

УДК 621.311.25(06)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ ЭП-823 В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 200–900 °С

А. Б. Круглов, В. Б. Круглов, П. Г. Стручалин, В. С. Харитонов

*В работе представлены результаты исследования теплофизических свойств стали ЭП-823 (температуропроводности термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР), теплоемкости, теплопроводности) в диапазоне температур 200–900 °С. Отмечено наличие фазовых переходов, оказывающих влияние на теплофизические свойства стали.*

**Ключевые слова:** теплофизические свойства, ТКЛР, теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность, ЭП-823.

В настоящее время для нужд атомной энергетики создаются проекты реакторных установок, охлаждаемые тяжелым жидкометаллическим теплоносителем [1]. Учитывая особенности таких установок, предполагается использовать сталь ЭП-823 в качестве материала оболочек тепловыделяющих элементов. Для обоснования работоспособности твэлов с оболочкой из стали ЭП-823 необходимо наличие достоверных данных по ее основным физическим свойствам. Однако проведенный анализ опубликованных данных показал, что информация о теплофизических свойствах стали ЭП-823 – температуропроводности ( $a$ ), ТКЛР ( $\alpha$ ), теплоемкости ( $c_p$ ), теплопроводности ( $\lambda$ ) – практически отсутствует.

Целью данной работы являлось проведение систематических измерений температуропроводности, ТКЛР, теплоемкости и теплопроводности стали ЭП-823 в диапазоне температур 200–900 °С.

*Экспериментальные установки.* В данной работе измерение ТКЛР стали ЭП-823 осуществлялось на установке DIL-402 С [2]. Измерения термического расширения на дилатометре выполнялись в два этапа. На первом в дилатометр устанавливался рабочий эталон термического расширения и в исследуемом диапазоне температур проводилась регистрация сигнала датчика перемещения и температуры. На втором этапе,

---

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское шоссе, 31; e-mail: pstruchalin@mail.ru.

выполняемом по температурному режиму первого, измерения проводились с исследуемым образцом. По результатам двух измерений с помощью программы Proteus Thermal Analysis рассчитывались относительная термическая деформация исследуемого образца  $\epsilon(T_0, T)$ , ТКЛР и плотность  $\rho$ .

Измерение температуропроводности стали ЭП-823 осуществлялось на установке *LFA 457 MicroFlash*, действие которой основано на методе импульсного нагрева фронтальной поверхности образца и регистрации термограммы тыльной стороны образца. По зарегистрированной термограмме проводится расчет температуропроводности, в котором учитывается теплообмен с окружающей средой [3].

На установке *LFA 457 MicroFlash* возможно проведение измерений теплоемкости, которые выполняются относительно эталона – образца с известными прецизионными данными по удельной теплоемкости и ТКЛР, устанавливаемого в один из трех держателей образцов. Производится совместная обработка термограмм импульсного нагрева исследуемого образца и эталона по программе измерения теплоемкости. В настоящем исследовании для измерения теплоемкости и последующего расчета теплопроводности стали ЭП-823 в качестве рабочего эталона теплоемкости использовался образец из стали 12X18H10T, для которой известны надежные данные по удельной теплоемкости и ТКЛР в диапазоне температур 100–1000 °С [4, 5].

Теплопроводность образцов рассчитывалась по формуле (1) через измеренные значения температуропроводности, удельной теплоемкости и плотности:

$$\lambda = a \cdot c_p \cdot \rho. \quad (1)$$

*Результаты измерений.* Полученные данные по ТКЛР стали ЭП-823 представлены на рис. 1. Измерения были проведены в режиме монотонного нагрева с темпом 3 °С/мин.

Результаты измерений температуропроводности и удельной теплоемкости представлены на рис. 2 и 3. Теплопроводность, рассчитанная по экспериментальным значениям температуропроводности и теплоемкости, представлена на рис. 4.

В соответствии с метрологическими характеристиками использованного оборудования [2] и по результатам тестовых измерений на образцах из стали 12X18H10T погрешности измерения теплофизических параметров стали ЭП-823 составили:

$$\frac{\Delta a}{a} \leq (2 - 5) \cdot 10^{-2}; \quad \frac{\Delta c_p}{c_p} \leq 5 \cdot 10^{-2}; \quad \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \leq 7 \cdot 10^{-2}; \quad \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \leq 5 \cdot 10^{-2}. \quad (2)$$

*Обсуждение результатов.* В ходе выполнения работы было установлено наличие фазовых переходов в стали ЭП-823, существенно влияющих на ее теплофизические свойства.

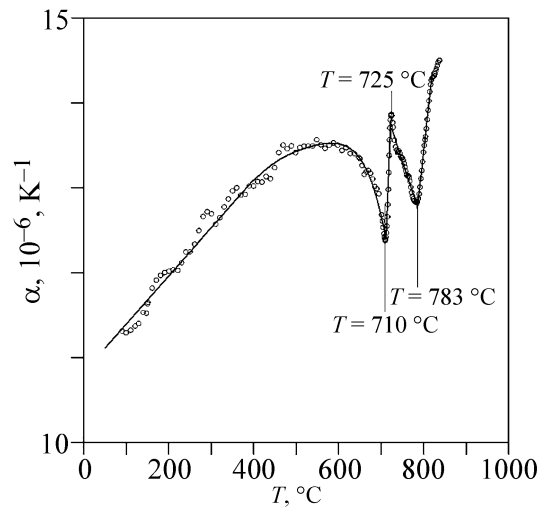


Рис. 1: ТКЛР стали ЭП-823.  $\circ$  – экспериментальные значения; — – интерполирующая зависимость.

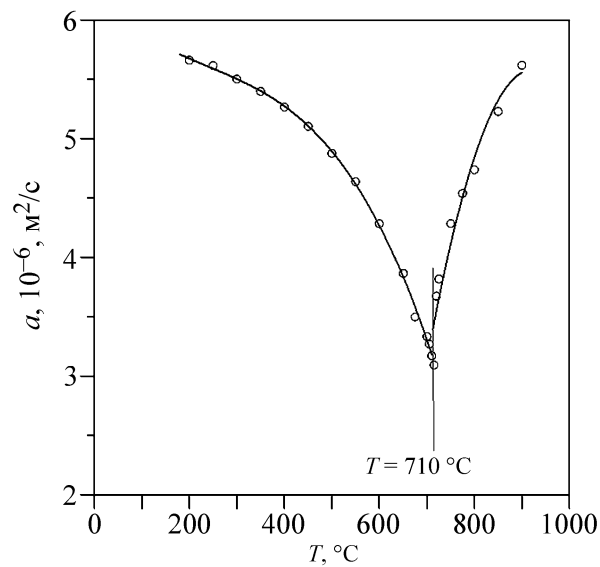


Рис. 2: Температуропроводность стали ЭП-823.  $\circ$  – экспериментальные значения; — – интерполирующая зависимость.

ТКЛР стали ЭП-823 линейно растет в диапазоне  $T = 100\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$ , на участке  $T = 500\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$  принимает постоянные значения, а затем обнаруживает два узких минимума при температурах  $T = 710$  и  $783\text{ }^\circ\text{C}$  и максимум при  $T = 725\text{ }^\circ\text{C}$ .

Теплоемкость и температуропроводность стали ЭП-823, как и ТКЛР, имеют особенности. При температуре  $T = 710\text{ }^\circ\text{C}$  происходит изменение характера зависимостей

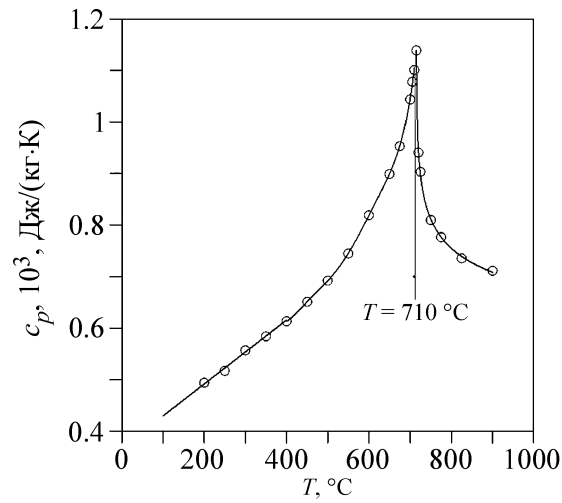


Рис. 3: Удельная теплоемкость стали ЭП-823. *o* – экспериментальные значения; — — — — — интерполирующая зависимость.

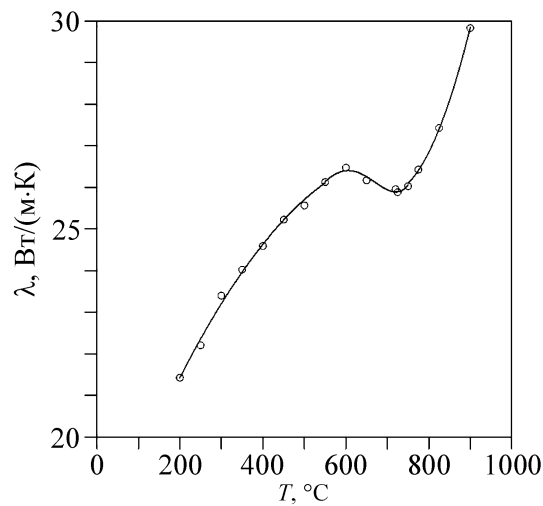


Рис. 4: Теплопроводность стали ЭП-23. *o* – экспериментальные значения; — — — — — интерполирующая зависимость.

от температуры – у теплоемкости ускоряющийся рост сменяется резким падением, у теплопроводности после интенсивного уменьшения наблюдается не менее интенсивный рост.

Коэффициент теплопроводности изменяется немонотонно; в диапазоне температур  $T = 600-800$  °C наблюдается уменьшение теплопроводности с ростом температуры.

*Заключение.* Основными результатами данной работы являются прецизионные данные по коэффициенту температуропроводности, ТКЛР, теплоемкости и теплопроводности стали ЭП-823 в диапазоне температур 200–900 °С. Отмечено наличие фазовых переходов, оказывающих заметное влияние на ее теплофизические свойства, которое необходимо учитывать при проектировании ядерных установок.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. В. Безносков, Ю. Г. Драгунов, В. И. Рачков, *Тяжёлые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике* (М., ИздАт, 2007).
- [2] [www.netzsch.com](http://www.netzsch.com).
- [3] J. A. Cape and G. W. Lehman, *Journal of Applied Physics* **34**, 1909 (1963).
- [4] Таблицы стандартных справочных данных. Молибден, монокристаллическая окись алюминия, сталь 12Х18Н10Т. Температурный коэффициент линейного расширения. ГСССД 59-83 (М., Изд-во Стандартов, 1984).
- [5] Таблицы стандартных справочных данных. Стали 12Х18Н9Т и 12Х18Н10Т. Удельная теплоемкость и удельная энтальпия в диапазоне температур 400 – 1380 К при атмосферном давлении. ГСССД 32-82 (М., Изд-во Стандартов, 1983).

*По материалам IV Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”.*

Поступила в редакцию 12 мая 2015 г.