

Исследование теплофизических свойств сплавов редкоземельных металлов лантан-неодим и лантан-празеодим в твёрдом состоянии в интервале температур 400 – 1100 К

В.В. Мешков, С.А. Гой, А.Д. Ивлиев

Представлены результаты исследования температуропроводности сплавов систем La-Pr и La-Nd в твёрдом состоянии при высоких температурах. Рассмотрена методика проведения исследований, использующая температурные волны. Сделан вывод о незначительности величины магнитного рассеяния носителей энергии в данных сплавах в рассмотренном диапазоне температур.

Ключевые слова: редкоземельные металлы и сплавы, температуропроводность, механизмы рассеяния.

1. Введение

Редкоземельные металлы и их сплавы находят всё большее применение в различных отраслях науки, техники и народном хозяйстве. Свойства редкоземельных металлов во многом необычны и мало изучены. Незначительно изучены и теплофизические характеристики этих веществ. В настоящей работе исследована температуропроводность некоторых сплавов систем лантан-празеодим (La-Pr) и лантан-неодим (La-Nd) в твёрдом состоянии при высоких температурах. Предварительные сведения о фазовых диаграммах этих сплавов представлены в справочнике [1]. Исследование свойств сплавов выполнено с использованием метода температурных волн, позволяющего проводить измерения с высокой точностью на образцах малых размеров.

2. Экспериментальная установка

Исследования выполнялись методом температурных волн с использованием радиационного нагрева [2 – 5]. Для создания температурной волны использовалось излучение непрерывного лазера, модулированное по амплитуде. Использование данного метода является перспективным, в связи с отсутствием инерционных элементов, например электрических нагревателей, благодаря чему создается возможность использования достаточно высоких значений частоты модуляции. Это позволяет применять образцы малой толщины, обладающие незначительными тепловыми потерями, что даёт возможность расширить температурный диапазон сверху и уменьшить расход материала на изготовление образца.

Структурно-функциональная схема экспериментальной установки, на которой проводились измерения, приведена на рис. 1.

Работа установки происходит следующим образом. Оптический квантовый генератор (лазер) типа ЛГН-701 (поз. 1) создает непрерывное излучение на длине волны 10.6 мкм (инфракрасное излучение) мощностью до 60 Вт. Излучение поступает в модулятор, состоящий из дискового обтюратора (поз. 2), приводимого в движение электродвигателем постоянного тока (поз. 8), включённым в систему регулирования и стабилизации частоты вращения электродвигателя (поз. 7). На выходе модулятора излучение превращается в поток импульсов, имеющий форму меандра. Скорость вращения диска обтюратора, а значит, и частота импульсов изменяются в диапазоне 5 – 60 Гц.

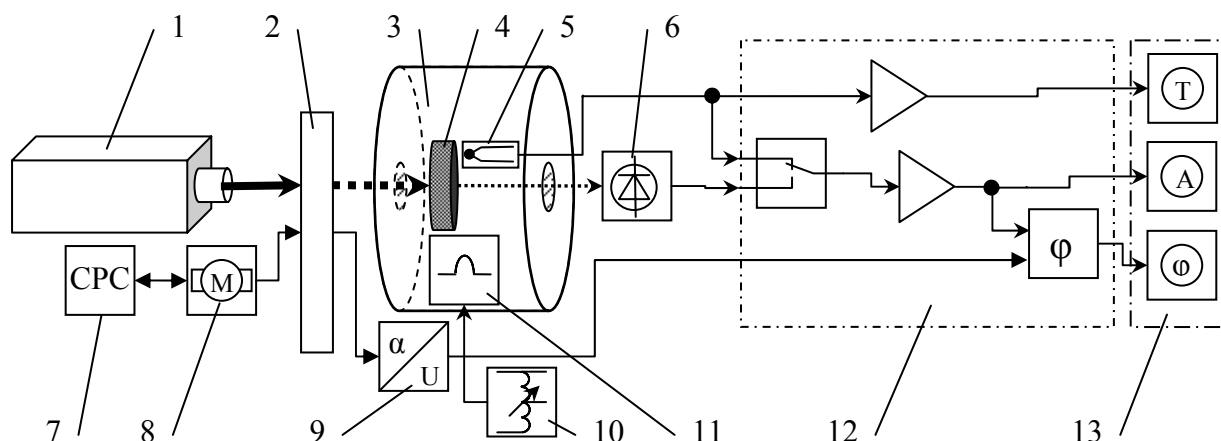


Рис. 1. Структурно-функциональная схема экспериментальной установки. 1 – квантовый генератор (лазер); 2 – дисковый обтюратор; 3 – вакуумная камера; 4 – ячейка с образцом; 5 – термопара; 6 – фотодиод; 7 – система регулирования и стабилизации частоты вращения; 8 – электродвигатель постоянного тока; 9 – формирователь опорного сигнала; 10 – автотрансформатор; 11 – нагревательный элемент; 12 – преобразовательная аппаратура; 13 – измерительная аппаратура

Модулированные импульсы излучения через вакуумный оптический ввод попадают в вакуумную камеру (поз. 3) и воздействуют на первую плоскую поверхность образца (поз. 4). Оптический ввод изготовлен из монокристалла хлорида калия, прозрачного в инфракрасной области. Образец расположен перпендикулярно плоскости чертежа. Вакуумная камера снабжена системой вакуумных насосов и подачи благородного газа, которые на рис. 1 не показаны. Вакуумными насосами создается разрежение до 10^{-5} Па. Гелий запускается с избыточным давлением 105 Па. Вакуумная камера снабжена нагревателем (поз. 11), который представляет собой электрическую печь сопротивления, позволяющую нагревать образец до температуры 2300 К. Регулирование температуры осуществляется вручную с помощью автотрансформатора (поз. 10).

Импульсы излучения лазера возбуждают в образце температурную волну, частота которой равна частоте следования импульсов. Волна, достигнув второй плоской поверхности образца, вызывает колебания её температуры. Колебания центральной области второй поверхности образца при помощи фотодатчика (поз. 6) или термопары (поз. 5) превращаются в электрический сигнал. Термопара типа ВР 5/20, используемая в качестве датчика колебаний температуры, изготавливается из проводников диаметром 50 мкм. Излучение второй поверхности образца попадает на фотодатчик через вакуумный оптический ввод, изготовленный из кварцевого стекла, которое не пропускает дальнейшее инфракрасное излучение и тем самым исключает помеховую засветку фотодиода излучением лазера. Электрический сигнал фотодатчика (или термопарного датчика) поступает в измерительную аппаратуру (поз. 12).

В процессе проведения эксперимента измеряется ещё и средняя температура образца посредством термопары (поз. 5).

Работа модулятора жёстко связана с формирователем опорного напряжения (поз. 9). Он создаёт синусоидальный электрический сигнал с частотой первой гармоники импульсов излучения (т. е. первой гармоники температурной волны). Фаза опорного напряжения несёт информацию о фазе теплового потока, воздействующего на первую поверхность образца.

Измерительная аппаратура обрабатывает сигнал датчика и опорное напряжение, благодаря чему создается информация об амплитуде электрического сигнала датчика и о сдвиге фазы этого сигнала по отношению к фазе колебаний теплового потока, воздействующего на образец. Данная информация служит основой для расчёта температуропроводности.

3. Характеристика образцов и результаты экспериментов

Исследуемые образцы вырезались из слитков, изготовленных из исходных материалов, прошедших очистку методом вакуумной дистилляции в ИМЕТ РАН. Образцы имели форму цилиндра высотой 0.5 – 1.2 мм.

Частота температурной волны в данной серии экспериментов варьировалась от 3 до 15 Гц в зависимости от толщины образца. В качестве датчиков, оценивающих колебания температуры поверхности образцов, использовались термопара ВР5/20 с электродами диаметром 50 мкм (для частот температурных волн менее 10 Гц) и фотодиод ФД-265. Термопара приваривалась к образцу без образования спая (каждый электрод по отдельности приваривался к центральной области поверхности образца на расстоянии 0.1 мм один от другого, термоэлектрическая цепь замыкалась через образец). Подобные термопары обладают большим быстродействием по сравнению с обычными [6].

В рассматриваемых веществах, как известно, протекают структурные фазовые переходы, поэтому результаты экспериментов для удобства были сгруппированы и рассмотрены по отдельности для областей температур, в которых протекают превращения, и областей температур, где структура вещества стабильна.

На рис. 2 (а-д) представлены результаты исследования температуропроводности в зависимости от температуры θ и частоты тепловой волны для сплавов La-Pr (цифровые данные зависимости температуропроводности от концентрации металлов в сплаве La-Pr приведены в табл. 1). Сведения о температуропроводности чистых La и Pr находятся в хорошем согласии с данными [7]. Аналогичные характеристики были получены для сплава La-Nd, (цифровые данные зависимости температуропроводности от концентрации металлов в сплавах La-Nd приведены в табл. 2). Температуропроводность чистого неодима в пределах погрешности согласуется с данными работы [8].

На рис. 3 показаны концентрационные зависимости температуропроводности системы La-Pr. На рис. 4 штриховыми линиями показана фазовая диаграмма сплавов La-Pr, приведённая в справочнике [1]. На этом рисунке сплошной линией показана концентрационная зависимость температуры начала перехода в ОЦК фазу, установленная экспериментально в настоящей работе.

Аналогично построены графики концентрационных зависимостей температуропроводности сплавов La-Nd (рис. 5). На рис. 6 показана фазовая диаграмма системы La-Nd, приведённая в справочнике [1] (штриховые линии). Сплошной линией показана уточнённая температура начала фазового перехода сплава La-Nd в ОЦК фазу, полученная в настоящей работе.

Вид концентрационных зависимостей (рис. 3, 5) в целом соответствует кривой Нордгейма [9]. Это свидетельствует о преобладающей роли примесного рассеяния носителей энергии в формировании концентрационной зависимости температуропроводности изученных веществ.

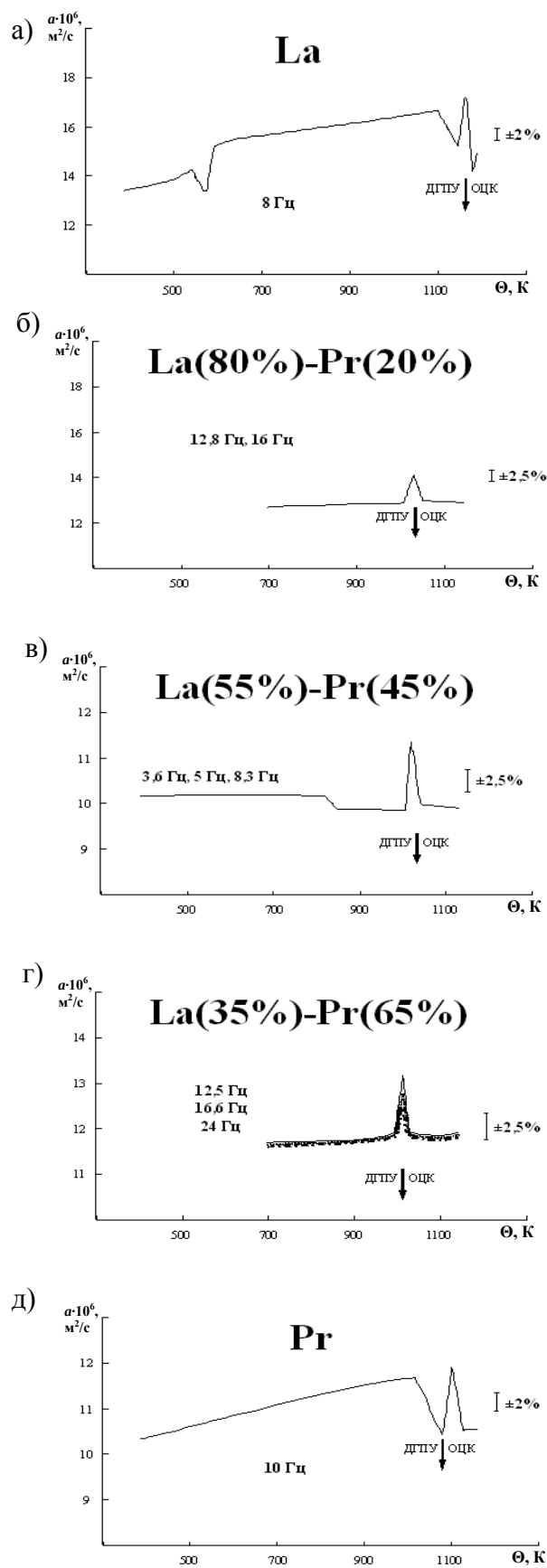


Рис. 2. Температурные зависимости температуропроводности сплавов La-Pr и чистых La и Pr от частоты температурной волны

Таблица 1. Зависимость температуропроводности сплавов La-Pr от температуры

Θ, K	Концентрация / $a \cdot 10^6, m^2/c$				
	La(100%)	La(80%)-Pr(20%)	La(55%)-Pr(45%)	La(35%)-Pr(65%)	Pr(100%)
400	12.6	12.4	10.1	—	10.2
500	13.2	12.6	10.2	—	10.6
600	14.8	12.6	10.2	11.5	10.9
700	15.4	12.7	10.2	11.6	11.1
800	16.0	12.7	10.1	11.6	11.3
900	16.5	12.8	9.8	11.7	11.4
1000	17.0	12.8	9.7	11.8	11.4
1100	17.0	12.9	10.0	11.8	11.2

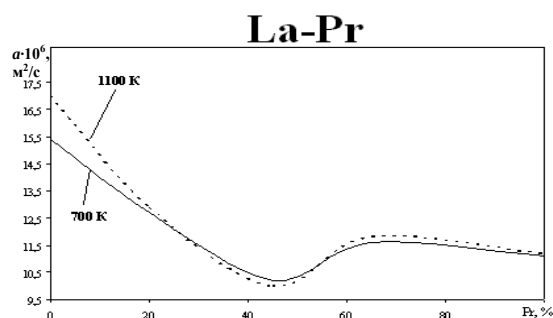


Рис. 3. Концентрационные зависимости температуропроводности для сплава La-Pr

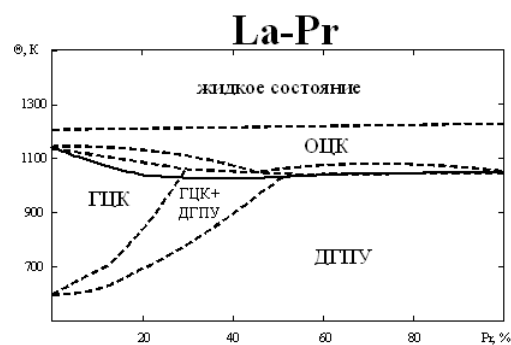


Рис.4. Диаграмма фазовых переходов сплава La-Pr

Таблица 2. Зависимость температуропроводности сплавов La-Nd от температуры

Θ, K	Концентрация / $a \cdot 10^6, m^2/c$				
	La(100%)	La(80%)-Nd(20%)	La(45%)-Nd(55%)	La(30%)-Nd(70%)	Nd(100%)
400	12.6	—	9.0	—	10.2
500	13.2	—	9.0	10.4	10.6
600	14.8	12.6	9.1	10.4	10.9
700	15.4	12.6	9.1	10.5	11.1
800	16.0	12.7	9.2	10.5	11.3
900	16.5	12.7	9.2	10.6	11.4
1000	17.0	12.8	9.2	10.6	11.4
1100	17.0	13.0	9.1	10.8	11.2

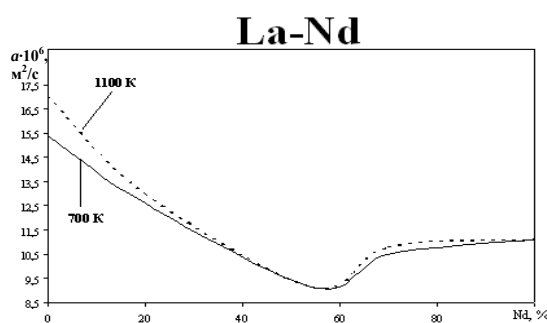


Рис. 5. Концентрационные зависимости температуропроводности для сплава La-Nd

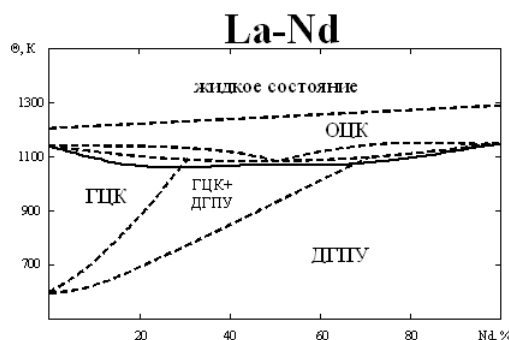


Рис.6. Диаграмма фазовых переходов сплава La-Nd

4. Выводы

В результате анализа данных экспериментов можно сделать следующие заключения:

- для областей температур изофазного состояния политермы температуропроводности представляют собой неубывающие зависимости, имеющие вид отрезков прямых линий;
- концентрационные зависимости для каждой группы сплавов в целом воспроизводят кривую Нордгейма;
- при структурных превращениях на политермах наблюдаются аномалии, характер которых для различных превращений качественно одинаков;
- температура начала превращения в ОЦК фазу оказывается несколько ниже справочных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 06-08-00088.

Литература

1. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник / Под ред. Н. П. Лякишева. М: Машиностроение, 1999. Т. 3, кн. 1. 872 с.
2. Ивлиев А. Д., Зиновьев В. Е. Измерение температуропроводности и теплоёмкости методом температурных волн с использованием излучения ОКГ и следящего амплитудно-фазового приёмника // Теплофизика высоких температур. 1980. Т. 18, № 3. С. 532 – 539.
3. Куриченко А. А., Ивлиев А. Д., Зиновьев В.Е. Экспериментальная установка для измерения температуропроводности и относительной теплоёмкости материалов в твёрдой фазе при высоких температурах. Деп. в ВИНТИ 19.02.85. № 7993-85 Деп. // Теплофизика высоких температур. 1986. Т. 24, № 2. С. 412.
4. Миклашевская Е. П., Сабиров Х. А. Экспериментальное исследование температуропроводности керамических материалов при температурах до 1500 К. // В кн.: Теплофизиче-

- ские свойства рабочих тел теплоносителей и конструкционных материалов современной энергетики. Межвузовский сборник трудов. № 72. М.: Издание МЭИ. 1985. С. 76 – 83.
5. Морилов В. В., Ивлиев А. Д., Теплоёмкость гадолиния в окрестности температуры ГПУ-ОЦК превращения. Измерение методом температурных волн. // Теплофизика высоких температур. 1995. Т. 33, вып. 3. С. 367 – 372.
 6. Кулаков М. В., Макаров Б. И. Измерение температуры поверхности твердых тел. М.: Энергия, 1979. 96 с.
 7. Куриченко А.А., Ивлиев А.Д., Зиновьев В.Е. Исследование теплофизических свойств редкоземельных металлов с использованием модулированного лазерного нагрева // Теплофизика высоких температур. 1986. Т. 24, вып. 3. С. 493 – 499.
 8. Kurichenko A.A., Ivliev A.D., Zinov'ev V.E. Thermal and kinetic properties of light rare-earth metals near high temperatures structural transition points // Solid State Communication. 1985. V. 56, № 12. P. 1065 – 1068.
 9. Займан Дж. Электроны и фононы. М: ИЛ, 1962. 488 с.

Статья поступила в редакцию 08.06.2009

Мешков Владислав Витальевич

старший преподаватель кафедры микропроцессорной управляющей вычислительной техники ГОУ ВПО Российского государственного профессионально-педагогического университета (620012, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)
тел. (343) 3-342-465, e-mail: Meshkov@rsvpu.ru

Гой Сергей Александрович

аспирант кафедры общей физики ГОУ ВПО Российского государственного профессионально-педагогического университета (620012, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)
тел. (343) 3-384-405, e-mail: goy@list.ru

Ивлиев Андрей Дмитриевич

доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры общей физики ГОУ ВПО Российского государственного профессионально-педагогического университета (620012, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)
тел. (343) 3-384-405, e-mail: ad_i@r66.ru

Research of thermal physical properties of alloys of rare-earth metals La-Nd and La-Pr in a solid state at high temperatures

V.V. Meshkov, S.A. Goi, A.D. Ivliyev

The results of research thermal diffusivity of alloys of systems La-Pr and La-Nd in a solid state at high temperatures are submitted. The technique of realization of researches using a temperature wave is considered. The conclusion about insignificance of size of magnetic scatterings of carriers of energy in the given alloys in the considered range of temperatures is made.

Keywords: rare-earth metals and alloys, thermal diffusivity, mechanisms of scatterings.