

УДК 536.2.023

## Коэффициент температуропроводности стали ЧС-139 в широком интервале температур\*

А.Ш. Агажанов<sup>1</sup>, С.В. Станкус<sup>1</sup>, Д.А. Самошкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет

E-mail: stankus@itp.nsc.ru

Методом лазерной вспышки с погрешностью 2–4 % измерен коэффициент температуропроводности ферритно-мартенситной стали марки ЧС-139 в интервале температур 296–1274 К. Определены температуры Кюри и фазовых переходов мартенсит-аустенит-мартенсит.

**Ключевые слова:** температуропроводность, точка Кюри, сталь ЧС-139, метод лазерной вспышки, высокие температуры.

Опыт использования сталей ЭП-450 и ЭП-823 в качестве материала чехлов и оболочек ТВЭЛов показал их недостаточную жаропрочность для обеспечения безопасной работы энергетических реакторов нового поколения на быстрых нейтронах [1]. Перспективным сплавом, способным решить данную проблему, является ферритно-мартенситная 12-процентная хромистая сталь ЧС-139, которая является аналогом стали ЭП-823 и отличается от нее улучшенными химическим и фазовым составами [2].

Эффективное внедрение новых конструкционных материалов невозможно без знания комплекса их теплофизических свойств, в том числе коэффициента температуропроводности. Такие данные требуются для проведения разнообразных конструкторских и проектных работ. Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование фазовых превращений и коэффициента температуропроводности стали нового поколения ЧС-139 в широком интервале температур.

Измерение температуропроводности проводилось методом лазерной вспышки [3, 4] на автоматизированной экспериментальной установке LFA-427 фирмы Netzsch (Германия). Образец в форме диска диаметром 6 мм и толщиной 2,7 мм с плоскопараллельными шлифованными торцами устанавливался в держатель на игольчатые подставки внутри высокотемпературной электропечи с инертной атмосферой (аргон 99,992 об. %). Его нижняя поверхность облучалась коротким лазерным импульсом (1,064 мкм) от Nd: YAG лазера с длительностью 0,8 мс и энергией до 10 Дж. Изменение температуры верхней поверхности регистрировалось ИК-детектором, который охлаждался жидким азотом. Коэффициент температуропроводности  $a$  рассчитывался по термограмме с учетом

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракт № 14.518.11.7015).

Таблица

Химический состав (мас. %) стали ЧС-139 [2]

С	Cr	Ni	Mo	Nb	W	V	Ta	B	Si	N	Mn
0,20	11,6	0,73	0,50	0,28	1,22	0,27	0,06	0,006	0,26	0,078	0,60

тепловых потерь по модели [5]. Вводилась поправка на конечную длительность лазерного импульса и его реальную форму [6]. Измерения при заданной температуре осуществлялись после термостатирования образца в серии из трех «выстрелов» лазера. Интервал между «выстрелами» составлял три минуты. Переход от одной температуры к другой при нагреве и охлаждении происходил со скоростью 5 К/мин. Химический состав стали ЧС-139 представлен в таблице. Предварительная подготовка образца состояла в его отжиге при 900 К в течении одного часа. Общая погрешность определения коэффициента температуропроводности (2 % при 300 К и 4 % при 1500 К) была оценена по результатам измерений коэффициента  $a$  молибдена и стандартных образцов инконеля и пирокерама [3, 4].

Результаты измерений представлены на рисунке. Экспериментальные данные получены в нескольких сериях измерений как при нагреве, так и охлаждении образца в интервале температур 296–1274 К. При расчете температуропроводности ( $a$ ) не учитывалось тепловое расширение стали.

Как видно из рисунка, в экспериментах наблюдался значительный гистерезис данных по температуропроводности в циклах нагрева–охлаждения образца. Аномалии на графике связаны со структурными и магнитными превращениями, имеющими место в стали при изменении температуры.

В области комнатной температуры сталь, в основном, состоит из метастабильной фазы — мартенсита, представляющего пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе. При нагреве образца, вблизи  $T_C = 995 \pm 5$  К, наблюдается четко выраженный минимум температуропроводности, по характеру отвечающий изменению величины  $a$  при фазовом переходе второго рода. Величина  $T_C$  совпадает с температурой Кюри для сплава Fe-Cr с содержанием хрома 12 масс. % [7], поэтому можно считать, что при 995 К сталь ЧС-139 претерпевает магнитное фазовое превращение.

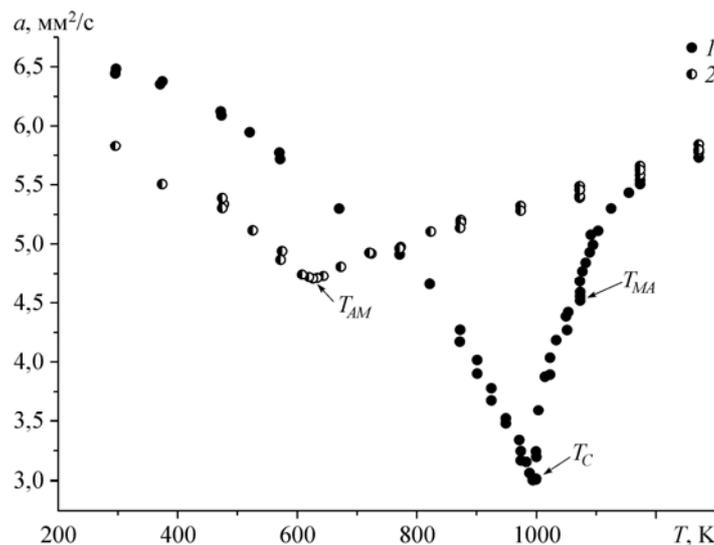


Рис. Температурная зависимость коэффициента температуропроводности стали ЧС-139.

1 — нагрев, 2 — охлаждение;  $T_C$  — температура Кюри,  $T_{MA}$  — температура фазового перехода мартенсит–аустенит,  $T_{AM}$  — температура фазового перехода аустенит–мартенсит.

Аппроксимацией экспериментальных данных в интервале температур от комнатной до  $T_C$  получено уравнение:

$$a(T) = 5,14 + 0,01246T - 3,76 \cdot 10^{-5}T^2 + 4,154 \cdot 10^{-8}T^3 - 1,864 \cdot 10^{-11}T^4, \quad (1)$$

где  $a$  измеряется в  $\text{мм}^2/\text{с}$ , температура  $T$  — в К. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек от (1) не превышает 1,2 %.

Выше точки Кюри стали, при  $T_{MA} = 1073 \pm 5$  К, можно заметить небольшой скачок температуропроводности (1,5 %), который лишь незначительно превышает случайные погрешности измерений. Можно предположить, что при этой температуре мартенсит начинает переходить в аустенит, т. е. твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железе. Образование зерен аустенита продолжается вплоть до 1200 К, после чего кривые нагрева и охлаждения  $a$  совпадают, что свидетельствует о завершении фазового превращения.

Равновесная парамагнитная аустенитная фаза при понижении температуры переохлаждается до  $T_{AM} = 630 \pm 5$  К (см. рис.), где начинает переходить в ферромагнитный мартенсит, что обуславливает появления второго излома на кривой  $a(T)$ , вызванного как структурным, так и магнитным фазовыми превращениями. Высокое содержание легирующих элементов в ЧС-139 (см. табл.) способствуют подавлению диффузии атомов углерода в твердом растворе и, тем самым, создает благоприятные условия для образования мартенситных зерен. Из-за наличия остаточного аустенита данные, полученные в процессе охлаждения ниже  $T_{AM}$ , в том числе и при комнатной температуре, после высокотемпературных измерений имеют плохую воспроизводимость.

Аппроксимация экспериментальных данных, полученных при охлаждении в интервале от максимальной температуры измерений до  $T_{AM}$ , дала уравнение:

$$a(T) = 3,547 + 0,00199T - 1,8098 \cdot 10^{-7} T^2, \quad (2)$$

где  $a$  измеряется в  $\text{мм}^2/\text{с}$ , температура  $T$  — в К. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек от (2) не превышает 0,6 %.

### Список литературы

1. Леонтьева-Смирнова М.В., Агафонов А.Н., Ермолаев Г.Н. и др. Микроструктура и механические свойства малоактивируемой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 (RUSFER-EK-181) // Перспективные материалы. 2006. № 6. С. 40–52.
2. Леонтьева-Смирнова М.В., Агафонов А.Н., Можанов Е.М., Чернов В.М. Свариваемость жаропрочных 12 %-ных хромистых сталей ЭК-181 И ЧС-139 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2011. № 4. С. 14–21.
3. Савченко И.В., Станкус С.В. Температуропроводность и теплопроводность тантала в интервале температур 293–1800 К // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 4. С. 729–732.
4. Станкус С. В., Савченко И. В., Багинский А. В., Верба О. И., Прокопьев А. М., Хайрулин Р. А. Коэффициенты переноса тепла нержавеющей стали 12X18H10T в широком интервале температур // Теплофизика высоких температур. 2008. Т. 46, № 5. С. 1–3.
5. Cape J.A., Lehman G.W. Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity // J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34, No. 7. P. 1909.
6. Blumm J., Opfermann J. Improvement of the mathematical modeling of flash measurement // High Temp. — High Press., 2002. Vol. 34, No. 5. P. 515–521.
7. Effenberg G. The Red book: yearly summaries of constitutional data and phase diagrams of metallic systems. Asm Intl, 1998. 8700 p.

Статья поступила в редакцию 19 февраля 2013 г.,  
после доработки — 5 июня 2013 г.