

03

Исследование теплового излучения элементов подгруппы титана с учетом фазовых переходов

© Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев, В.А. Аляев

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
420015 Казань, Республика Татарстан, Россия
e-mail: Dmi-kosenkov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 18 января 2021 г.

В окончательной редакции 2 февраля 2021 г.

Принято к публикации 25 февраля 2021 г.

Проведено экспериментальное измерение излучательной способности элементов четвертой группы (титан, цирконий, олово и свинец) периодической системы Д.И. Менделеева абсолютным радиационным способом в атмосфере инертного газа или в вакууме. Измерения проведены на экспериментальном стенде собственной конструкции и разработки. Исследованы температурные зависимости нормальной интегральной степени черноты в твердой и жидкой фазах состояния веществ. Температуры ограничивались упругостью паров нагреваемых веществ до предельного состояния кипения элементов.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, степень черноты, фазовый переход, периодическая система.

DOI: 10.21883/JTF.2021.07.50949.9-21

Знания радиационных характеристик, применяемых конструкционных материалов, позволяют проводить теплотехнические расчеты лучистого теплообмена при проектировании теплонагруженного оборудования и установок.

К настоящему времени экспериментальное определение теплового излучения металлов проведено для ограниченного ряда элементов, в связи с большой трудностью исследования и различными ограничениями в проведении эксперимента.

В настоящей работе приведены экспериментально полученные температурные зависимости степеней черноты чистых металлов IV группы периодической системы от температуры. Авторами были исследованы степени черноты таких веществ, как титан, олово, цирконий и свинец в зависимости от температуры.

На основании обзора существующих методов экспериментального определения степени черноты веществ был выбран абсолютный радиационный метод исследования. Спроектирован и создан экспериментальный стенд для измерения нормальных интегральных степеней черноты твердых и жидких металлов, сплавов и элементов периодической системы. Экспериментальная установка размещена в научно-исследовательской лаборатории на базе кафедры „Вакуумная техника электрофизических установок“ Казанского национального исследовательского технологического университета.

Экспериментальный стенд позволяет проводить исследование веществ и металлов как в вакууме, так и в атмосфере инертного газа до предельных температур кипения вещества и работоспособности резистивного нагревателя танталовой ленты.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением аттестованных измерительных средств

с оценкой их погрешности и устойчивой воспроизводимостью результатов опытов при проведении экспериментальных исследований.

По существующей методике ГОСТ Р 8.736-2011 авторами произведена оценка погрешности эксперимента, состоящей из систематической и случайной ошибок. Максимальная относительная погрешность по оценке авторов составляла $\pm 2\%$. С учетом градуировки применяемой вольфрам-рениевой термопары в температурном интервале от 1500 до 3000 К, максимальная погрешность опыта была оценена от 5 до 8% в зависимости от температуры. С увеличением температуры эксперимента погрешность опыта уменьшается.

Все исследованные материалы имели химическую чистоту с содержанием основного элемента не хуже 99.999%.

В настоящей работе многократно тестировалось воспроизведение показаний степеней черноты с результатами по предыдущим измерениям, в качестве образцовых значений использовалась излучательная способность титана и олова [1–5].

По результатам измерений был сделан однозначный вывод, что температурные зависимости степеней черноты титана и олова, полученные авторами (рис. 1, 2), имеют согласие с литературными данными в пределах погрешности эксперимента.

Исследование степени черноты титана проводилось авторами по существующей методике [5].

Титан, как элемент этой группы, показывает уверенный рост излучательной способности от температуры с характерными пиками фазовых переходов как в твердой фазе, так и при температуре плавления.

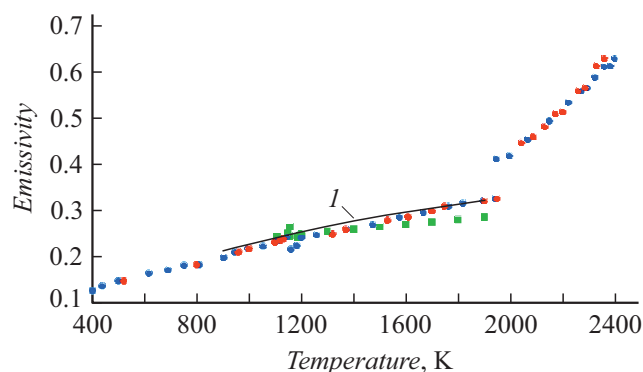


Рис. 1. Температурная зависимость степени черноты титана: *I* — [1]; квадраты — [3]; ● (голубого цвета в online версии) — [4]; ● (красного цвета в online версии) — измерения авторов настоящей работы.

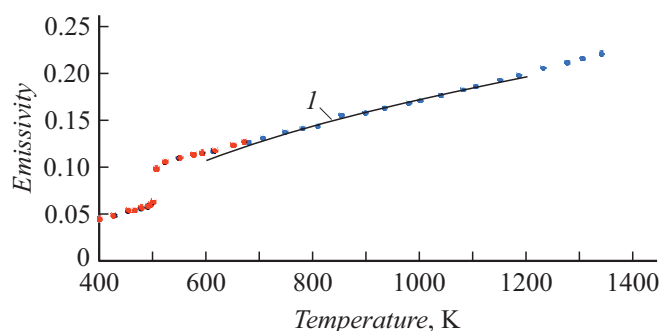


Рис. 2. Температурная зависимость степени черноты олова: линия *I* — [10]; ● (голубого цвета в online версии) — [4]; ● (красного цвета в online версии) — измерения авторов настоящей работы.

Рост степени черноты титана составляет порядка 27% от твердой фазы и полностью зависит от характера разупорядочивания кристаллической решетки этого металла.

Олово (рис. 2) показывает монотонный уверенный рост излучательной способности от температуры. Фазовый переход твердое тело–жидкость дает положительный скачок роста степени черноты 65%.

При исследовании циркония авторами была впервые получена температурная зависимость излучения циркония на существующем экспериментальном стенде (рис. 3). Литературные значения степени черноты циркония хорошо сопоставляются только лишь в твердой фазе. Данные работы [6], по мнению авторов настоящей работы, являются завышенными, что может быть связано с химической чистотой исследуемого металла.

Поведение излучательной способности циркония хорошо согласуется с разрывом ковалентных связей металла при плавлении и описывается конфигурацией атомов кристаллической решетки.

Авторами зафиксирован скачок изменения степени черноты циркония на 20% при фазовом переходе твердое тело–жидкость.

Прослеживается аналогичная последовательность положительного изменения степени черноты, характерная для металлов IV группы периодической системы. Увеличение металлизации свойств элемента также соответствует его расположению в периодической таблице Д.И. Менделеева.

Степени черноты кристаллического свинца были измерены авторами в температурном диапазоне от 400 К (рис. 4), что является продолжением роста степени черноты свинца, показанного в работе [7]. Так как авторами не была получена оптически гладкая поверхность образца, полученные значения степени черноты, согласно теории [8,9], могут являться завышенными.

Рост степени черноты твердой фазы и бросок излучения при фазовом переходе твердое тело–жидкость был оценен авторами величиной 80%. Уверенный рост степени черноты в жидкой фазе согласуется с результатами работы [10].

По результатам приведенных экспериментальных исследований вышеперечисленных металлов было подтверждено наличие постоянного скачка интегральной нормальной степени черноты при плавлении металлов и дальнейшего роста степени черноты с увеличением температуры. Также сделан вывод, что величина скачка излучательной способности при фазовом переходе твердое

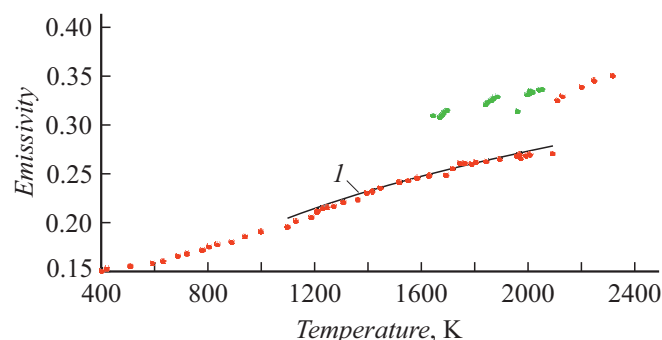


Рис. 3. Температурная зависимость степени черноты циркония: линия *I* — [1]; ● (зеленого цвета в online версии) — [6]; ● (красного цвета в online версии) — измерения авторов настоящей работы.

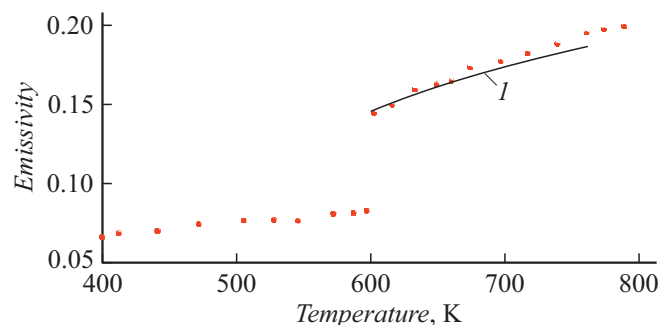


Рис. 4. Температурная зависимость степени черноты свинца: *I* — [10]; ● (красного цвета в online версии) — измерения авторов настоящей работы.

тело–жидкость зависит от соответствующего положения элемента в периодической таблице Д.И. Менделеева.

Понимание природы плавления металлов свидетельствует о том, что она не может быть отождествлена лишь с мерой разупорядочивания кристаллической решетки в смысле изменения конфигурации расположения атомов и колебательного спектра металла.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Излучательные свойства твердых металлов*. Справочник. Под общ. ред. А.Е. Шейндлина. (Энергия, М., 1974)
- [2] В.В. Сагадеев, В.А. Аляев. *Излучательная способность жидких металлов и сплавов*: монография (Изд-во КНИТУ, Казань, 2018)
- [3] Б.А. Шур, В.Э. Пелецкий. *Интегральная полусферическая излучательная способность титана в диапазоне температур 1100–1900 К*. Рекомендованные справочные данные № 56-83.1983.
- [4] К.Б. Панфилович, П.И. Бударин, В.В. Сагадеев, В.А. Глинкин. ИФЖ, **68**, (2), 271 (1995).
- [5] К.Б. Панфилович, В.В. Сагадеев, И.Л. Голубева. ТВТ, **42** (5), 718 (2004).
- [6] A. Cezairliyan, F. Righini. J. Res. National Bureau Standards. A. Phys. Chem. **78** (4), 509 (1974).
- [7] Л.А. Новицкий, Б.М. Степанов. *Оптические свойства материалов при низких температурах* (Машиностроение, М., 1980)
- [8] R. Siegel, J.R. Howell. *Thermal Radiation Heat Transfer* (Taylor & Francis, N. Y., 2002)
- [9] А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Ръжков. *Теплообмен излучением*: справочник (Энергоатомиздат, М., 1991)
- [10] К.Б. Панфилович. *Тепловое излучение и поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов*: монография (Изд-во Казан. гос. тех. ун-та, Казань, 2009)