

Ю. М. Козловский<sup>1</sup>, С. В. Станкус<sup>1</sup>, Р. А. Хайрулин<sup>1,2</sup>, О. С. Яцук<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: [stankus@itp.nsc.ru](mailto:stankus@itp.nsc.ru)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ СТАЛИ ЧС-139 ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ\*

Представлены результаты исследования дилатометрическим методом фазовых превращений стали марки ЧС-139 в интервале температур 20–1 000°C. Погрешность определения термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) составляет  $(1,5-2) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ . Определены температуры фазовых превращений и изменения относительного удлинения при взаимных переходах аустенит-мартенсит, а также ТКЛР всех фаз. Дана интерпретация ряда особых точек на температурных зависимостях свойств.

*Ключевые слова:* фазовые превращения, коэффициент теплового расширения, сталь ЧС-139, твердое состояние, высокие температуры.

Сталь марки ЧС-139 относится к новому поколению конструкционных материалов для изготовления ТВЭЛов реакторов на быстрых нейтронах с максимальной рабочей температурой 700°C [1]. Широкий температурный интервал эксплуатации предполагает знание областей фазовой стабильности стали и изменения свойств при фазовых превращениях. Одним из наиболее чувствительных методов фазового анализа твердых материалов является дилатометрический метод. Он позволяет не только фиксировать температуры, но и определять изменение размеров при переходе из одного состояния в другое. Последнее является важной информацией для выбора параметров безопасной эксплуатации реакторов. Цель данной работы состояла в экспериментальном исследовании теплового расширения и фазовых превращений стали марки ЧС-139 в интервале температур от 20 до 1 000°C.

Измерения выполнены на дилатометре DIL-402С производства фирмы «Netzsch» (Германия) с держателем и толкателем из корунда в интервале температур 20–1 000°C при нагреве-охлаждении печи со скоростью 2 К/мин в атмосфере аргона чистотой 99,998 об. %. Температура измерялась платина-платинородиевой термопарой (тип S), расположенной в непосредственной близости от образца, с погрешностью не более 5°C. Число экспериментальных точек, которые были получены в ходе каждого нагрева (охлаждения), превышало 11 тысяч. Нулевой ход дилатометра измерялся в условиях, идентичных условиям основных экспериментов, на стандартном образце спеченного корунда длиной 25 мм и диаметром 6 мм, который входил в комплект DIL-402С.

Результаты измерений представлялись в виде температурной зависимости относительного удлинения образцов ( $\epsilon$ ):

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракт № 14.518.11.7015) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11-08-00785).

$$\varepsilon(T) = \frac{L - L_{20}}{L_{20}},$$

где  $L$  – длина образца при температуре  $T$ ,  $L_{20}$  – при  $20^\circ\text{C}$ . Наличие зависимости  $\varepsilon(T)$  позволяет рассчитать термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР):

$$\alpha(T) = \frac{1}{L_{20}} \left( \frac{\partial L}{\partial T} \right)_p = \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} \right)_p,$$

где  $p$  – давление. Подробно методика измерений и обработки результатов описаны в [2]. Погрешность вычисления ТКЛР определялась в экспериментах со стандартным образцом нержавеющей стали марки SRM 738 («Netzsch»). Измерения показали, что отличие наших и справочных данных выше  $100^\circ\text{C}$  не превышает  $(1,5-2) \cdot 10^{-7} \text{K}^{-1}$  и возрастает при приближении к комнатной температуре.

Образцы стали ЧС-139 имели форму цилиндров диаметром около  $3,5 \text{ мм}$  и длиной  $25 \text{ мм}$  с плоскопараллельными шлифованными торцами. Предварительная термическая обработка образцов состояла в нагреве до  $1000^\circ\text{C}$ , часовой выдержке и охлаждении со скоростью  $2 \text{ К/мин}$ .

На рис. 1, 2 приведены некоторые результаты измерений теплового расширения стали ЧС-139. Видно, что в циклах нагрева-охлаждения образец испытывает фазовые превращения с заметным изменением своих размеров. Определенные по максимуму и минимуму относительного удлинения стали в области переходов характерные температуры составили:

$$T_{1C-} = 155^\circ\text{C}; T_{1C+} = 296^\circ\text{C};$$

$$T_{1H-} = 792^\circ\text{C}; T_{1H+} = 836^\circ\text{C},$$

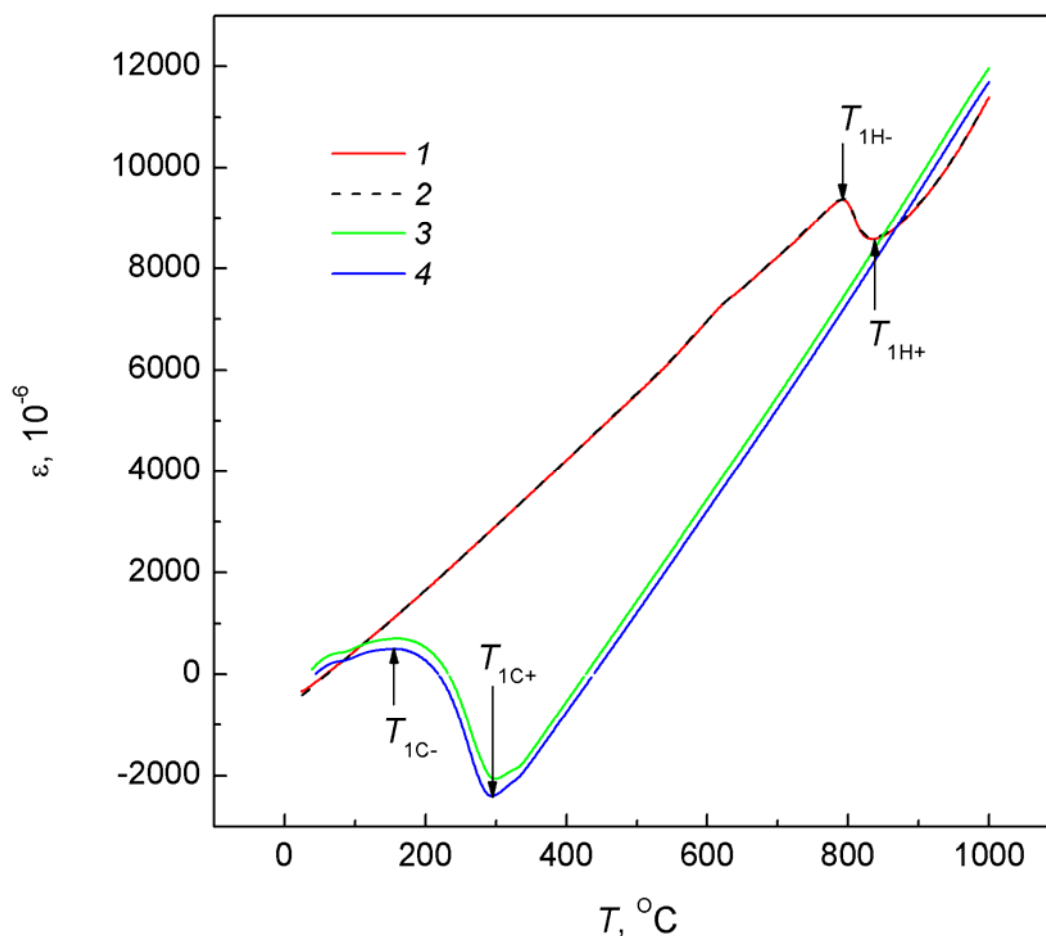


Рис. 1. Температурная зависимость относительного удлинения стали ЧС-139: 1, 2 – последовательные нагревы образца, 3, 4 – охлаждения

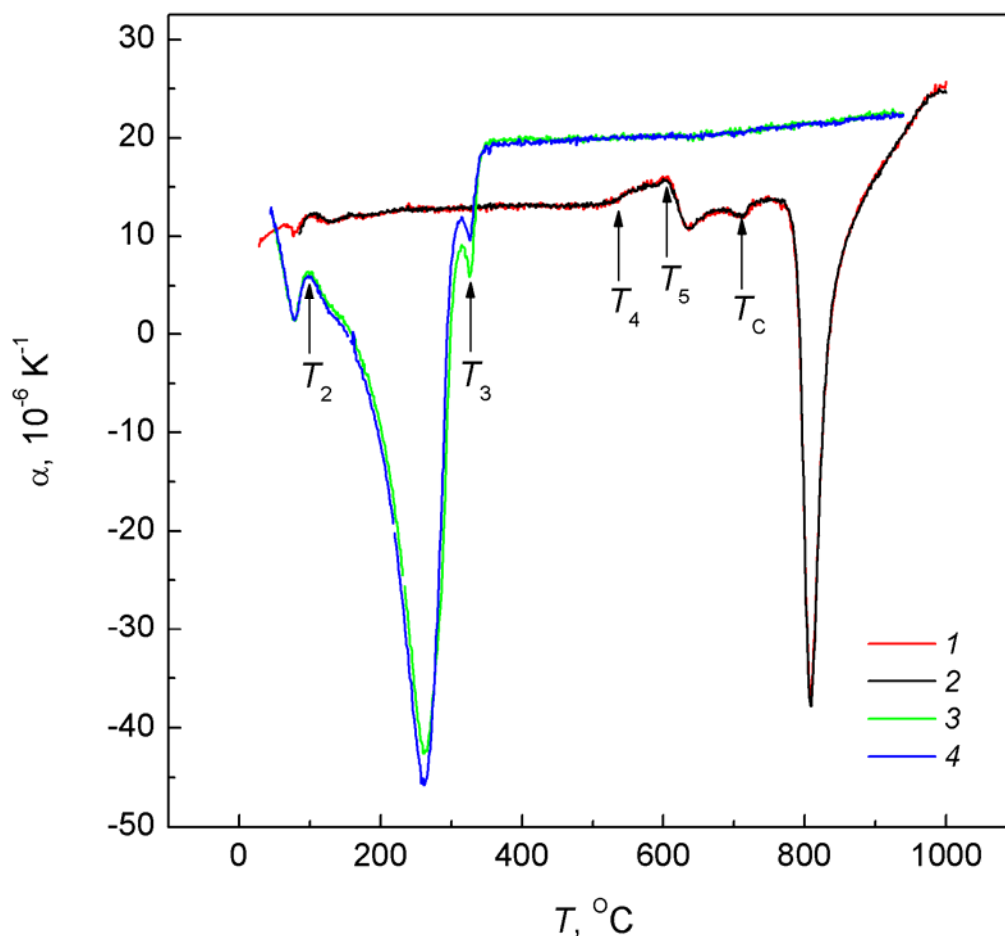


Рис. 2. Температурная зависимость термического коэффициента линейного расширения стали ЧС-139 (обозначения см. на рис. 1)

а изменения  $\varepsilon$  между ними:

$$\delta\varepsilon_{1C} = 0,28\%; \delta\varepsilon_{1H} = 0,08\%,$$

что соответствует изменению плотности в 0,84 и 0,24% соответственно. Интерпретация особенностей на температурной зависимости относительного удлинения не вызывает затруднений, так как ЧС-139 относится к разряду мартенситных 12%-х хромистых сталей с содержанием углерода 0,2 мас. % [3]. Согласно фазовой диаграмме железо-углерод [4] сталь ЧС-139 при температуре 1 000°C имеет структуру аустенита (твердый раствор углерода в железе с гранцентрированной кубической решеткой). При понижении температуры сплав переохлаждается ниже равновесной температуры распада части аустенита в феррит (раствор углерода в железе с объемно-цент-

рированной кубической решеткой) и переходит в метастабильное состояние. Последнее сохраняется до температуры  $T_{1C+}$ , при которой происходит образование мартенсита, т. е. пересыщенного раствора углерода в железе с объемно-центрированной тетрагональной структурой.

Измерения показали, что термический коэффициент линейного расширения гораздо более чувствителен к фазовому состоянию образца, чем относительное удлинение (см. рис. 2). Кроме глубоких минимумов, температуры которых лежат в интервале переходов, наблюдаемых на зависимости  $\varepsilon(T)$ , ТКЛР претерпевает аномальные изменения при следующих температурах:

$$T_2 = 99^\circ\text{C}; T_3 = 326^\circ\text{C}; T_4 = 535^\circ\text{C}; \\ T_5 = 604^\circ\text{C}; T_C = 710^\circ\text{C}.$$

Наличие аномалии ТКЛР с минимумом при  $T_C$ , по-видимому, связано с фазовым переходом стали из ферромагнитного в парамагнитное состояние. Во всяком случае значение  $T_C$  хорошо согласуется с температурой Кюри для сплава системы Fe-Cr с содержанием хрома 12 мас. % [4]. Дать однозначную интерпретацию появления других особенностей не представляется возможным, так как сталь ЧС-139 содержит заметное количество других легирующих элементов. Можно лишь констатировать наличие в стали ЧС-139 незначительных фазовых изменений при температурах  $T_2$ – $T_5$ .

Абсолютное значение величины термического коэффициента линейного расширения метастабильного аустенита при 500°C составило  $19,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , а мартенсита –  $13,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Последнее значение близко к ТКЛР других легированных мартенситных сталей [5].

### Список литературы

1. Шкабура И. Время быстрых // Росэнергоатом. 2009. № 12. С. 6–11.

2. Станкус С. В., Яцук О. С., Жмуриков Е. И., Тесchio L. Тепловое расширение искусственных графитов в интервале температур 293–1650 К // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 5. С. 637–642.

3. 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.

4. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. Н. П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1997. Т. 2. 1024 с.

5. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справочник. М.: Атомиздат, 1968. 484 с.

Материал поступил в редколлегию 19.02.2013

Yu. M. Kozlovskii, S. V. Stankus, R. A. Khairulin, O. S. Yatsuk

### DILATOMETRIC INVESTIGATION OF THE PHASE TRANSFORMATIONS IN ChS-139 STEEL

The results of the dilatometric investigation of the phase transformations in ChS-139 steel over the temperature range from 20 to 1 000°C are presented. The error in the coefficient of linear thermal expansion (TCLE) is  $(1.5-2) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ . The temperatures of the phase transformations, the changes of relative expansion on mutual austenite-martensite transitions, and TCLE of all phases are determined. An interpretation of a number of specific points in the temperature dependences of the properties is given.

*Key words:* phase transformations, thermal expansion coefficient, steel ChS-139, solid state, high temperatures.