlar hosil qilish muammolari va yechimlari 188
- To'xtayev S.A., Amonov M.R., Axmedov M.M.** Neft-gaz sanoatida qo'llanilgan kompressor moylarini sorbentlar asosida tozalash 191
- Рахимова М.Ш., Томилини Д.В.** Разработка коллекции женских жакетов сложных форм с учётом физико-механических свойств тканей 194
- Ахмедов Р.Т.** Композиционные материалы в создании функциональных и декоративных меховых изделий 199
- Ахмадалиев Ш.Ш.** Композицион материалларни деформациялашда кучланган-деформацияланган холат экспериментал тадқиқот усулларининг таҳлили 202
- Очилдиев К.Т., Мухаметджанова Ш.А., Маткаримов С.Т., Исмаилов Ж.Б., Нуралиев О.У., Акромов У.А., Чориев Х.И.** Механизм взаимодействия конвертерного шлака и клинкера при восстановлении оксидов металлов 204
- Ходжаева Д.Н., Рузиева Б.Ю., Негматов С.С., Абед Н.С.** Исследования состояния и анализ полимерных связующих применяемых в производстве древесно-пластиковых плитных материалов 206
- Rahmonova M.S., Eshqobilov O.X.** Lok-bo'yoq materiallar va ularning tarkibidagi to'ldiruvchilarni xossalriga ta'siri 209
- Дадаходжаев А.Т., Рахматов У.Н., Абдуллаева Д.К., Собитов О.С., Мусабаев Д.Т.** Ресурсоберегающая технология получения микроудобрения -гептагидрата сульфата цинка 211
- Юсупов А.А., Райимкулов С.Х., Сайфуллаев Ж.Ж.** Методы формовки труб большого диаметра и перспективы расширения производственных мощностей трубного производства Узбекистана 212
- Абдалимов Д.О., Тураходжаев Н.Дж., Чоршанбиев Ш.М., Таджиев Н.Х., Тўраев А.Н., Парпиев Р.А.** Бронза қотишмасидан заргарлик буюмларини куйиш усуллари, нуқсонлар ва уларни бартараф этиш 215
- Jalilov Sh.N., Karomatov S., Safarov A.R.** Mochevino-formaldegid smolasini kraxmal, PVX, EPXG va melamin asosida modifikatsiyalab olingan yelimlovchi bog'lovchi kompozitsiyaning TGA/DTA hamda SEM tahlilini o'rganish 218

7. Вести из лаборатории

- Косимова М.Н.** Опытнo-производственные испытания разработанных композиций при крашении хлопка-вискозных тканей 221
- Негматов С.С., Анварова З.А., Султанов С.У.** Разработка технологического процесса и режимов получения ненаполненных композиций из ацетат целлюлозных композиций 221
- Samadova L.Sh., Yakubov M.M., Yakubov O.M., Maksudxodjayeva M.S.** Mineral va texnogen xomashyoning qiyin boyitiluvchanligini eritish usuli orqali to'liq ochish imkoniyati 223