**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СИСТЕМЫ *Y-Ho***
Ивлиев А.Д., Куриченко А.А., Векшин И.М.

*ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», Россия, 620012, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.*

*E-mail: ad\_i@r66.ru*

**Введение**. Теплофизические свойства редкоземельных металлов (РЗМ) и их сплавов к настоящему времени изучены недостаточно. Особенно это касается высокотемпературной области, для которой имеются единичные экспериментальные данные о свойствах чистых металлов [1, 2], и остаются практически не изученными свойства сплавов. Вместе с тем, сведения о теплофизических свойствах РЗМ и их сплавов необходимы как для развития физики этих объектов, так и для успешного применения этих материалов в промышленности. В настоящей работе проведены исследования температуропроводности сплавов системы иттрий-гольмий (*Y-Ho*), при температурах примерно от 400 К до температуры, близкой к температуре плавления.

**Характеристика образцов**. Иттрий и гольмий обладают полной взаимной растворимостью. Предполагается, что фазовая диаграмма этих сплавов проста, и представляет собой набор прямых линий, соединяющих соответственные характерные температуры чистых компонентов [3]. Вместе с тем следует отметить, что относительно существования структурного фазового перехода в иттрии от гексагональной плотноупакованной решетки к объемно-центрированной кубической (ГПУ-ОЦК) в литературе имеются противоречивые данные (см. например, [3, 4]). Поэтому неясно, каково конкретное поведение свойств сплавов вблизи возможной точки перехода ГПУ-ОЦК в области больших концентраций иттрия. Возможно, что на процесс фазового перехода ГПУ-ОЦК в иттрии оказывают влияние примеси, количество которых в современных РЗМ еще велико.

Сплавы были выплавлены в электродуговой печи из исходных компонентов, полученных методом вакуумной дистилляции. Количество примесей в исходных компонентах менее 0,05 % по массе. Отклонение массы сплава от суммы масс компонентов не превышало 0,1 %. Образцы для проведения исследований температуропроводности вырезались электроэрозионным методом в форме плоских пластин с поперечным размером 12·12 мм2. Плоскопараллельность пластин затем обеспечивалась путем ручного шлифования. Неоднородность толщины обеспечивалась на уровне ± 2 мкм. Толщины образцов выбирались из интервала 0,8 – 2,6 мм (измерения толщины выполнялись на приборе ИЗВ-1).

**Метод измерения температуропроводности**. Температуропроводность сплавов исследовалась методом температурных волн [5]. Температурные волны возбуждались модулированным по амплитуде излучением лазера ЛГН-701 (ЛГ-43). Длина волны излучения 10,6 мкм, мощность 60 Вт. В качестве модулятора использовалось оригинальное электронно-механическое устройство [6], позволяющее изменять частоту модуляции в широких пределах и обеспечивать глубину модуляции 100 %.

Образец размещался в вакуумной камере, в которой после предварительного вакууммирования создавалась инертная атмосфера с использованием гелия, находящегося под избыточным давлением. Образец располагался в ячейке, изготовленной из изоляционного материала. Для предотвращения взаимодействия образца и ячейки использовались прокладки из тонкого листового молибдена. Наличие газовой среды предотвращало сублимацию образца при высоких температурах. Каждый образец перед измерениями предварительно отжигался в измерительной камере в течение двух часов при температуре 1500 К.

Температурная волна распространялась от первой плоской поверхности образца ко второй. Колебания температуры второй поверхности образца отставали по фазе от колебаний теплового потока, воздействующего на первую поверхность. По величине фазового запаздывания рассчитывалась температуропроводность [5]. Для оценки температуры второй поверхности образца применялись датчики: термопара диаметром 0,05 мкм, приваренная без спая [7] к центральной области второй поверхности образца и фотодатчик (фотодиод), анализирующий температуру этой же области. Термопара использовалась для оценки параметров колебаний температуры на низких частотах температурных волн [8], а также и для оценки средней температуры образца. Средняя температура образца изменялась при помощи печи электросопротивления.

Сигналы от датчиков через нормирующие линейные цепи [9] подавались на аналого-цифровой преобразователь, а затем поступали в компьютер. В компьютере производилась оценка фазы полезного сигнала и расчет температуропроводности. Погрешность измерения температуропроводности, оцененная теоретически и определенная практически с использованием образцовых материалов (нержавеющая сталь 12Х18Н10Т и молибден марки МЧВП), оказалась равна 2 % (среднее квадратичное значение).

**Результаты исследований**. Политермы сплавов системы *Y-Ho* при высоких температурах достаточно однотипны. В целом они имеют неубывающий характер. Иными словами, значение температуропровдности сплавов либо остается практически неизменным, либо слабо возрастает в рассматриваемом диапазоне температур. Следует отметить, что разброс данных, полученных в настоящих опытах для каждого образца превышает погрешность измерения примерно вдвое, что свидетельствует о нестабильности свойств сплавов при нагреве. В области высоких температур, соответствующих возможным температурам структурных фазовых переходов ГПУ-ОЦК наблюдаются слабые аномалии, точный вид которых определить точно не удалось. Эти слабые аномалии наблюдаются на политермах всех сплавов. Возможно, препятствием для детального изучения свойств вблизи ГПУ-ОЦК превращений являлась узость температурных интервалов существования ОЦК фаз (примерно, 40 К), вслед за которыми происходит плавление.

**Обсуждение полученных результатов**. На рис. 1 представлена концентрационная диаграмма температуропроводности *a* сплавов системы *Y-Ho*. Она соответствует низкотемпературному участку, и остается практически неизменной до самых высоких температур.

Рис. 1. Концентрационная зависимость температуропроводности

Наиболее заметное изменение температуропроводности наблюдается при малых концентрациях гольмия. В области, где концентрация гольмия велика, изменения температуропроводности сравнительно малы. Опыт показывает, что данная особенность носит электронную природу. Гольмий, как известно, относится к тяжелым РЗМ [10], т.е. к иттриевой группе, и следовательно, обладает электронной структурой подобной структуре иттрия. Можно ожидать, что в твердом растворе *Y-Ho* электронная структура существенно не изменится [10]. Снижение температуропроводности, таким образом, обусловлено сравнительно резким усилением рассеяния электронов при растворении в иттрии малых количеств гольмия.

Ион иттрия имеет вдвое меньшую массу по сравнению с ионом гольмия, поэтому он должен обладать за счет этого большим рассеивающим свойством [11]. Опыт показывает, однако, что этот фактор, за счет которого должна была бы резко снижаться проводимость сплавов при добавлении малых количеств иттрия к гольмию, не является существенным. Иными словами, гольмий для иттрия является более заметной примесью, чем иттрий для гольмия.

Можно предположить поэтому, что сравнительно сильное рассеяние, которое создает в сплавах ион гольмия, обусловлено его магнитными свойствами [10, 12]. Как известно, иттрий является паулевским парамагнетиком и его ион немагнитен, а ион гольмия обладает рекордным для РЗМ значением полного спинового числа, а потому и обладает значительным магнитным моментом [12, 13]. Это различие в их свойствах сохраняется во всем диапазоне температур. Таким образом из проведенного анализа следует, что возможной причиной, влияющей на свойства сплавов, является магнитное рассеяние электронов проводимости, происходящее на разупорядоченных ионах гольмия.

**Выводы**. Температуропроводность сплавов *Y-Ho* испытывает существенные изменения при малых концентрациях гольмия. Возможной причиной наблюдаемого явления может быть рассеяние носителей заряда на разупорядоченных ионах гольмия.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 11-08-00275 и № 14-08-00228)

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах.- М.: Металлургия, 1989. 384 с.

2. Ивлиев А.Д. Высокотемпературные теплофизические свойства твердых редкоземельных металлов /Дисс. … докт. физ. мат. наук. Екатеринбург: Уральский горный институт им. В.В. Вахрушева, 1991. 455 с.

3. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. /Под ред. Н. П. Лякишева. М: Машиностроение, 1997. Т. 2. 1024 с.

4. Тонков Е.Ю. Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении. – М.: «Наука», 1979. 192 с.

5. Ивлиев А.Д. Метод температурных волн в теплофизических исследованиях. //*Теплофизика высоких температур*, **47** (2009), № 5. С. 771-792.

# 6. Векшина О.А., Векшин И.М., Куриченко А.А., Ивлиев А.Д. Высокостабильный модулятор теплового излучения установки для измерения теплофизических характеристик материалов. // *Измерительная техника*, 2010, № 6. С. 42-45.

7. Кулаков М.В., Макаров В.И. Измерение температуры поверхности твердых тел. М.: Энергия, 1979. 96 с.

8. Филиппов Л.П. Измерение тепловых свойств твердых и жидких металлов при высоких температурах. М.: Изд-во МГУ, 1967. 325 с.

9. Векшин И.М., Векшина О.А.,. Куриченко А.А., Ивлиев А.Д. Усилитель сигнала от преобразователя колебаний температуры поверхности образца. // *Измерительная техника*, 2012, № 11. С. 26-28.

10. Никитин С.А. Магнитные свойства редкоземельных металлов и их сплавов. М.: Изд-во МГУ, 1989. 248 с.

11. Займан Дж. Электроны и фононы. М.: Издательство иностранной литературы, 1962. 488 с.

12. Белов К.П. Редкоземельные магнетики и их применение. М.: Наука, 1980. 240 с.

13. Уайт Р. Квантовая теория магнетизма. М.: Мир, 1985. 303 с.