

03

## Результаты измерения относительной излучательной способности ряда металлов подгруппы меди при температурах перехода через точку плавления

© Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев

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

Поступило в Редакцию 8 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 26 июня 2021 г.

Принято к публикации 1 июля 2021 г.

Абсолютным радиационным методом измерены нормальные интегральные степени черноты меди, серебра и золота в диапазоне температур, включая фазовый переход твердое тело—жидкость. Погрешность измерений составила от 5 до 8%.

**Ключевые слова:** экспериментальная ячейка, тепловое излучение, фазовый переход, исследуемый металл.

DOI: 10.21883/JTF.2021.12.51755.103-21

### Введение

Знание теплового излучения, его взаимосвязь со строением необходимо для разработки и проектирования многих технологических процессов, проведения теплотехнических расчетов в металлургической промышленности. Так же эти сведения актуальны и важны для контроля температур расплавов в радиационной бесконтактной пирометрии, в частности, в области технологий плазменной и лазерной наплавки, где бесконтактные методы пирометрии являются единственным способом контроля температуры. Кроме того, тепловое излучение металлов несет ценную информацию о строении и их поведении [1–5].

Количественные расчеты теплообмена излучением невозможны без знания радиационных характеристик конструкционных материалов, в твердом и жидком состоянии. Потребность в таких данных возрастает в связи с тем, что интенсификация технологических процессов осуществляется за счет повышения рабочих параметров — температуры и давления. Несмотря на большие успехи, достигнутые в исследовании радиационных свойств веществ [6], методика их расчетов для твердых тел далека от совершенства.

Современные теоретические методы нахождения радиационных свойств веществ, получившие широкое распространение в последнее время, имеют достаточно хорошее согласование с экспериментальными данными [7]. Однако наиболее надежным источником знаний о радиационных свойствах твердых и жидких металлов, включая фазовый переход, является эксперимент.

В настоящей работе представлено экспериментальное определение при температурах перехода через точку плавления степеней черноты химических элементов XI группы периодической таблицы — подгруппа меди. Ав-

торами настоящей работы на разработанном стенде были исследованы медь (Cu), серебро (Ag) и золото (Au).

В экспериментах применялся абсолютный радиационный метод измерения степени черноты. Был использован радиометр с диафрагмами, определяющими телесный угол видения. Измерения металлов проводились в твердой и жидкой фазах, в атмосфере инертных газов или вакууме.

Основными элементами экспериментальной ячейки являются радиометр, резистивный нагреватель с исследуемым веществом и модель абсолютно черного тела (АЧТ) (рис. 1).

Подробное описание экспериментальной установки, ячейки, градировочных замеров и методика проведения эксперимента были изложены в [8].

Оценка погрешности эксперимента была проведена по существующей методике, включающая в себя расчет допускаемой основной погрешности при измерении термоЭДС для двух крайних случаев (400 и 2000 К). Статистика кратна десяти замерам для каждого случая. При этом абсолютная систематическая ошибка составила 0.3%. Суммарная относительная погрешность измерений по опыту составила 5%. Таким образом, максимальная погрешность измерения составляла от  $\pm 5\%$  (2000 К) до  $\pm 8\%$  (400 К).

Надежность работы экспериментальной установки проверена сопоставлением полученных степеней черноты металлов с имеющимися в литературе как в твердой, так и в жидкой фазах.

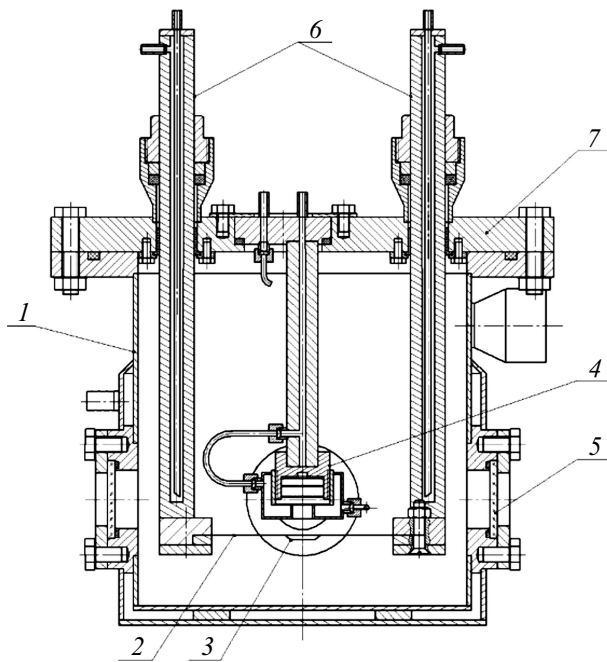
### 1. Результаты экспериментальных исследований

Степени черноты меди (рис. 2) хорошо согласуются с имеющимися измерениями [1,6,8,9] в твердом и жидком состояниях. Отклонение от рекомендованных значений

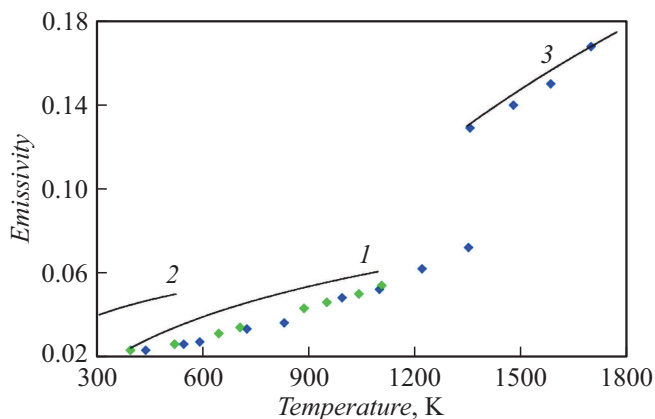
справочника [1] могут быть объяснены химической чистотой исследуемого металла. При плавлении меди величина скачка излучательной способности составляет порядка 80%.

Величина скачка излучательной способности фазового перехода авторами рассчитывалась по отношению к твердой фазе.

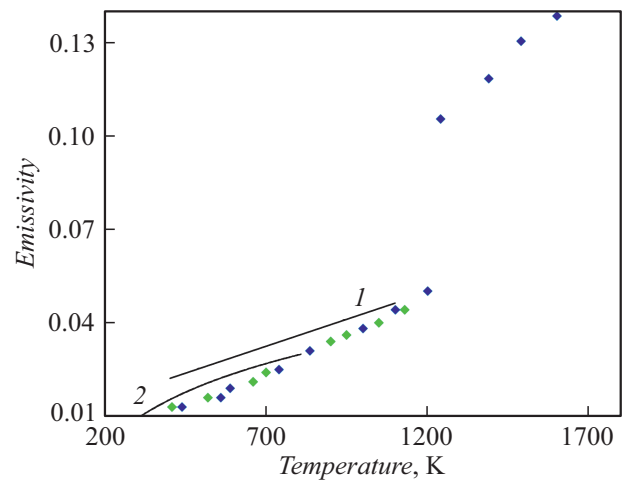
Степени черноты серебра (рис. 3) согласуются с имеющимися измерениями в твердом состоянии [1]. Наш эксперимент показал, что излучение серебра монотонно увеличивается с ростом температуры и при фазовом переходе (твердое тело—жидкость) скачкообразно воз-



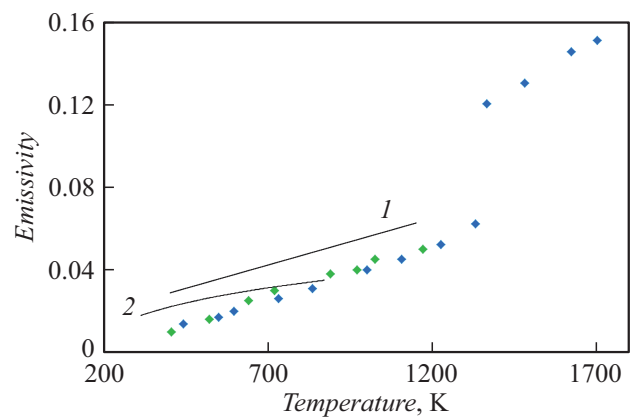
**Рис. 1.** Конструкция экспериментальной ячейки: 1 — корпус с термостатируемой рубашкой, 2 — резистивный нагреватель, 3 — исследуемый металл, 4 — радиометр, 5 — иллюминатор, 6 — охлаждаемые токовводы, 7 — крышка.



**Рис. 2.** Зависимость степени черноты меди от температуры: 1 — [1], 2 [6], 3 — [9], зеленые ромбы (в on-line версии) — [8], голубые ромбы (в on-line версии) — данные авторов настоящей работы.



**Рис. 3.** Зависимость степени черноты серебра от температуры: 1 — [1], 2 — [6], зеленые ромбы (в on-line версии) — [8], голубые ромбы (в on-line версии) — данные авторов настоящей работы.



**Рис. 4.** Зависимость степени черноты золота от температуры: 1 — [1], 2 — [6], зеленые ромбы (в on-line версии) — [8], голубые ромбы (в on-line версии) — данные авторов настоящей работы.

растает в среднем на 68% и продолжает возрастать с температурой.

Степени черноты полированного золота (рис. 4) удовлетворительно согласуются с имеющимися измерениями. Фазовый переход с ростом температуры дает скачек излучательной способности до 63%. Поведение степени черноты золота соответствует скачкообразному изменению излучательной способности металлов подгруппы титана при фазовом переходе твердое тело—жидкость [10].

## Выводы

Проведено экспериментальное определение интегральных полусферических степеней черноты меди, се-

ребра и золота в жидкой и твердой полированной фазах состояния, включая области точек их плавления.

Исследования проведены абсолютным радиационным методом без фокусирующей оптики в температурном диапазоне, ограниченном упругостью пара исследуемых металлов.

Полученные экспериментальные результаты удовлетворительно согласуются с результатами надежных исследований [1,6,9] в пределах оценки погрешности эксперимента, проведенного авторами.

Экспериментальное определение степеней черноты меди, серебра и золота показало уверенный рост и скачкообразное изменение излучательной способности при плавлении в рассмотренном температурном диапазоне эксперимента.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *Излучательные свойства твердых материалов*. Справочник, под ред. чл.-кор. АН СССР А.Е. Шейндлина (Энергия, М., 1974), 471 с.
- [2] Л.А. Новицкий, Б.М. Степанов. *Оптические свойства материалов при низких температурах*. Справочник (Машиностроение, М., 1980), 224 с.
- [3] В.Э. Пелецкий. ТВТ, **38** (3), 424 (2000).
- [4] H. Watanabe, M. Susa, H. Fukuyama, K. Nagata. Int. J. Thermophys., **24** (1), 223 (2003).
- [5] H. Watanabe, M. Susa, H. Fukuyama, K. Nagata. Int. J. Thermophys., **24** (4), 1105 (2003).
- [6] *Thermal radiation heat transfer*, ed. by R. Siegel, J.R. Howell. (Hemisphere publ. corp., Washington, 2000), 1072 p.
- [7] M. Watanabe, M. Adachi, H. Fukuyama. J. Mol. Liq., **324**, 115138 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.115138>
- [8] В.В. Сагадеев, В.А. Аляев. *Излучательная способность жидких металлов и сплавов* (Изд-во КНИТУ, Казань, 2018), 176 p.
- [9] К.Б. Панфилович. *Тепловое излучение и поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов* (Изд-во Казан. гос. тех. ун-та, Казань, 2009), 256 с.
- [10] Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев, В.А. Аляев. ЖТФ, **91** (7), 1090 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.12.51755.103-21