

# 03 Спектральная излучательная способность переходных металлов X группы в области точки плавления

© Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев

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

Поступило в Редакцию 2 июня 2022 г.  
В окончательной редакции 26 октября 2022 г.  
Принято к публикации 22 ноября 2022 г.

Радиационным методом проведено экспериментальное исследование нормальной спектральной излучательной способности  $\epsilon_\lambda$  технических никеля, палладия и платины в твердой полированной и жидкой фазах вблизи точек плавления. Измерение  $\epsilon_\lambda$  фиксировалось по полосам пропускания применяемых узкополосных фильтров. Получена зависимость  $\epsilon_\lambda$  металлов от длины волны в диапазоне спектра излучения 0.26–10.6  $\mu\text{m}$ . Проведен сравнительный анализ с литературными данными других авторов. Дан теоретический расчет  $\epsilon_\lambda$  по классической электромагнитной теории — формуле Хагена и Рубенса.

**Ключевые слова:** нормальная спектральная излучательная способность, область плавления, никель, палладий, платина, длина волны.

DOI: 10.21883/JTF.2023.02.54492.150-22

## Введение

Переходные металлы X группы такие, как никель, палладий и платина широко применяются как катализаторы в производственных тепловых процессах. Знание теплофизических свойств — излучательной способности в широком волновом диапазоне — позволяет производить теплотехнические расчеты лучистого теплообмена в высокотемпературных процессах [1], прогнозировать физическое поведение металлов и осуществлять проектирование новых производственных линий и установок. Расчет лучистого теплообмена также позволяет интенсифицировать работоспособность и производительность.

## 1. Экспериментальная часть

Исследования проводились на экспериментальной установке в диапазоне длин волн от 0.26 до 10.6  $\mu\text{m}$  (табл. 1), представленной в работе [2], радиационным методом.

Исследовалась нормальная спектральная излучательная способность  $\epsilon_\lambda$  металлов в области точки плавления

**Таблица 1.** Спектральные характеристики узкополосных фильтров

Номер фильтра	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Полоса пропускания фильтра, $\mu\text{m}$	0.26	0.42	0.69	0.99	1.63	1.97	4.2	7.3	10.6

**Таблица 2.** Характеристики исследуемых образцов технических металлов

Металл	Марка	Химическая чистота, %	$T_{\text{melt.}}$ , К
Никель	Н-1 Ау	99.95	1726
Палладий	ПдА-1	99.95	1828.5
Платина	ПлА-1	99.95	2041.4

в твердой полированной и жидкой фазах. Измерения проводились в атмосфере подготовленного аргона после предварительного вакуумирования измерительной ячейки. Атмосфера аргона необходима для исключения реакционной способности зеркала жидкого металла с целью повышения чистоты проведения эксперимента.

В качестве резистивного нагревателя авторами была выбрана танталовая лента толщиной 2 mm с углублением в центре. Лента предварительно отжигалась до образования окисной пленки  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  с целью исключения химической реакции жидкого металла с нагревателем. Последующее остывание и извлечение слитка механическим путем показывало хорошее когезионное разделение по поверхностям соприкосновения системы металл–резистивный нагреватель.

Методика проведения эксперимента подробно изложена в работе [3].

Оценка погрешности эксперимента, проведенная авторами, составляет от 3 до 8% в зависимости от температуры.

В исследованиях применялись образцы технических металлов (табл. 2).

### 2. Теоретический метод расчета

В настоящей работе представлен результат теоретического расчета нормальной спектральной излучательной способности  $\epsilon_\lambda$  рассматриваемых выше металлов по классической электромагнитной теории (формула Хагена и Рубенса [4]):

$$\epsilon_\lambda = 0.365(r/\lambda)^{1/2} - 0.0667(r/\lambda) + 0.0091(r/\lambda)^{3/2},$$

где  $r$  — удельное сопротивление металла при температуре опыта,  $\lambda$  — длина волны.

В теоретическом расчете  $\epsilon_\lambda$  для каждого металла использовался массив экспериментальных данных по удельному сопротивлению в твердой и жидкой фазах вблизи точки плавления [5,6].

Результаты проведенного расчета представлены в виде линий на рис. 1–6.

Расчет  $\epsilon_\lambda$  по никелю и палладию дает хорошее согласование как в твердой, так и в жидкой фазах. Расчет  $\epsilon_\lambda$  по платине как в жидкой, так и в твердой фазах оказался по отношению к эксперименту завышенным. Возможная несостоятельность применения классической теории к расчету интенсивности по платине в рассмотренном диапазоне спектра может быть объяснена физико-химическими свойствами металла с самой высокой плотностью в группе.

Следует, однако, отметить, что наиболее надежные теплофизические характеристики, в частности излучательной способности конструкционных материалов, можно получить лишь экспериментальным путем.

### 3. Результаты эксперимента и обсуждение

Результаты экспериментов, графически представленные на рис. 1–6, являются средними значениями нескольких независимых измерений.

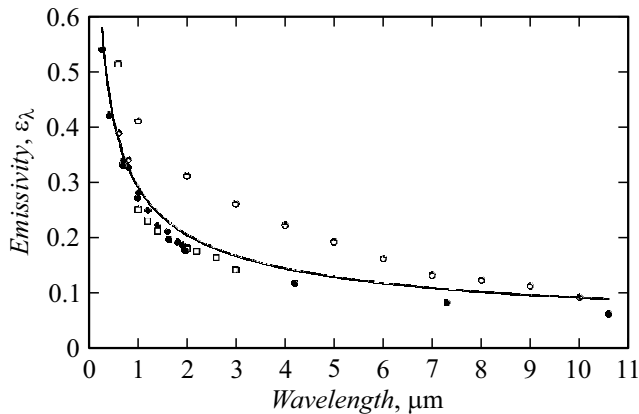


Рис. 1. Никель (твердая фаза).

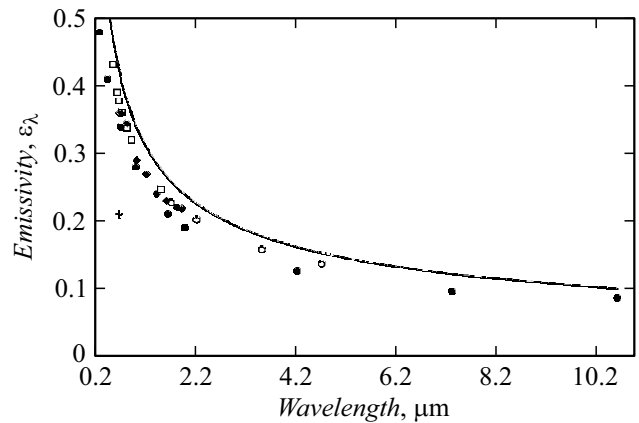


Рис. 2. Никель (жидкая фаза).

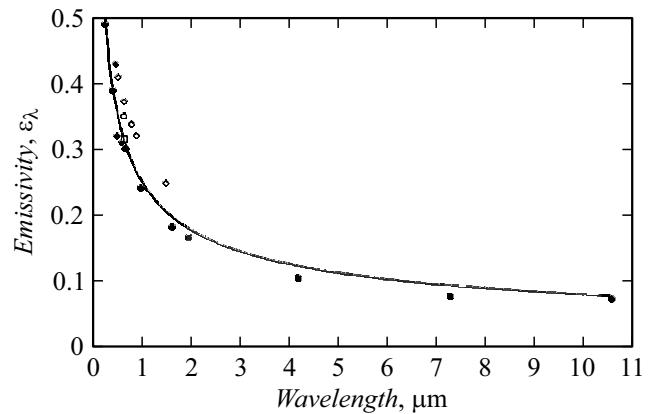


Рис. 3. Палладий (твердая фаза).

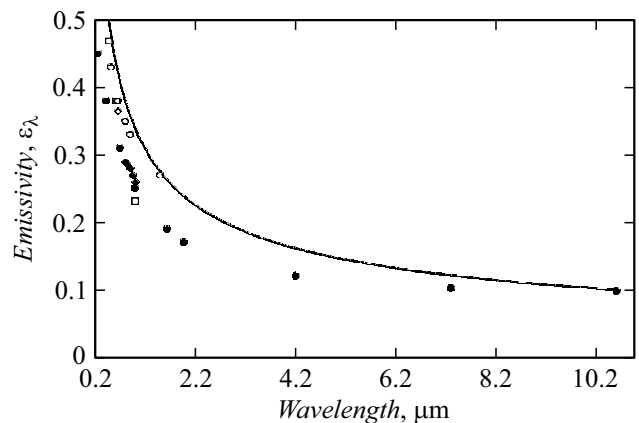


Рис. 4. Палладий (жидкая фаза).

В исследовании технического никеля применялись зеркально-полированные образцы металла. Эксперименты проводились при температуре 1715 К. Поведение нормальной спектральной излучательной способности показало классическое распределение падения интенсивности по длине волны (рис. 1). Анализ литературных данных показал хорошее совпадение в спектральном

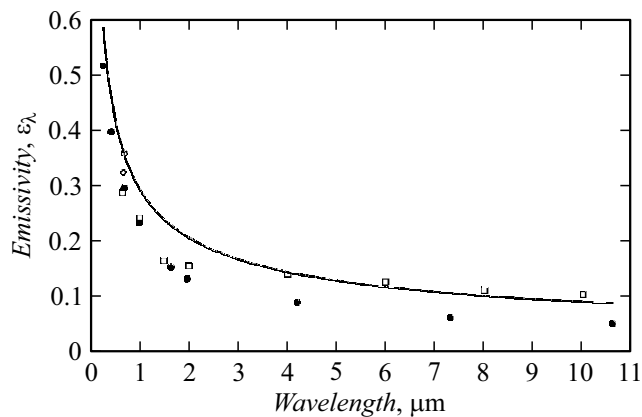


Рис. 5. Платина (твердая фаза).

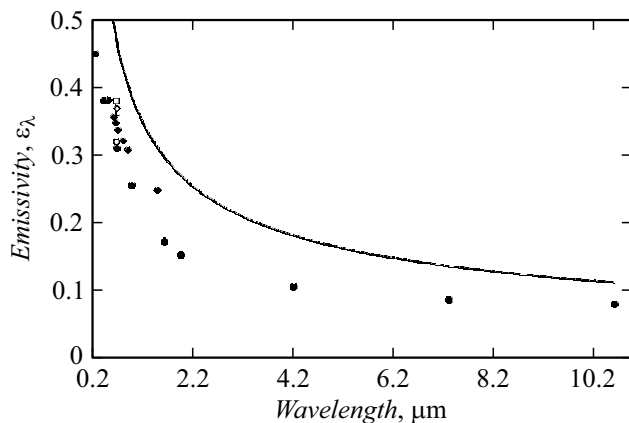


Рис. 6. Платина (жидкая фаза).

диапазоне от 0.4 до 2.5  $\mu\text{m}$  [7–9]. Только значение по [10] оказались завышенными во всем исследованном спектральном диапазоне, что может быть объяснено температурой опыта (разница составляла порядка 80 К).

Зависимость излучательной способности металлов в области точки плавления очень интересна с научной точки зрения, поскольку разница между излучательной способностью твердой и жидкой фазах напрямую связана с разницей между электронной.

Излучение жидкой фазы никеля проводилось в области температуры образца 1736 К (рис. 2). Сопоставление излучения с измерениями авторов [7,8,11–13] показало хорошее совпадение по падению интенсивности на участке спектра от 0.2 до 4.2  $\mu\text{m}$ . Измерения же авторов настоящей работы охватывали диапазон от 0.26 до 10.6  $\mu\text{m}$  по всем реперным точкам съемных фильтров (табл. 1).

Излучение в области плавления жидкой фазы никеля оказалось на 10% выше излучения твердой фазы. Падение интенсивности объясняется свойствами состояния кристаллической решетки никеля как переходного металла.

Твердый полированный палладий исследовался при температуре 1812 К (рис. 3). Спектральная излучательная способность палладия сопоставлялась с аналогичными замерами авторов [8,13–15] в спектральном диапазоне от 0.26 до 1.5  $\mu\text{m}$ . Сопоставление показало удовлетворительное согласие.

Жидкая фаза палладия исследовалась при средней температуре эксперимента 1837 К. Сопоставление с исследованиями [14–17] показало схожесть поведения  $\epsilon_\lambda$  в доверительном коридоре оценки погрешности начиная с 0.26  $\mu\text{m}$  вплоть до 1.5  $\mu\text{m}$  (рис. 4). Исследования проведены, как и в предыдущих случаях, до 10.6  $\mu\text{m}$ .

Получено спектральное распределение интенсивности нормальной излучательной способности палладия, аналогичное всей платиновой группе периодической системы.

Металлическая платина исследовалась в твердом полированном состоянии при средней температуре эксперимента 2018 К. Образец платины представлял собой слиток. Интенсивность спектрального излучения твердой платины хорошо согласуется с опытными данными [8,12,18] на участке от 0.26 до 10.6  $\mu\text{m}$ . Классическое распределение падения интенсивности  $\epsilon_\lambda$  от длины волны иллюстрирует рис. 5.

Жидкое состояние платины исследовалось в области температуры 2053 К. Точечные платиновые замеры интенсивности  $\epsilon_\lambda$  по [14,16,18–20] показывают экспериментальное сопоставление на участке спектра от 0.26 до 1.5  $\mu\text{m}$ . Измерение  $\epsilon_\lambda$  платины в настоящей работе проведено до 10.6  $\mu\text{m}$ . Падение интенсивности нормальной излучательной способности платины от длины волны так же хорошо согласуется с аналогичным поведением металлов этой группы по спектру излучения.

## Выводы

Представленный в настоящей работе пример теоретического подхода к расчету  $\epsilon_\lambda$  переходных металлов X группы в области точки плавления показал удовлетворительную возможность применения классической электромагнитной теории в видимой и дальней инфракрасной области спектра.

Проведено экспериментальное измерение нормальной спектральной излучательной способности никеля, палладия и платины в области точки плавления.

Исследование  $\epsilon_\lambda$  твердой полированной фазы и фазы жидкого состояния металлов в области точки плавления показало удовлетворительное совпадение с аналогичными исследованиями других авторов как качественно, так и количественно.

Поведение  $\epsilon_\lambda$  исследованных металлов соответствует характерной ниспадающей зависимости излучения от длины волны в области точки плавления.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] R. Siegel, J.R. Howell. *Thermal Radiation Heat Transfer* (Taylor & Francis, NY, 2002)
- [2] Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев. ЖТФ, **92** (3), 342 (2022).  
DOI: 10.21883/JTF.2022.03.52129.207-21  
[D.V. Kosenkov, V.V. Sagadeev. *Tech. Phys.*, **92** (3), 272 (2022).  
DOI: 10.21883/JTF.2023.02.54492.150-22]
- [3] Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев, В.А. Аляев. Теплофизика и аэромеханика, **28** (6), 951 (2021).
- [4] Д.Я. Свет. *Оптические методы измерения истинных температур* (Наука, М., 1982)
- [5] T.K. Chu, T.C. Chi. *Properties of Selected Ferrous Alloying Elements, III-1* (McGraw-Hill, Washington, 1981)
- [6] J.W. Arblaster. *Johnson Matthey Technology Review*, **59**, 174 (2015).
- [7] H. Watanabe, M. Susa, H. Fukuyama, K. Nagata. *Intern. J. Thermophys.*, **24**, 473 (2003).  
DOI: 10.1023/A:1022924105951
- [8] Y.S. Touloukian, D.P. DeWitt. *Thermal Radiative Properties: Metallic Elements and Alloys. Vol. 7, Thermophysical Properties of Matter*, ed. by Y.S. Touloukian, C.Y. Ho (IFI/Plenum, NY, 1970)
- [9] E. Kaschnitz, J.L. McClure, A. Cezairliyan. *Int. J. Thermophys.*, **19**, 1637 (1998). DOI: 10.1007/BF03344915
- [10] G. Teodorescu. *Radiative Emissivity of Metals and Oxidized Metals at High Temperature* (Auburn University, 2007)
- [11] K. Boboridis, A. Seifert, A. Obst, D. Basak. *Intern. J. Thermophys.*, **28**, 683 (2007).  
DOI: 10.1007/s10765-007-0150-x
- [12] C.P. Cagran, C. Brunner, A. Seifert, G. Pottlacher. *High Temperatures-High Pressures*, **34**, 669 (2002).
- [13] E. Kaschnitz, J. McClure, A. Cezairliyan. *Intern. J. Thermophys.*, **19**, 1637 (2014). DOI: 10.1007/BF03344915
- [14] J.L. McClure, A. Cezairliyan, E. Kaschnitz. *Intern. J. Thermophys.*, **20**, 1149 (1999).
- [15] C. Cagran, G. Pottlacher. *Platinum Metals Review*, **50**, 144 (2006). DOI: 10.1595/147106706X129079
- [16] S. Krishnan, G.P.R. Hansen, R.H. Hauge, J.L. Margrave. *Spectral Emissivities and Optical Constants of Electromagnetically Levitated Liquid Metals as Functions of Temperature and Wavelength*. JPL, Proceed. Second Noncontact Temperature Measurement Workshop (1990).
- [17] M. Watanabe, M. Adachi, H. Fukuyama. *J. Molecular Liquids*, **324**, 115138 (2020). DOI: 10.1016/j.molliq.2020.115138
- [18] B. Wilthan, C.P. Cagran, C. Brunner, G. Pottlacher. *Thermochim. Acta*, **415**, 47 (2004).
- [19] F. Righini, A. Rosso. *High Temp. High Press.*, **12**, 335 (1980).
- [20] T. Baykara, R.H. Hauge, N. Norem, P. Lee, J.L. Margrave. *High Temp. Sci.*, **32**, 113 (1991).