Федеральное агентство по образованию РФ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Томский политехнический университет

«Утверждаю»
Декан ХТФ_____В.М. Погребенков
«_____»_____2007 г.

Термогравиметрический метод анализа силикатных материалов

Методические указания к выполнению лабораторной и самостоятельной работы по курсам «Физикохимия твердого тела» и «Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов»для студентов направления подготовки бакалавров 240100 «Химическая технология и биотехнология» и специальности 240304 «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов» дневной и заочной формы обучения

Томск 2007

УДК 543.226:549

Термогравиметрический метод анализа силикатных материалов

Методические указания к выполнению лабораторной и самостоятельной работы по курсам «Физикохимия твердого тела» и «Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов»для студентов направления подготовки бакалавров 240100 «Химическая технология и биотехнология» и специальности 240304 «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов» дневной и заочной формы обучения

Томск: Изд. ТПУ, 2007.- 20 с.

Составители: д.т.н., профессор Хабас Т.А.
к.т.н., ассистент Кулинич Е.А.
к.т.н., инженер Егорова Е.Ю.

Рецензент: д.т.н., профессор Лотов В.А.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры технологии силикатов _____ 2007 г.

Зав. каф. ТС,
профессор, д.т.н. Верещагин В.И.

Председатель методической
Комиссии ХТФ, к.т.н., доцент Ушева Н.В.

1. Введение

Термический анализ (термография) применяется для изучения свойств вещества и процессов, протекающих в нем при нагревании и охлаждении по заданной программе; он проводится с помощью специальной аппаратуры, и основным его техническим результатом являются термические кривые – термограммы, которые зависят главным образом от химического состава и структуры исследуемого объекта.

Самым распространенным и основным методом термического анализа является дифференциально-термический анализ (ДТА), который позволяет выявить и исследовать фазовые превращения и химические реакции, протекающие в веществе при нагревании или охлаждении, по термическим эффектам, сопровождающим это изменения.

Наряду с ДТА широко применяется метод исследования вещества и процессов, происходящих в веществе при нагревании с изменением массы, который носит название термовесового или термогравиметрического анализа (ТГА).

Выделяют три вида термогравиметрии:

а) **Изотермическую**, или стационарную, когда масса образца измеряется на протяжении некоторого времени при постоянной температуре;

б) **Квазистатическую**, когда образец измеряется при каждой из ряда возрастающих температур до достижения постоянного значения массы;

в) **Динамическую**, когда температура среды, окружающей нагреваемый образец, изменяется по заданному закону (обычно с постоянной скоростью).

В настоящее время наибольшее распространение получила динамическая термогравиметрия.

Термогравиметрия (ТГ) находит широкое применение для анализа в металлургии, лакокрасочной промышленности, производстве керамических материалов, минералогии, органической и неорганической химии и пр. Можно перечислить лишь некоторые из многочисленных областей применения метода ТГ:

1. Термическое разложение органических, неорганических и полиминеральных веществ;
2. Реакции в твердой фазе;
3. Обжиг и прокаливание минералов;
4. Определение влажности, а так же летучих и зольных компонентов;
5. Исследование кинетики реакций.

2. Основы метода термогравиметрии

2.1. Процессы, протекающие с изменением массы

В основе термогравиметрии находится принцип, по которому при нагревании учитываются изменения, приводящие к уменьшению или увеличению массы изучаемого вещества.

Уменьшение массы вещества при нагревании возможно при протекании следующих процессов:

1. При **возгонке**, например:

$$I_2(\text{тв.}) \rightarrow I_2(\text{газ}).$$

2. При **испарении**, например, при удалении межпакетной воды из минералов монтмориллонитового и гидрослюдистого типа.

3. При **дегидратации**, например:

$$CaSo_4 \cdot 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O + 1{,}5H2O \text{ (при T=120°C).}$$

$$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O \rightarrow CaSO_4 + 0{,}5H_2O \text{ (при T=180°C).}$$

$$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O \rightarrow Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + 2H_2O \text{ (при T=550-600°C).}$$

4. При **диссоциации**, например:

$$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2 \text{ (при T=540-600°C).}$$

$$Al_2(SO_4)_3 \rightarrow Al_2O_3 + SO_3.$$

5. При **десорбции**, например, удаление воды и газов при нагревании цеолитов.

Увеличение массы вещества возможно при **адсорбции** газов, при **окислении и карбонизации** исследуемого вещества. Так, например, при нагревании куприта в интервале 300-900°С возможна следующая реакция:

$$2Cu_2O + O_2 \rightarrow 4CuO.$$

Теоретически, по расчету этой реакции, прибавка массы должна составлять 10,4 %.

До температуры 900°С возможна следующая реакция:

$$CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3.$$

Процесс окисления сульфидов и арсенидов в некоторых случаях складывается из нескольких стадий: 1) адсорбции молекулярного кислорода на поверхности; 2) окисления по схеме:

$$MeS + 2O_2 \rightarrow MeSO_4.$$

У большинства веществ при нагревании происходит несколько превращений, которые отражаются на термографической кривой при соответствующих температурах. Например при нагревании гидромагнезита $Mg(OH)_2 \cdot 4MgCO_3 \cdot 4H_2O$ в интервале 420-450°С происходит его дегидратация и разложение, при 505°С происходит образование $MgCO_3$ из $Mg(OH)_2$, который диссоциирует в интервале температур 550-600°С.

2.2 Простая и дифференциальная термогравиметрические кривые

Для получения термогравиметрических кривых определяется потеря в массе вещества в процессе нагревания до высоких температур.

Кривая зависимости потери массы от температуры вычерчивается в координатах абсцисса – температуры, ордината – потеря массы в граммах или процентах. Такая кривая называется простой или интегральной и показывается всю потерю массы от начала и до конца нагрева.

На рисунке 1 показаны характеристики кривой уменьшения массы в случае одностадийной реакции. Для любой одностадийной неизометрической реакции можно выбрать две характерные точки на ТГ кривой: а) начальную температуру разложения $T_н$, т.е. такую температуру, при которой суммарное

изменение массы достигает чувствительности термовесов; б) конечную температуру $T_к$, т.е. температуру, при которой суммарное изменение массы достигает максимального значения, соответствующего завершению реакции. Разность $T_к$-$T_н$ называется интервалом реакции.

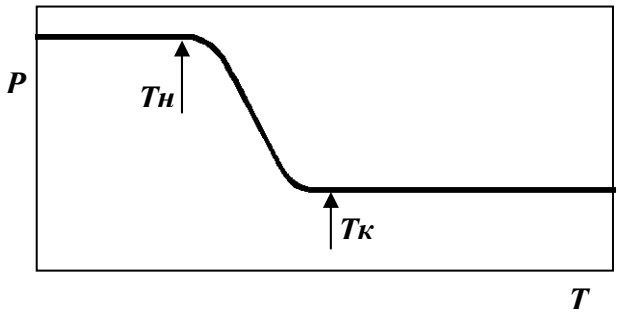

Рис. 1 – Характеристика ТГ кривой в случае одностадийной реакции

Количественные определения изменения массы производятся путем измерения расстояния между двумя точками на кривой в направлении от оси массы или между двумя горизонтальными уровнями массы.

При разработке различных методик качественного и количественного термического анализа очень часто возникают большие трудности в расшифровке простой кривой потери массы. Например, на простых термогравиметрических (ТГ) кривых часто не удается разделять стадии, непосредственно следующих друг за другом.

Значительное облегчение в количественной интерпретации простой кривой потери массы дает получение дифференциальной кривой потери массы. Внешний вид простой кривой потери массы, записанной в координатах масса образца (P) и температура (T), определяется уравнением P = f(T). Математически дифференциальная кривая потери массы является графическим выражением производной по температуре от функции изменения массы исследуемого вещества dP/dT = f′(P), т.е производной от P = f(T). Практически построение этой кривой может производиться путем графического дифференцирования на основании данных, полученных в

результате предварительной записи простой кривой потери массы изучаемого вещества (рисунок 2). Для этого на графике через определенные температурные интервалы проводят вертикальные линии и измеряют высоту соответствующих ординат Р (от оси абсцисс до точки на кривой). Разность между соседними значениями Р заносят в таблицу в виде показателя ΔР. По вычисленным значениям ΔР строят дифференциальную кривую потери массы в координатах абсцисса – Т, ордината - ΔР. Графическое построение дифференциальной кривой потери массы трудоемко и недостаточно точно. Поэтому для устранения указанных недостатков применяются специальные термовесы, дающие возможность записывать дифференциальную кривую потери массы.

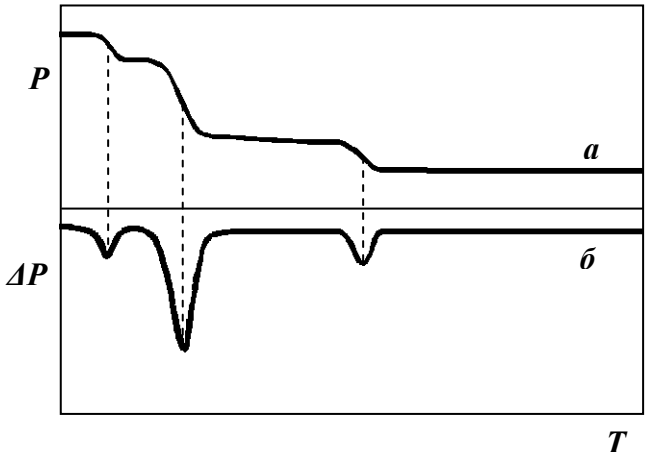

Рис. 2 – Простая и дифференцированная кривые потери массы
а – простая; б – дифференциальная, построенная по простой кривой

2.3 Аппаратура метода и получение термогравиметрических кривых

Для проведения термического анализа применяются пирометрические установки (термовесы), позволяющие непрерывно определять массу образца в зависимости от температуры.

Качество термограмм, прежде всего, зависит от приборов, с помощью которых они выполняются. Все термические установки состоят в основном

из печи или нагревательного устройства, тигля, измерителей температуры печи, регулятора, обеспечивающего нагрев по заданной программе, регистратора термических кривых (самописца).

Для нагрева печи наиболее широко используются элементы сопротивления (в виде проволоки или ленты), позволяющие получать заданную температуру: хромель-копель ~ 800 °С, нихром – 1000-1100 °С, хромель-алюмель – 1200 °С, платина – 1400 °С, платино-родиевая – 1500 °С, родий – 1800 °С, вольфрам 2800 °С.

Выбор измерителя температуры зависит от той температуры, которая необходима для исследования. Обычно используют тепмопары, элементы сопротивления.

Для высокотемпературных исследований применяют оптические пирометры.

В настоящее время промышленность серийно выпускает термические установки PYRIS Diamond TG/DTA, TGA/SDTA 851e, TGA-2000A, Принцип работы таких приборов основан на непрерывной регистрации зависимости изменения массы образца от времени или температуры при его нагревании в соответствии с выбранной температурной программой в заданной газовой атмосфере. Одновременно регистрируется выделение или поглощение тепла образцом, обусловленное фазовыми переходами или химическими реакциями.

Как и в любом другом методе измерений, в термогравиметрии существует много факторов, влияющих на характер, воспроизводимость и точность результатов эксперимента. Факторы, которые могут влиять на характер ТГ кривой можно разделить на две группы. Это факторы, связанные с измерительным прибором и факторы, связанные с характеристикой образца. К первым можно отнести скорость нагревания печи и скорость записи.

Многочисленные исследования показали, что ($T_к$-$T_н$) при быстром нагреве > ($T_к$-$T_н$) при медленном нагреве. Это значит, что для любого

заданного интервала температур степень разложения одного и того же образца при медленном нагревании больше чем при быстром.

Как при быстром, так и при медленном нагревании скорость записи кривых изменения массы может заметно влиять на форму кривых. Так, например, с увеличением скорости записи, кривая реакции медленного термического разложения становится более пологой. В том случае, когда за медленной реакцией следует быстрая, то при меньшей скорости записи они разделены менее четко.

Масса образца влияет на ход ТГ кривой:

1) вследствие отклонений измерения температуры образца от линейного закона при эндотермической или экзотермической реакции (чем больше масса образца, тем больше отклонение);

2) вследствие различий в скорости диффузии образующегося газа через пустоты между твердыми частицами;

3) вследствие существования больших градиентов температуры внутри образца, особенно если его теплопроводность низкая.

Источником ошибок являются также:

- выталкивающая сила воздуха. Плотность газовой фазы убывает с возрастанием температуры. Так, например, при температуре 300 °С эта плотность и, следовательно, выталкивающая сила, действующая на образец уменьшается примерно в 2 раза по сравнению с соответствующими величинами при 25 °С. В атмосфере воздуха это приводит к кажущемуся изменению массы на ~ 0,6 мг/см^3;
- конвективные потоки и турбулентность в печи. Возможное кажущееся уменьшение массы обусловлено давлением на образец направленного вверх потока воздуха, а «увеличение» массы возможно из-за турбулентности воздушной струи;
- случайные колебания записывающего устройства и весов;
- индукционность печи;

- влияние электростатических сил на весы;
- измерение температуры и калибровка;
- химическое взаимодействие образца с материалом контейнера.

Для повышения точности термогравиметрических данных необходимо вводить поправки для учета ошибок, или, по крайней мере, приблизительно определить их величину.

3. Анализ термогравиметрических кривых

3.1 Качественная оценка ТГ кривых

Качественный анализ ТГ кривых основан на двух принципах: принципе соответствия и принципе характеристичности.

Принцип соответствия заключается в том, что каждому изменению массы пробы в процессе нагревания (охлаждения) соответствует скачек на кривой ТГ.

Принцип характеристичности заключается в том, что температурный интервал и количество изменения массы для каждого вещества строго характерны.

Все вещества имеют индивидуальную термическую характеристику, которая отражает его поведение при нагревании (охлаждении), зависящее от состава, свойств, структуры, механизма и кинетики превращения.

Таким образом, по термограмме можно получить качественную характеристику исследуемого вещества.

Под качественным фазовым анализом подразумевается определение отдельного минерального вида или его разновидностей по термическим характеристикам. Качественный фазовый анализ основывается на том, что термические эффекты и характерные для них температуры остаются неизменными независимо от того, находится ли вещество в чистом виде или смеси с другими веществами, если только они не вступают между собою при

температурах анализа в химическую реакцию и не образуют твердых растворов.

Процесс ТГ анализа состоит в основном из двух этапов: 1) техническое выполнение анализа и запись термограммы; 2) расшифровка термограммы.

При анализе термограмму исследуемого вещества сравнивают с термограммами «стандартов» - чистых минералов (солей) и по характерным термическим эффектам определяют присутствие их в исследуемом материале. Термограммы «стандартов» приводятся в соответствующих справочниках.

Можно пользоваться также справочными таблицами, в которых для различных минералов указаны характерные термические эффекты, соответствующие им температурные интервалы, а также изменение веса.

Таким образом, при проведении качественного анализа, необходимо на полученной экспериментальной ТГ кривой (простой и дифференциальной) определить температуру начала и конца эффекта. По полученным данным по справочнику или по таблицам определяется природа исследуемого вещества. Например, если при проведении термогравиметрического анализа была получена ТГ кривая, на которой потеря веса соответствует трем температурным интервалам: 170 – 210; 400 – 450; 500 – 530 °С, то сравнение полученных данных с таблицей, указывает на то, что исследуемым веществом является гидрокарбонат магния.

Большие затруднения при проведении качественного анализа вызывает интерпретация термограмм веществ, имеющих сходные термические характеристики. Следует отметить, что для выявления качественного состава веществ используется не один какой-либо метод, а несколько. Так, термогравиметрия, как правило, применяется одновременно с методом ДТА.

3.2 Количественная оценка термогравиметрических кривых

По своей сущности термогравиметрия является количественным методом анализа, поскольку с её помощью можно точно определить изменение массы. Таким образом, с помощью термогравиметрических кривых можно определить количественный фазовый состав различных веществ.

Количественная оценка проводится после качественной идентификации исследуемого вещества. Значение состава исследуемого вещества позволяет провести количественной определение.

Так, например, если установлено, что исследуемое вещество глинистых минералов состоит из каолинита $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, то можно определить его количество в пробе.

Пусть по кривой ТГ установлено, что в интервале температур 550 – 600 °С потеря массы составляет 12 %. По литературным данным известно, что в этом интервале температур происходит дегидратация каолинита с потерей 13,9% массы.

Составив соотношение:

13,9% H_2O содержится в 100 % каолинита

12 % H_2O содержится в навеске, состоящей из *x* % каолинита определим содержание каолинита в глинистом минерале:

$$X = \frac{12 \times 100}{13{,}9} = 86{,}33$$

Следовательно, в исследуемой навеске находится 86,33 % каолинита.

Если в образце при нагревании (охлаждении) происходит реакция, сопровождающаяся незначительным имением массы, или реакции протекают в близких интервалах температур и отчасти перекрываются, одновременно с ТГ используются дифференциальные ТГ кривые, что позволяет точно установить изменение массы.

4. Методика выполнения анализа

4.1 Аппаратура

Схема лабораторной установки термогравиметрического анализа приведена на рисунке 3. Установка состоит из трубчатой электропечи (3), нагреватель которой изготовлен из нихромовой проволоки. Напряжение, подаваемое на обмотку печи, задается регулировочным трансформатором (7) и измеряется вольтметром (6). В рабочем пространстве печи располагается тигель (2) с навеской исследуемого вещества, подвешенный на коромысле весов (1). Температура в печи измеряется хромель-алюмелевой термопарой (4).

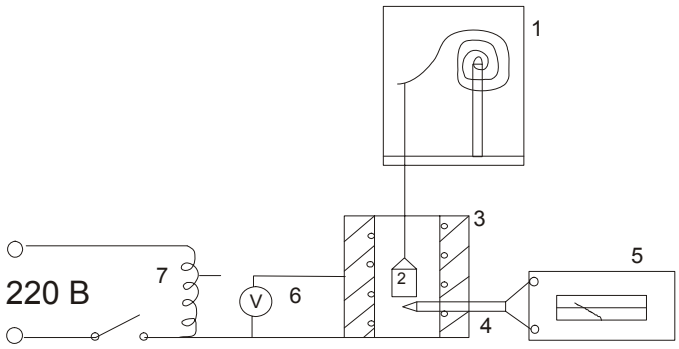

Рисунок 3 – Схема лабораторной установки ТГ анализа

4.2 Подготовка пробы и установки к работе

Изучив конструкцию установки и факторы, влияющие на точность ТГ кривой можно приступить к подготовке к работе. Для этого необходимо:

- получить у преподавателя пробу исследуемого вещества и записать в рабочую тетрадь результаты внешнего осмотра (цвет, агрегатное состояние и др.);

- подготовить пробу к анализу (растереть, просеять, если это необходимо);

- подвесить тигель на коромысло весов и взвесить его, затем взвесить тигель с навеской исследуемого вещества. Тигель должен находиться в печи

и не касаться её стенок. Вес навески и тигля должен быть немного меньше 1000 мг. Все операции кроме взвешивания производить на арретированных весах;

- закрыть крышку печи;
- подсоединить термопару к милливольтметру;
- для обеспечения заданной скорости нагрева, необходимо начертить в рабочей тетради график скорости нагрева (5-10 град/мин).

После проведения перечисленных выше операций, установка готова к работе.

4.3 Выполнение термического анализа

Установку включают в сеть (одновременно включают секундомер) и, поворачивая переключатель регулировочного трансформатора, добиваются нужной скорости нагрева, сравнивая на графике скорости нагрева полученные экспериментальные точки с линией нагрева. Начальное напряжение, подаваемое на печь ровно 18 В.

В ходе анализа фиксируют температуру нагрева по показаниям милливольтметра (переводят их в значение температуры с помощью соответствующих таблиц).

Через каждые 10 градусов фиксируют показания весов.

Результаты измерений заносят в таблицу:

Время (минут)	Показания милливольтметра (мВ)	Температура (°С)	Вес (мг)

На основании экспериментальных данных на миллиметровой бумаге вычерчивается график потери массы и строится дифференциальная ТГ кривая. По полученным ТГ кривым графически определяется температура начала и конца эффектов потери массы. По температурным интервалам

эффекта потери массы с помощью таблицы (см. приложение) определяется исследуемое вещество.

По ТГ кривой определяется величина потери массы для каждого эффекта и фазовый состав исследуемого вещества.

4.5. План отчета по лабораторной работе

Оформление отчета по лабораторной работе производится в соответствии с требовании, принятыми в Томском политехническом университете. Разделы отчета располагаются в следующем порядке:

- цель и краткие характеристики основы работы
- схема лабораторной установки и ее краткое описание
- методика выполнения работы
- результаты эксперимента
- обработка результатов эксперимента
- выводы

6. Контрольные вопросы.

1. Понятие метода термографического анализа.
2. Примеры термических реакций, сопровождающихся изменением массы.
3. Что такое простая и дифференциальная ТГ кривые?
4. Какие факторы влияют на ход ТГ кривой?
5. Принцип и проведение качественного и количественного термического анализа.
6. Методика термогравиметрического анализа.

Приложение 1

Термические эффекты некоторых минералов

Наименование минерала	Формула минерала	Температура эффекта, ºС	Природа эффекта
Кальцит	$CaCO_3$	(-) 860-920	Диссоциация (44 % CO_2)
Арагонит	$CaCO_3$	(-) 390-420 (-) 860-920	Полиморфное превращение в кальцит Диссоциация (44 % CO_2)
Магнезит	$MgCO_3$	(-)540-710	Диссоциация (52,2 % CO_2)
Гидрокарбонат магния	$MgCO_3 \cdot 3H_2O$	(-)170-210 (-)400-450 (-)500-530 (+)530-600	Дегидратация (потеря 2 H_2O) Дегидратация (потеря 1 H_2O) Диссоциация $MgCO_3$ Кристаллизация аморфного MgO
Доломит	$CaMg(CO_3)_2$	(-)730-790 (-)830-940	Распад доломита на $CaCO_3$ и $MgCO_3$ и диссоциация $MgCO_3$ (23,9 % CO_2) Диссоциация $CaCO_3$
Анкерит	$(Mg,Fe)CO_3 \cdot CaCO_3$	(-)730 (-)810-830	Диссоциация $MgCO_3$ Диссоциация $FeCO_3$ и образование $Fe_2O_3 \cdot CaCO_3$
Сидерит	$FeCO_3$	(-)350-585 (+)600 } (+)830 }	Диссоциация (38 % CO_2) Окисление FeO до Fe_2O_3
Родохрозит	$MnCO_3$	(-) 100-350 (-)425-600 (+)730-800 (-)950 (-)1175	Потеря адсорбционной воды Диссоциация $MnCO_3$ (38,4% CO_2) Окисление MnO Восстановление до Mn_3O_4 Инверсионное превращение Mn_3O_4 из тетрагональной в кубическую форму
Смитсонит	$ZnCO_3$	(-)425-550	Диссоциация $ZnCO_3$
Брусит	$Mg(OH)_2$	(-)405-450	Дегидратация (потеря 31% H_2O)
Гидроксид кальция (портландит)	$Ca(OH)_2$	(-)530-580	Дегидратация
Железистый	$(Mg,Fe)CO_2$	(-)500-590	Диссоциация

магнезит		(+)755	Окисление FeO до Fe_2O_3
Гидромагнезит	$MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 3H_2O$	(-)275-375 (+)510	Дегидратация $Mg(OH)_2$
Диаспор	β-AlO(OH)	(-)505-580	Дегидратация
Бёмит	α- AlO(OH)	(-)460-580	Дегидратация
Гиббсит	α- $AlO(OH)_3$	(-)250-300 (-)320-330 (+)950	Образование бёмита Превращение $\alpha \rightarrow \kappa Al_2O_3$ Полиморфное превращение
Байерит, гидраргиллит	$\beta\text{-}Al_2O_3 \cdot 3H_2O$	(-)250-300 (-)310-315 (-)500-550 (+)800	Дегидратация Дегидратация Разложение бёмита Переход $\gamma Al_2O_3 \rightarrow \theta Al_2O_3$
Диоксид кремния	SiO_2	(+)115-117 (+)155-163 (+)220-280 (-)573	Превращение тридимита $\alpha_1 \rightarrow \beta_1$ Превращение тридимита $\beta_1 \rightarrow \beta_2$ Превращение кристобалита $\alpha \rightarrow \beta$ Превращение кварца $\alpha \rightarrow \beta$
Двуводный гипс	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	(-)100-120 (-)220 (-)240 (+)380-420 (-)1180-1200	Потеря адсорбционной воды Потеря $0,5H_2O$ Потеря $0,5H_2O$ Инверсия $CaSO_4$ Полиморфное превращение
Ангидрит	$CaSO_4$	(-)1190	Полиморфное превращение
Полуводный гипс	$\alpha\text{-}CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$	(-)160 (-)240 (+)380	Дегидратация примеси (потеря 0,5 H_2O) Инверсия ангидрита
Эстрих-гипс	$CaSO_4 \cdot nCaO$	Не имеет никаких эффектов	
Каолинит	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	(-)550-610 (+)925-1000 (+)1200	Дегидратация Кристаллизация аморфных продуктов, образование муллита Образование кристобалита и α- Al_2O_3
Галлуазит	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$	(-)100-120 (-)450-500 (+)925-1000	Адсорбционная вода Дегидратация Кристаллизация аморфных продуктов
Монтмориллонит	$Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$	(-)150-175 (-)500-700 (-)800-900 (+)915-1000	Адсорбционная вода Дегидратация Дегидратация Кристаллизация аморфных продуктов
Мусковит	$K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	(-)125	Адсорбционная вода

		(-)450-650 (-)850-900	Дегидратация Разрушение решетки
Биотит	$K_2O \cdot 6(Mg,Fe)O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	(-)1000-1200	Разрушение решетки
Гидробиотит	$K_2O \cdot 6(Mg,Fe)O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot xH_2O$	(-)160-180 (-)220-250 (-)800-1000	Дегидратация Дегидратация Разрушение решетки
Вермикулит	Группа гидрослюд	(-)120-170 (-)270-300 (-)860	Дегидратация Дегидратация Разрушение решетки
Иллит	Группа гидрослюд	(-)120-150 (-)500-600 (-)900 (+)935	Адсорбционная вода Дегидратация Разрушение решетки Кристаллизация шпинели, периклаза
Боксит	Группа минералов	(-)285-300	Дегидратация гидраргиллита
Тальк	$3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$	(-)850-950	Дегидратация
Двухкальциевый силикат	γ-$2CaO \cdot SiO_2$	(-)780-830 (-)1447	Переход γ-$C_2S \rightarrow \alpha'$-C_2S Переход α'-$C_2S \rightarrow \alpha C_2S$
Трехкальциевый силикат	$3CaO \cdot SiO_2$	(-)920-925 (-)970-980 (-)990-1000	Полиморфное превращение То же То же
Алит	$54CaO \cdot 16SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot MgO$	(-)825 (-)1427	Полиморфное превращение То же
Гидросиликат натрия (жидкое стекло)	$Na_2O \cdot SiO_2 \cdot 6H_2O$	(-)63 (-)95 (-)170 (-)1083	Инконгруэнтное плавление Ступенчатая дегидратация Плавление безводной соли

Литература

1. Уэндланд У. Термические методы анализа. Перевод с английского, М.:1978.
2. Ю.М. Бутт, В.В. Тимашев. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 1973, 504 с.

Термогравиметрический метод анализа силикатных материалов

Методические указания к выполнению лабораторной и самостоятельной работы по курсам «Физикохимия твердого тела» и «Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов»для студентов направления подготовки бакалавров 240100 «Химическая технология и биотехнология» и специальности 240304 «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов» дневной и заочной формы обучения

Составители: д.т.н. Хабас Т.А.
к.т.н. Кулинич Е.А.
к.т.н. Егорова Е.Ю.