

## ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОФИЗИКИ СВЕРХТУГОПЛАВКИХ ВЕЩЕСТВ

М.А.Шейндлин

*Объединённый институт высоких температур РАН*

sheindlin@yandex.ru

В сообщении рассмотрены следующие вопросы:

1. Дана характеристика сверхтугоплавких материалов и указаны области их возможного применения
2. Обсуждаются вопросы плавления тугоплавких материалов, в частности, методы лазерного нагрева для изучения фазовых диаграмм
3. Приводятся примеры изучения плавления тугоплавких веществ и систем:
  - Диоксид урана
  - Система Zr-O
  - Окись кальция
  - Карбид циркония
4. Лазерное испарение при высоких температурах: определение состава пара методом времяпролетной масс-спектрометрии
  - Диоксид урана
  - Графит
5. Применение метода для определения малых примесей в оксиде алюминия

Вещества, имеющие температуру плавления, значительно превышающую 3000 К, часто принято называть сверхтугоплавкими. Как правило - это особо тугоплавкие соединения: карбиды, бориды, нитриды и др., ряда переходных металлов. Сверхтугоплавкие соединения могут, в основном, использоваться в виде керамических изделий (*UHTC* – Ultra High-Temperature Ceramics).

В настоящее время отмечается повышенный интерес к *UHTC*, которые могут обеспечить новый качественный скачок в аэрокосмической, атомной и других энергетических технологиях. Одним из возможных приложений является использование *UHTC* в теплонапряженных кромках крыла и носовых частях перспективных гиперзвуковых, М5 и более, летательных аппаратов. Цель: создание кромки крыла с радиусом порядка 1 см. Критериями выбора материалов здесь является высокая

температура плавления, стойкость к окислению, высокая теплопроводность, стойкость к термоудару и др.

В настоящее время разброс данных по температурам плавления ряда тугоплавких веществ, включая и широко применяемые оксиды, составляет сотни К. Существуют следующие проблемы изучения плавления УНТС:

- Высокие температуры плавления
- Взаимодействие с материалом держателя образца и газовой средой
- Отсутствие надежных данных по излучательной способности
- Проблема контроля стехиометрии в окрестности температуры плавления
- Исходный материал доступен, как правило, только в форме порошка или керамики
- Необходимость в изучении не только температуры плавления вещества стехиометрического состава но, в ряде случаев, и части фазовой диаграммы системы Me-(O, B, C, N): узкая зона гомогенности (бориды).

Определение температуры плавления с помощью лазерного нагрева заключается в фиксации температурной остановки – «плато кристаллизации» на кривой охлаждения.

Исследование плавления веществ с переменным составом требует определения кривых солидуса и ликвидуса. Переход через солидус и ликвидус сопровождается, как правило, смазанным тепловым эффектом, поэтому необходима разработка методов оптической диагностики процессов плавления и затвердевания неконгруэнтно плавящегося вещества.

Обсуждаются вопросы изучения состава пара тугоплавких материалов при температурах более 3000 К. Делается вывод о том, что такие исследования невозможно осуществить с использованием традиционной техники эксперимента. Достижение предельно высоких температур требует применения импульсного лазерного нагрева длительностью от 1 до 10 мс при диаметре пятна фокусировки менее 1 мм при плотности мощности до  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>.

Помимо измерения собственно состава пара масс-спектрометрическими методами необходимо высокоточное измерение температуры испаряющейся поверхности для получения термодинамически значимых данных по составу пара на кривой испарения или сублимации.

В сообщении приводятся примеры соответствующих исследований, выполняющихся в Отделе высокотемпературной теплофизики ОИВТ РАН.

В заключении сделаны следующие выводы:

- Современные технические средства позволяют провести комплексное изучение плавления и испарения *УНТС* а также некоторых теплофизических свойств, как в твердом, так и в жидком состоянии вплоть до температур, значительно превышающих 4000 К.
- Дальнейшее совершенствование методов исследования фазовых диаграмм, как бинарных систем, так и смешанных карбидов и боридов является основной задачей на пути к созданию новых сверхтугоплавких материалов.
- Развитие технологий по созданию высокоплотных однородных *УНТС* позволит в будущем использовать новые методы исследования и, в первую очередь, метод прямого нагрева током высокой плотности.