

**А. Ш. Агажанов¹, И. В. Савченко¹, Д. А. Самошкин²
С. В. Станкус¹, О. С. Дутова¹**

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: stankus@itp.nsc.ru

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ СТАЛИ 16X12B2ФТаР В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР *

Методом лазерной вспышки измерен коэффициент температуропроводности ферритно-мартенситной стали нового поколения марки 16X12B2ФТаР в интервале температур 296–1274 К с погрешностью 2–4 %. Получены аппроксимирующие уравнения, определены точка Кюри стали и температуры мартенситно-аустенитных структурных превращений.

Ключевые слова: температуропроводность, точка Кюри, сталь 16X12B2ФТаР, метод лазерной вспышки, высокие температуры.

Введение

В настоящее время активно ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по термоядерным и ядерным реакторам, чьи конструкционные материалы должны удовлетворять ряду требований, таких как жаропрочность, радиационная стойкость и быстрый спад наведенной активности. Перспективным материалом, удовлетворяющим этим требованиям, является ферритно-мартенситная жаропрочная комплексно-легированная 12 %-я хромистая сталь нового поколения марки 16X12B2ФТаР, которая рассматривается в качестве оболочечного материала для ТВЭЛов реакторов на быстрых нейтронах. Малоактивируемая (с быстрым спадом активности) сталь 16X12B2ФТаР, или RUSFER-EK-181, показывает повышенный уровень физико-механических свойств из-за ее комплексного легирования Та, V, W и эле-

ментами внедрения [1]. Кроме того, результаты комплексных испытаний и технологических проработок на жаропрочность, а также на устойчивость против образования горячих трещин в металле околосшовной зоны, свидетельствуют о существенном преимуществе 16X12B2ФТаР перед штатными сталями типа ЭП-450, ЭП-823 и ЭП-900, используемых в ядерных реакторах [2].

Эффективное внедрение новых конструкционных материалов невозможно без знания их теплофизических свойств и, в частности, коэффициента температуропроводности. База данных по коэффициентам переноса тепла нужна для проведения конструкторских и проектных разработок оборудования и моделирования процессов в теплообменных системах. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование коэффициента температуропроводности ферритно-мартенситной стали нового

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 8073.

поколения 16X12B2ФТaP в широком интервале температур, включая области точки Кюри и полиморфного превращения «мартенсит-аустенит».

Методика измерений

Измерение температуропроводности проводилось методом лазерной вспышки (или флэш-методом) [3; 4] на автоматизированной экспериментальной установке LFA-427 фирмы «Netzsch» (Германия). Образец в форме диска диаметром 12,6 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 модели, предложенной в [4], а поправки на конечную длительность лазерного импульса и его реальную форму определялись по методике [5]. Температура измерялась платина-платинородиевой термопарой (тип S), расположенной в непосредственной близости от образца, с погрешностью не более 5 К. Измерения при заданной температуре осуществлялись после термостатирования образца в серии из трех «выстрелов» лазера. Интервал между «выстрелами» составлял 3 мин. Переход от одной температуры к другой при нагреве и охлаждении происходил со скоростью 5 К/мин. Химический состав стали 16X12B2ФТaP представлен в табл. 1. Общая погрешность определения коэффициента температуропроводности (2 % при 300 К и 4 % при 1 500 К) была оценена по результатам измерений a молибдена и стандартных образцов инконеля и пирокерама [6; 7].

Результаты и обсуждение

Результаты измерений представлены на рисунке. Каждая точка является усредненным значением по трем «выстрелам» лазера за исключением точек вблизи аномалий. Первичные экспериментальные данные получены в нескольких сериях измерений как при нагреве (табл. 2), так и при охлаждении (табл. 3) образца в интервале температур 296–1 274 К. При расчете температуропроводности не учитывалось тепловое расширение стали. Из рисунка видно, что в экспериментах наблюдался значительный гистерезис данных по температуропроводности в циклах нагрева-охлаждения образца. Аномалии на графике связаны со структурными и магнитными превращениями, наблюдающимися в стали при изменении температуры.

В области комнатной температуры сталь в основном состоит из метастабильной структуры мартенсита, представляющего собой пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α -железе с объемноцентрированной тетрагональной кристаллической решеткой. При нагреве образца, вблизи $T_C = 1\,003 \pm 5$ К наблюдается четко выраженный минимум температуропроводности, по характеру отвечающий изменению a при фазовом переходе второго рода. Величина T_C совпадает с температурой Кюри для сплава Fe-Cr с содержанием хрома 12 масс. % [8], поэтому можно считать, что при 1 003 К исследуемая сталь претерпевает магнитное фазовое превращение, при котором ферромагнитное α -железо становится парамагнитным (β -железо).

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

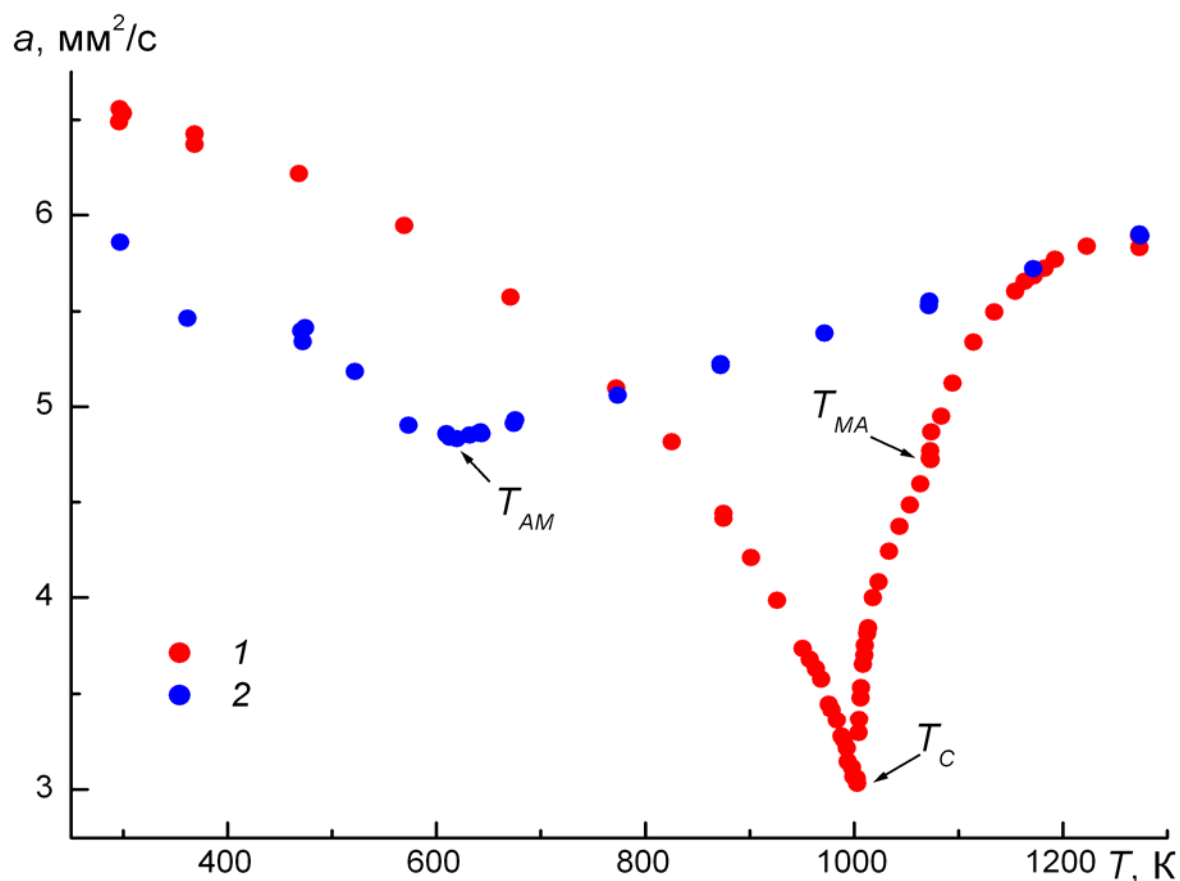
$$a(T) = 5,21 + 0,01243T - 3,87 \cdot 10^{-5}T^2 + 4,571 \cdot 10^{-8}T^3 - 2,155 \cdot 10^{-11}T^4, \quad (1)$$

где a в мм²/с, T – температура в К. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек от (1) не превышает 0,8 %.

Химический состав (мас. %) стали 16X12B2ФТaP [2]

Таблица 1

C	Cr	Ni	Mo	Nb	W	V	Ta	B	Si	N	Mn
0,14	11,2	0,03	0,04	0,01	1,17	0,29	0,17	0,004	0,37	0,044	0,94



Температурная зависимость коэффициента температуропроводности стали 16Х12В2ФТаР: 1 – нагрев; 2 – охлаждение (T_C – температура Кюри, T_{MA} – температура фазового перехода «мартенсит-аустенит», T_{AM} – температура фазового перехода «аустенит-мартенсит»)

Таблица 2

Результаты измерений коэффициента температуропроводности стали 16Х12В2ФТаР, полученные при нагреве (без учета теплового расширения)

T, K	$a, \text{mm}^2/\text{c}$	T, K	$a, \text{mm}^2/\text{c}$	T, K	$a, \text{mm}^2/\text{c}$	T, K	$a, \text{mm}^2/\text{c}$
295,9	6,49	957,5	3,68	1005,2	3,37	1073,3	4,77
296,3	6,56	963,5	3,63	1006,2	3,48	1073,8	4,72
299,4	6,53	968,5	3,58	1006,8	3,53	1073,8	4,87
368,3	6,37	976,0	3,44	1008,6	3,65	1083,6	4,95
368,4	6,43	978,5	3,42	1010,1	3,70	1094,6	5,12
468,4	6,22	983,5	3,36	1010,6	3,75	1114,6	5,34
569,4	5,95	988,3	3,27	1012,8	3,81	1134,6	5,50
671,1	5,57	990,3	3,26	1013,6	3,84	1154,6	5,60
772,5	5,10	993,4	3,21	1018,3	4,00	1163,7	5,66
825,4	4,82	994,0	3,15	1023,8	4,08	1172,2	5,68
874,9	4,44	998,1	3,11	1033,8	4,24	1182,7	5,72
875,1	4,42	999,5	3,07	1043,8	4,37	1192,8	5,77
901,3	4,21	1002,7	3,06	1053,8	4,49	1223,3	5,84
926,1	3,98	1003,2	3,03	1063,8	4,60	1273,0	5,89
951,0	3,74	1004,6	3,29	1072,6	4,73	1273,8	5,83

Таблица 3

Результаты измерений коэффициента температуропроводности стали 16X12B2ФТaP, полученные при охлаждении (без учета теплового расширения)

T, K	$a, \text{мм}^2/\text{с}$	T, K	$a, \text{мм}^2/\text{с}$
1274,3	5,89	640,3	4,86
1273,3	5,90	631,8	4,85
1172,0	5,72	619,8	4,83
1072,3	5,55	612,6	4,84
1071,8	5,53	610,3	4,85
972,0	5,39	609,6	4,86
872,4	5,23	573,1	4,90
872,3	5,21	521,9	5,18
773,5	5,06	474,1	5,42
675,3	4,93	471,9	5,34
674,3	4,91	470,4	5,40
643,0	4,86	361,3	5,46
642,1	4,87	296,9	5,86

Выше точки Кюри стали, при $T_{MA} = 1070 \pm 5 K$, можно заметить небольшой скачок температуропроводности (3 %). При этой температуре мартенсит начинает переходить в аустенит, т. е. в твердый раствор внедрения углерода в γ -железе с гранецентрированной кубической решеткой. Образование зерен аустенита продолжается вплоть до 1070 K, после чего кривые нагрева и охлаждения a совпадают, что свидетельствует о завершении структурного превращения.

Сложный характер зависимости $a(T)$ не позволяет получить единую аппроксимацию в интервале от T_C до максимальной температуры измерений (см. рисунок), и потому для практического использования можно рекомендовать обработку первичных данных (см. табл. 2) в более узких интервалах температуры.

Равновесная парамагнитная аустенитная фаза при понижении температуры переохлаждается до $T_{AM} = 620 \pm 5 K$ (см. рисунок), где начинает переходить в ферромагнитный мартенсит, что обуславливает появления второго излома на кривой $a(T)$. Высокое содержание легирующих элементов в исследуемой стали (см. табл. 1) способствует подавлению диффузии атомов углерода в твердом растворе и тем самым создает благоприятные условия образования мартенситных зерен. Но из-за конечной скорости диффузии атомов углерода в стали

также возможно образование некоторого количества феррита и карбида Fe_3C в аустенитной фазе. Наличие остаточного аустенита ниже T_{AM} приводит к плохой воспроизводимости результатов при низких температурах.

Аппроксимация экспериментальных данных, полученных при охлаждении в интервале от максимальной температуры измерений до T_{AM} , дала уравнение $a(T) = 4,015 + 0,00117T + 2,416 \cdot 10^{-7} T^2$, (2) где a в $\text{мм}^2/\text{с}$, T – температура в K. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек от (2) не превышает 0,2 %.

Заключение

Получены новые экспериментальные данные по коэффициенту температуропроводности a ферритно-мартенситной стали 16X12B2ФТaP в интервале температур 296–1274 K с погрешностью 2–4 %. Показано, что магнитный фазовый переход в стали проявляется в виде глубокого минимума на температурной зависимости $a(T)$, а взаимные переходы аустенит-мартенсит происходят с сильным температурным гистерезисом.

Список литературы

1. Леонтьева-Смирнова М. В., Агафонов А. Н., Ермолаев Г. Н., Иолтуховский А. Г.,

Можанов Е. М., Ревизников Л. И., Цветлев В. В., Чернов В. М., Буланова Т. М., Голованов В. Н., Островский З. О., Шамардин В. К., Блохин А. И., Иванов М. Б., Козлов Э. В., Колобов Ю. Р., Кардашев Б. К. Микроструктура и механические свойства малоактивируемой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 (RUSFER-ЕК-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%-х хромистых сталей ЭК-181 и ЧС-139 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2011. № 4. С. 14–21.

3. Parker W. J., Jenkins R. J., Butler C. P., Abbott G. L. Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity // J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. No. 9. P. 1679–1684.

4. 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. 1909–1913.

5. Blum J., Opfermann J. Improvement of the Mathematical Modeling of Flash Measurement // High Temp. – High Press. 2002. Vol. 34. P. 515–521.

6. Савченко И. В., Станкус С. В. Температуропроводность и теплопроводность тантала в интервале температур 293–1 800 К // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 4. С. 729–732.

7. Станкус С. В., Савченко И. В., Багинский А. В., Верба О. И., Прокопьев А. М., Хайрулин Р. А. Коэффициенты переноса тепла нержавеющей стали 12Х18Н10Т в широком интервале температур // Теплофизика высоких температур. 2008. Т. 46, № 5. С. 795–797.

8. Effenberg G. The Red Book 1995: Yearly Summaries of Constitutional Data and Phase Diagrams of Metallic Systems. Asm Intl, 1998. 8700 p.

Материал поступил в редакцию 19.02.2013

A. Sh. Agazhanov, I. V. Savchenko, D. A. Samoshkin, S. V. Stankus, O. S. Dutova

THERMAL DIFFUSIVITY OF 16Kh12V2FTaR STEEL IN A WIDE TEMPERATURE RANGE

Thermal diffusivity of the ferritic-martensitic steel 16Kh12V2FTaR in the temperature range from 296 to 1274 K has been measured by the laser flash method with the error of 2–4 %. The approximating equations have been obtained, the Curie point of steel and the temperatures of martensitic-austenite phase transitions have been determined.

Keywords: thermal diffusivity, Curie point, 16Kh12V2FTaR steel, laser flash method, high temperatures.