

ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ $\text{FeO}_x\text{-CaO-SiO}_2\text{-MgO-}$ Al_2O_3 В ПРОЦЕССАХ ОКУСКОВАНИЯ

В работе исследованы свойства расплава, образующегося в процессах окучкования железорудных материалов. В частности экспериментально определены температура плавления и угол контакта расплава с магнетитом. Используя различные модели, были вычислены поверхностное натяжение и вязкость расплавов. Рассмотрено влияние соотношения $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ и MgO/SiO_2 на свойства расплавов. Изучение свойств различных минеральных фаз, образование которых возможно при окучковании, может применяться для прогнозирования структуры связки и качества окучкованного железорудного сырья.

У роботі досліджено властивості розплаву, що утворюється в процесах окускування залізорудних матеріалів. Зокрема експериментально визначена температура плавлення і кут контакту розплаву з магнетитом. Використовуючи різні моделі, був обчислений поверхневий натяг і в'язкість розплавів. Розглянуто вплив співвідношення $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ і MgO/SiO_2 на властивості розплавів. Вивчення властивостей різних мінеральних фаз, утворення яких можливо при окускуванні, може застосовуватися для прогнозування структури зв'язки і якості окучкованої залізорудної сировини.

The addition of various mineral components such as dolomite and alumina in an iron ore changes the slag composition during the sintering and pellets burning processes and can improve the effectiveness and quality of these processes. In this investigation the properties of slags from sintering and pellets burning processes such as liquidus temperature and contact angle with Al_2O_3 -ceramic and magnetic iron ore were measured. The surface tension and viscosity of slags were calculated using a different models.

Постановка проблемы

Окончательное упрочнение в процессе спекания происходит с участием жидких фаз, источником которых являются твердофазные ферриты. По мере роста температуры обжига ферритный расплав ассимилирует первичный расплав шихты, кварц и остаточные включения флюса, в его состав переходит некоторое количество гематита преимущественно мелкой фракции. На стадии жидкофазного упрочнения увеличивается скорость диффузии компонентов, облегчается перемещение рудных частиц относительно друг друга. При достаточной смачиваемости кристаллов гематита расплавом проявляются капиллярные силы, приводящие к усадке.

Анализ публикаций по теме исследования

Тесный контакт на границах фаз оксидов с расплавом зависит от смачиваемости и вязкости, что в свою очередь зависит от состава расплава, при этом присутствие в окатышах оксидов магния и алюминия оказывает серьезное влияние на свойство расплава и как следствие итоговые качества окатышей. Изучение состава ферритных фаз в готовом железорудном сырье,

проведенное М.С. Моделем, В.Я. Лядовой и Н.В. Чугуновой [1], позволило для характеристики степени подготовленности аглошихты и шихты окатышей к процессам феррито- и силикатообразования предложено, помимо основности, использовать глиноземный Al_2O_3/SiO_2 и магнезиальный модуль MgO/SiO_2 в качестве оценочных характеристик реакционной способности шихты.

Формирование целей исследования

Изучение свойств различных минералов, образование которых возможно при окусковании, с учетом основности, глиноземного и магнезиального модулей может применяться для прогнозирования структуры связки и качества окускованного железорудного сырья на стадии подготовки его шихты. В этой работе были исследованы свойства расплава, образующегося в процессах окускования железорудных материалов. В частности экспериментально определены температура плавления и угол контакта расплава с магнетитом. Используя различные модели, были вычислены поверхностное натяжение и вязкость расплавов.

Основная часть

Экспериментальное исследование

Подготовка материалов. Химические составы исследованных смесей показаны в таблице 1. Для проведения экспериментов были подготовлены образцы в виде брикетов диаметром 3-5 мм и высотой 6-8 мм.

Методика исследования. Схематическая диаграмма экспериментального аппарата приведена на рисунке 1. Для исследования использовалась горизонтальная индукционная печь с генератором мощностью 15 кВт и частотой тока 0,4 - 0,7 МГц. Нагревательный элемент представлял собой трубку, состоящую из углерода с внутренним диаметром 40 мм. Чтобы обеспечить защитную газовую атмосферу применяли аргон. Температуру измеряли термопарой PtRh18.

Температура плавления была измерена согласно германскому стандарту DIN51730 (2006-09)/ISO540 (1995-03).

Углы контакта между расплавом и подложкой были определены по форме капли при температуре $T_{пл}+10K$, а также при температурах 1573, 1623 и 1673 К. В качестве подложки использовали полированную пластинку, изготовленную из магнетитовой руды. Подготовленные образцы укладывали на пластинку, которую по уровню устанавливали на держатель и вводили в печь. С открытого конца печи была установлена видеокамера. Образец нагревали до температуры плавления и производили запись.

Изображения были проанализированы, используя программу “Analysis” (модуль “IMES”) от Aquinto AG, рисунок 2.

Таблица 1

Химический состав исследуемых смесей

№	Содержание, %						Al ₂ O ₃ /SiO ₂	MgO/SiO ₂	Основность*
	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃			
13	35,81	16,11	25,18	14,86	2,81	5,24	0,35	0,19	1,69
14	35,99	16,19	25,37	14,57	4,51	3,37	0,23	0,31	1,74
15	45,43	20,44	14,42	13,29	3,31	3,11	0,23	0,25	1,09
16	41,81	18,81	20,48	14,68	2,01	2,21	0,15	0,14	1,4
17	41,81	18,81	19,16	13,47	2,01	4,75	0,35	0,15	1,42
18	35,99	16,20	24,73	16,14	4,51	2,43	0,15	0,28	1,53
19	35,99	16,20	23,27	14,81	4,51	5,22	0,35	0,30	1,57
20	41,81	18,81	21,06	13,25	2,01	3,07	0,23	0,15	1,59
21	35,81	16,11	26,64	16,19	2,81	2,44	0,15	0,17	1,65

* CaO/SiO₂

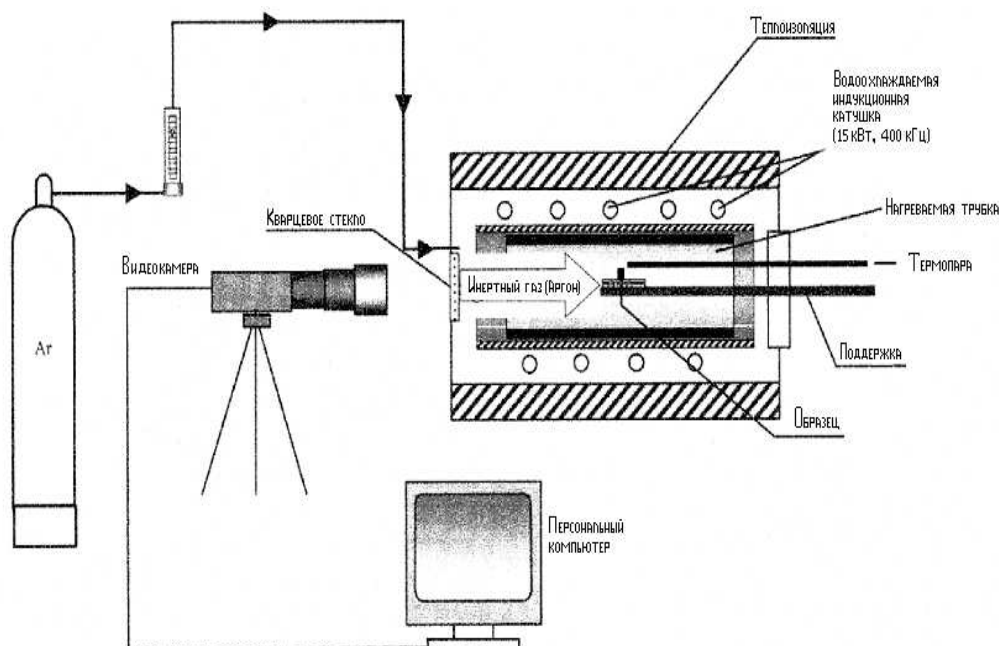


Рисунок 1 - Схематическая диаграмма экспериментальной установки

Результаты исследования

Температура плавления смесей. Результаты экспериментов по определению температуры плавления показаны в таблице 2.

Таблица 2

Температура плавления смеси

Номер образца	13	14	15	16	17	18	19	20	21
T _{пл} [К]	1623	1656	1763	1712	1679	1668	1728	1622	1576

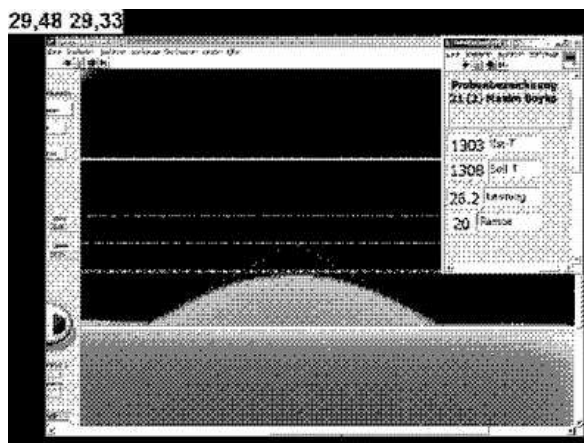


Рисунок 2 - Пример обработанного изображения

Угол контакта. Результаты исследования угла контакта расплава и магнетитовой подложки при температуре $t_{пл} + 10$ К показаны в таблице 3.

Таблица 3

Угол контакта при температуре $t_{пл} + 10$ К

Номер образца	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Угол контакта, °	23,70	24,61	21,83	17,61	35,76	19,20	27,51	37,85	26,80

На рисунке 3 показано изменение угла контакта при изменении при изменении отношения MgO/SiO_2 при различных отношениях Al_2O_3/SiO_2 .

Так же в ходе исследования были измерены углы контакта расплава и магнетитовой подложки при температурах 1300, 1350, 1400 °С. Результаты представлены в таблице 4.

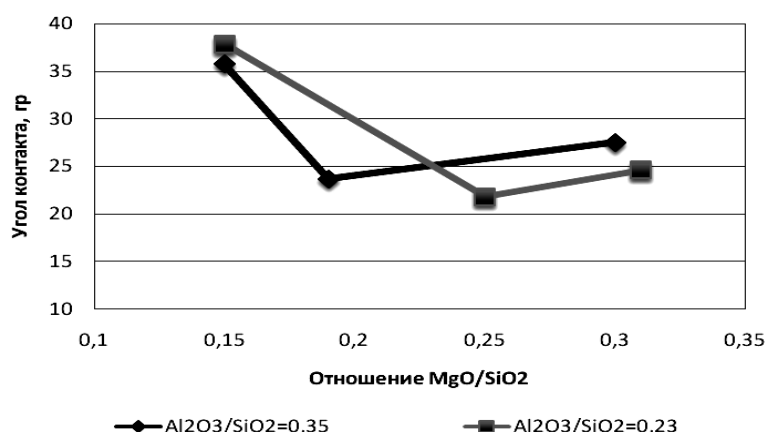


Рисунок 3 - Изменение угла контакта в зависимости от отношения MgO/SiO_2

Аналитические исследования

Поверхностное натяжение. В настоящей работе поверхностное натяжение для исследуемых расплавов было рассчитано с использованием моделей Сато, Дитцеля, Салманга и Джоуена [2, 3]. Результаты расчетов поверхностного натяжения при температуре 1723 К представлены в таблице 5.

Таблица 4

Угол контакта при различных температурах

Номер образца	Температура, К		
	1573	1623	1673
13	37,00	23,75	-
14	35,50	23,50	16,50
15	-	57,50	23,83
16	-	-	17,50
17	-	-	34,25
18	-	34,50	19,00
19	-	-	36,67
20	-	38,00	-
21	27,33	19,50	-

Таблица 5

Рассчитанное поверхностное напряжение при температуре 1723 К

Номер образца	Поверхностное натяжение, мН/м		
	Дитцель	Дитцель	Дитцель
13	459	459	459
14	465	465	465
15	469	469	469
16	464	464	464
17	462	462	462
18	465	465	465
19	462	462	462
20	465	465	465
21	461	461	461

На рисунке 4 показано изменение поверхностного натяжения при изменении основности, а на рисунке 5 – при изменении отношения MgO/SiO_2 при различных отношениях Al_2O_3/SiO_2 .

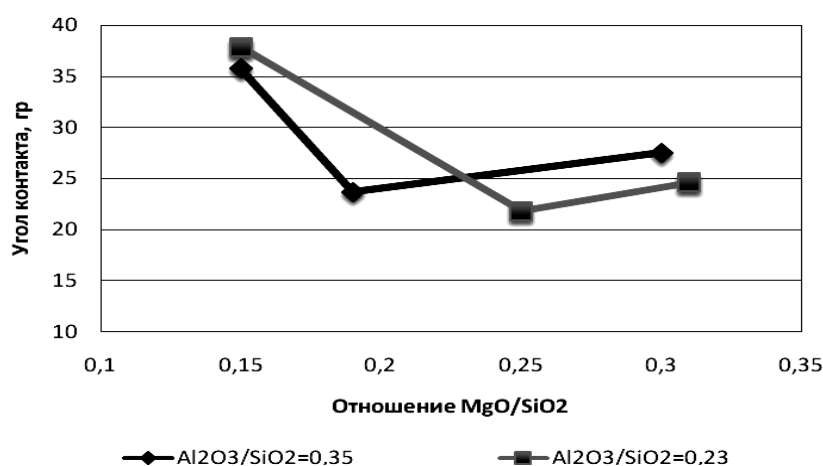


Рисунок 4 - Изменение поверхностного натяжения при изменении основности

Вязкость.. В данной работе вязкость расплавов была рассчитана, используя модели Рубойда и Урбана.

Для проверки моделей была рассчитана вязкость шлаков системы $Al_2O_3-FeO-CaO-SiO_2$, для составов, вязкость которых была определена экспериментально А.А. Гиммельфарбом и К.И. Котовым. [4]

Рассчитанная и определенная экспериментально вязкость, а также состав шлаков приведены в таблице 6. На рисунке 6 показано сравнение опытных результатов определения вязкости с данными, полученными по моделям.

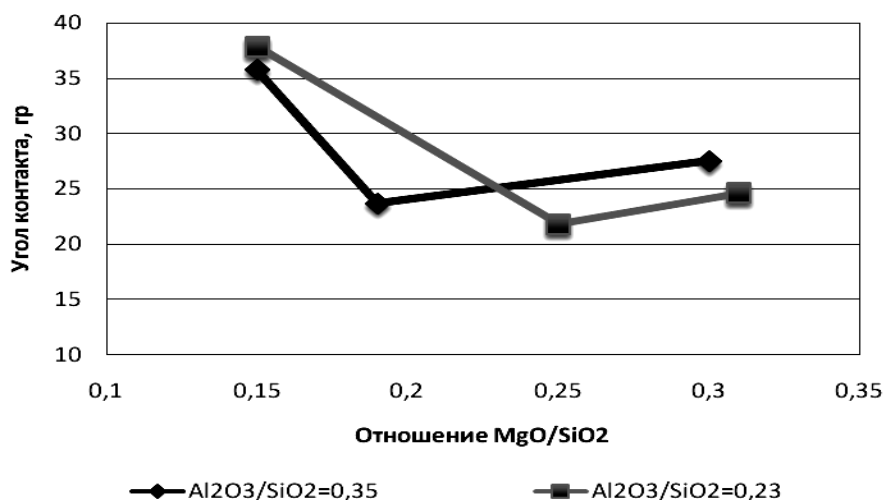


Рисунок 5 - Изменение поверхностного натяжения в зависимости от отношения MgO/SiO₂

Таблица 6

Расчетные и экспериментальные (из литературных источников) значения вязкости шлаков

№	Содержание, %				Основность*	Вязкость, Па*с		
	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	SiO ₂		Опыт	Рубойд	Урбан
1	5,7	16,6	30,9	46,8	0,66	0,8	1,176	0,469
2	5,2	19,8	28,6	46,9	0,61	0,9	1,033	0,373
3	5,4	21,7	41,5	31,4	1,33	0,2	0,281	0,063
4	5,5	24,9	36,3	33,3	1,09	0,05	0,319	0,077
5	6,6	20,0	27,1	36,9	1,00	0,05	0,730	0,329
6	6,1	22,7	27,9	43,3	0,64	0,45	0,799	0,312

* CaO/SiO₂

Вязкость и плотность, рассчитанные при температуре 1723 К по моделям Рубойда и Урбана для исследуемых расплавов представлены в таблице 7.

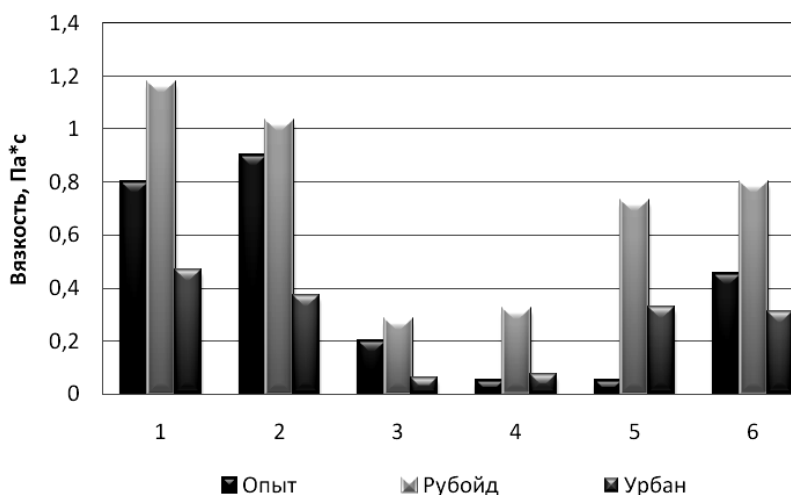


Рисунок 6 - Сравнение опытных данных с расчетными по моделям

Таблица 7

Вязкость и плотность при температуре 1723 КБ

Номер образца	Вязкость, Па*с		Плотность, кг/см ³
	Рубойд	Урбан	
13	1,113	1,100	3,921
14	1,155	0,800	3,229
15	0,835	0,600	3,431
16	0,988	0,579	3,337
17	0,921	0,797	3,336
18	1,18	0,736	3,219
19	1,099	1,067	3,226
20	0,97	0,602	3,345
21	1,194	0,700	3,213

На рисунке 7 показано изменение вязкости при изменении основности, а на рисунке 9 – при изменении отношения MgO/SiO_2 при различных отношениях Al_2O_3/SiO_2 .

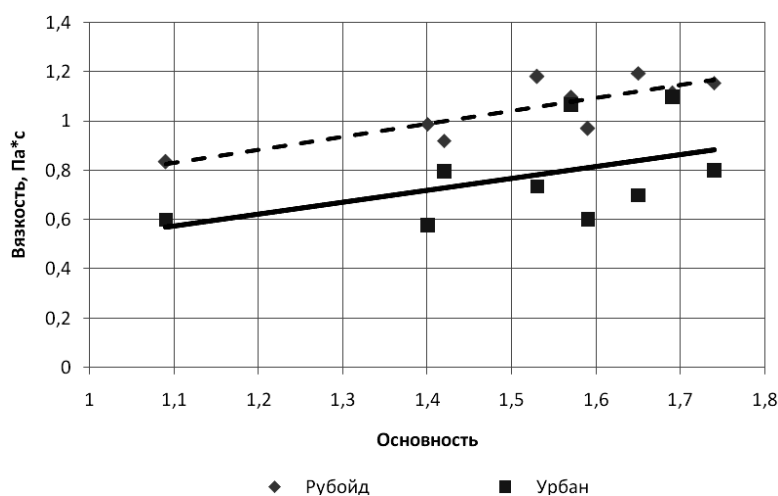


Рисунок 7 - Изменение вязкости при изменении основности

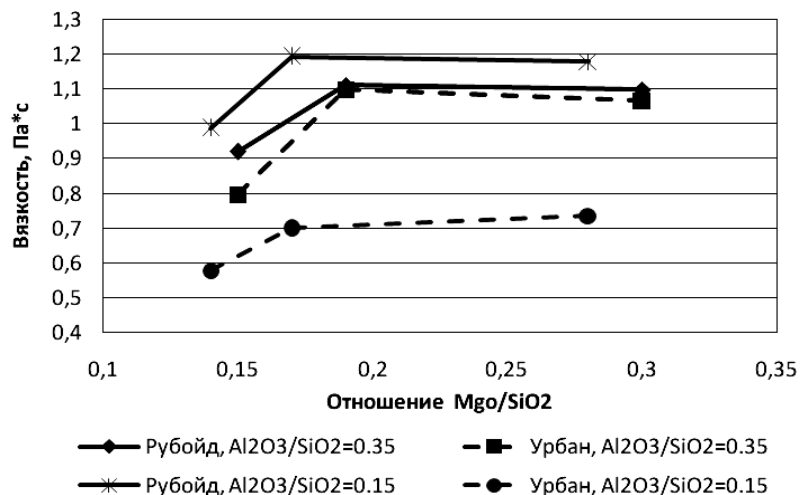


Рисунок 8 - Изменение вязкости в зависимости от отношения MgO/SiO₂

Анализ результатов исследования

При рассмотрении зависимости угла контакта от основности наблюдаются два пика, соответствующие основности 1,4 и 1,6. С увеличением отношения Al₂O₃/SiO₂ наблюдается некоторое увеличение угла контакта. Увеличении отношения MgO/SiO₂ 0,15 до 0,25 приводит к снижению угла контакта с 35 до 20 ° при отношении Al₂O₃/SiO₂ 0,23-0,35

По данным модели Сато наблюдается некоторое увеличение поверхностного натяжения расплаве с увеличением отношения Al₂O₃/SiO₂, а при изменении увеличении отношения MgO/SiO₂ поверхностное натяжение изменяется незначительно.

По данным модели Рубойда с увеличением основности расплава с 1,1 до 1,7 наблюдается повышение вязкости с 0,82 до 1,2 Па*с. С увеличением отношения Al₂O₃/SiO₂ наблюдается незначительное увеличение вязкости. Увеличение отношения MgO/SiO₂ с 0,14 до 0,2 приводит к увеличению вязкости с 0,9 до 1,2 Па*с. Это согласовывается с известными зависимостями [5], так при вводе 3-10 % Al₂O₃ в состав расплава его вязкость и характер ее изменения практически не изменяются. При вводе в состав расплаву основностью 1,2 - 3 % MgO расширяется интервал затвердевания расплава и уменьшается его кристаллизационная способность. Однако при дальнейшем увеличении содержания MgO в расплаве его кристаллизационная способность резко возрастает.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

В этой работе были исследованы свойства расплава, образующегося в процессах окускования железорудных материалов. В частности экспериментально определены температура плавления и угол контакта расплава с магнетитом. Используя различные модели были вычислены поверхностное натяжение и вязкость расплавов.

Рассмотрено влияние основности, а также глиноземного и магнезиального моделей (отношений Al₂O₃/SiO₂ и MgO/SiO₂) на свойства расплавов, образующихся в процессе спекания при агломерации и обжиге окатышей.

Изучение свойств различных минералов, образование которых возможно при окусковании, с учетом основности, глиноземного и магнезиального модулей может применяться для прогнозирования структуры связки и качества окускованного железорудного сырья. Полученные данные могут служить физико-химическим обеспечением для решения важной практической задачи — получению прочных связок в железорудном сырье путем формирования фазовых структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малышева Т.Я. Железорудное сырьё: упрочнение при термообработке.- М.: Наука, 1988.- 198 с.
2. Sato R. Powered mold additives for continuous casting characteristic properties of the instructions for the use of C-series teemix // *Steelmaking Proceedings, ISS-AIME Detroit*, 62 (1979), pp. 48-67.
3. Jouenne, C.A.: p. 147 in: Ivanov, O.: *Metallurgische Grundlagen zur Optimierung von Hochofenschlacken mit Bezug auf die Alkalikapazität*. Deutsche Dissertation, TU Bergakademie Freiberg 2003.
4. Гиммельфарб А.А., Котов К.И. Процессы восстановления и шлакообразования в доменных печах.- М.: Металлургия, 1982.- 328 с.