

УДК 536.413: 669.14.018.44

Тепловое расширение стали ЧС-139 в интервале температур 20–720 °С*

С.В. Станкус, Ю.М. Козловский, О.С. Яцук, О.И. Верба

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: stankus@itp.nsc.ru

Представлены результаты исследования теплового расширения стали марки ЧС-139 в интервале температур 20–720 °С. Измерения проведены dilatометрическим методом на установке DIL-402С производства фирмы NETZSCH (Германия) с погрешностью $(1,5-2) \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. Получены аппроксимационные зависимости термического коэффициента линейного расширения от температуры, рассчитаны справочные таблицы. Показано существование аномального изменения коэффициента расширения выше 550 °С. Дано объяснение этого явления.

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

Новая жаропрочная ферритно-мартенситная 12 %-ая хромистая сталь марки ЧС-139 (20X12НМВБФАР) рассматривается в качестве перспективного оболочечного материала для изготовления ТВЭЛов реакторов на быстрых нейтронах с максимальной рабочей температурой 700 °С [1]. Теплофизические свойства ЧС-139 исследованы недостаточно подробно, хотя такие данные необходимы для проведения теплогидравлических расчетов реакторов.

Цель настоящей работы состояла в экспериментальном исследовании теплового расширения стали марки ЧС-139 в интервале температур от 20 до 720 °С.

Тепловое расширение стали исследовалось на dilatометре DIL-402С производства фирмы NETZSCH (Германия) с держателем и толкателем из корунда в интервале температур 20–720 °С при нагреве–охлаждении печи со скоростью 2 К/мин и 30-минутной изотермической выдержке при максимальной температуре. Измерения проводились каждые 3 с, что обеспечивало шаг по температуре 0,1 °С и позволяло получить около семи тысяч экспериментальных точек за один нагрев (охлаждение). В качестве защитной атмосферы использовался аргон чистотой 99,998 об. %, дополнительно очищенный системой VI-GAScleaner (ИК СО РАН). Температура измерялась платина-платинородиевой термпарой (тип S), расположенной в непосредственной близости от образца.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение 8073) и РФФИ (проект № 12-08-00192_a).

Нулевой ход (НХ) дилатометра определялся на трубчатых образцах платины Пл 99,93 длиной 25 мм и диаметром 6/4,8 мм в условиях, идентичных условиям основных экспериментов. Расчет проводился по формуле, аналогичной приведенной в работе [2]:

$$\text{НХ}(T) = \Delta L_{\text{изм}}(T) - \Delta L_{\text{оп}} - \Delta L_{\text{СО}}(T) + \Delta L_{\text{дер}}(T). \quad (1)$$

Здесь T — температура, $\Delta L_{\text{изм}}$ — измеренное значение удлинения, $\Delta L_{\text{оп}}$ — удлинение при температуре $T_{\text{оп}}$; $\Delta L_{\text{СО}}$, $\Delta L_{\text{дер}}$ — табличное удлинение стандартного образца (платина) и образца из материала держателя (Al_2O_3) длиной (при $T_{\text{оп}}$), равной длине стандартного образца в интервале от $T_{\text{оп}}$ до T . В качестве опорной ($T_{\text{оп}}$) была выбрана температура 60 °С, а не исходная температура образца $T_{\text{нач}}$, которая практически совпадает с температурой в помещении. Последняя может изменяться в достаточно широких пределах, что не позволяет использовать нулевой ход для обработки экспериментов с различными $T_{\text{нач}}$. Величина $\Delta L_{\text{оп}}$ находилась аппроксимацией измеренных значений удлинения в интервале 50–75 °С. Использовались табулированные значения относительного удлинения платины [3] и корунда (NETZSCH). Выбор платины в качестве стандартного образца связан с тем, что ее теплопроводность (λ) близка к теплопроводности стали, в то время как теплопроводность корунда имеет гораздо более низкое значение. Определенный таким образом нулевой ход воспроизводился в пределах 0,1 мкм.

Расчет истинного удлинения ΔL стали проводился по формуле:

$$\Delta L(T) = \Delta L_{\text{изм}}(T) - \Delta L_{\text{оп}} - \text{НХ}(T) + \Delta L_{\text{дер}}(T), \quad (2)$$

где в качестве опорной температуры также использовалось значение в 60 °С. Результаты измерений представлялись в виде температурной зависимости относительного удлинения образцов (ε) при нагреве или охлаждении:

$$\varepsilon(T) = (L - L_{20})/L_{20}, \quad (3)$$

где L — длина образца при температуре T , L_{20} — при 20 °С. Для определения L и L_{20} зависимость $\Delta L(T)$ экстраполировалась от 60 °С к 20 °С для каждого нагрева или охлаждения. Наличие зависимости $\varepsilon(T)$ позволяет рассчитать термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР):

$$\alpha(T) = \frac{1}{L_{20}} \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_P = \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial T} \right)_P, \quad (4)$$

где P — давление.

Образцы стали имели форму цилиндров диаметром около 3,5 мм и длиной 25 мм с плоскопараллельными шлифованными торцами. Масса образцов измерялась на аналитических весах AND GH 300 с погрешностью менее 0,3 мг, размеры — электронным длинномером Tesa Digico 10, который поверялся по образцовым мерам непосредственно перед измерениями с погрешностью порядка 2 мкм. Предварительная термическая обработка образцов состояла в нагреве до 1000 °С, часовой выдержке и охлаждении со скоростью 2 К/мин.

Погрешность определения ТКЛР определялась в экспериментах со стандартным образцом нержавеющей стали марки SRM 738 (NETZSCH). Измерения показали, что отличие наших и справочных данных выше 100 °С не превышает $(1,5-2) \times 10^{-7} \text{ К}^{-1}$ и возрастает при приближении к комнатной температуре.

Обработка первичных данных удлинение–температура для каждого нагрева (охлаждения) проводилась по следующей схеме. Из всего массива выделялась каждая n -ая точка с таким расчетом, чтобы число элементов выборки не превышало 1000. Это

упрощало проведение расчетов и не приводило к значимому увеличению случайных погрешностей аппроксимации. Для получения температурной зависимости коэффициента линейного расширения данные по относительному удлинению численно дифференцировались с помощью выражения:

$$\alpha(T_i) = \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{T_{i+1} - T_i} + \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{T_i - T_{i-1}} \right), \quad (5)$$

где $\varepsilon_i = \varepsilon(T_i)$ — относительное удлинение стали при температуре T_i . Реальный интервал определения ТКЛР ($T_{i+1} - T_{i-1}$) не превышал $1,5^\circ\text{C}$, поэтому расчет по формуле (5) можно было применять даже в области сильного изменения коэффициента расширения. На рис. 1 представлены типичные данные, полученные с использованием данной процедуры, а на рис. 2 — сопоставление результатов для различных термических циклов. В последнем случае (для наглядности) первичные данные по ТКЛР были сглажены методом Савицкого–Голея полиномом второй степени по 25 точкам [4]. Наличие аномалии ТКЛР с минимумом при $T_{\min} = 715^\circ\text{C}$ связано с фазовым переходом стали из ферромагнитного в парамагнитное состояние. Гистерезиса T_{\min} не наблюдалось, а различная глубина минимума ТКЛР при нагревах и охлаждениях, по-видимому, связана с различной степенью завершения фазового превращения. Значение T_{\min} хорошо согласуется с температурой Кюри для сплава системы Fe-Cr с содержанием хрома 12 мас. % [5].

Первичные данные по ТКЛР аппроксимировались методом наименьших квадратов полиномами вида:

$$\alpha(T) \times 10^6 = \sum_{i=0}^k A_i T^i, \quad (6)$$

где T — температура в градусах Цельсия. Из-за наличия аномального изменения коэффициента теплового расширения стали ЧС-139 обработка была выполнена отдельно в двух областях: выше и ниже 535°C . Отличие усредненных данных по ТКЛР, полученных при двух нагревах и двух охлаждениях до 700°C , не превышало 1%, поэтому совместная обработка всех результатов не проводилась и последующие данные приведены для кривой, лежащей наиболее близко к средневзвешенным значениям:

$$\alpha_1(T) = 10,19 + 0,00711 T - 2,261 \times 10^{-6} T^2 \quad (7)$$

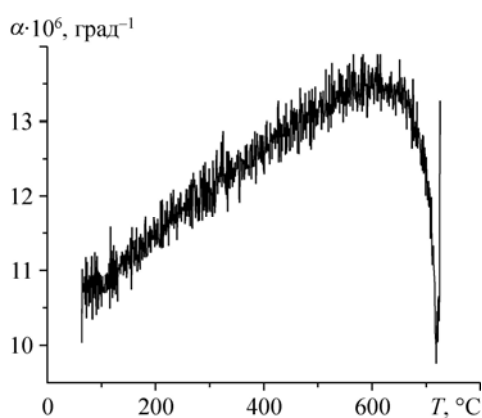


Рис. 1. Результаты измерений ТКЛР стали марки ЧС-139, полученные при охлаждении образца.

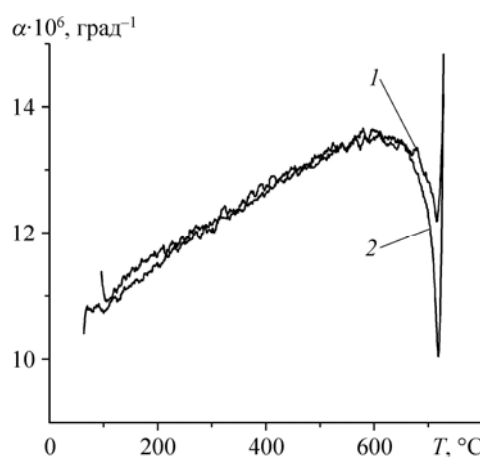


Рис. 2. Воспроизводимость данных по ТКЛР стали марки ЧС-139 в цикле нагрева-охлаждения. 1 — нагрев, 2 — охлаждение.

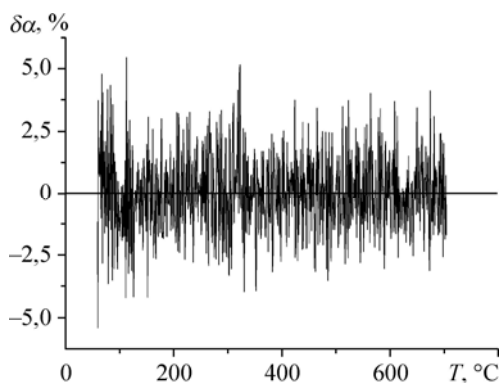


Рис. 3. Отклонение экспериментальных значений ТКЛР стали марки ЧС-139 от аппроксимирующих зависимостей (7), (8).

для интервала 20–535 °С и

$$\alpha_2(T) = -508,37 + 3,6601 T - 0,0096436 T^2 + 1,1305 \times 10^{-5} T^3 - 4,9728 \times 10^{-9} T^4 \quad (8)$$

для интервала 535–700 °С. Отклонение первичных данных от сглаживающих зависимостей приведено на рис. 3. Случайная погрешность ТКЛР по формулам (7) и (8)

для доверительной вероятности 95 % составляет 0,15–0,4 % ($2 \times 10^{-8} - 4,6 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$) для первой области и 0,3–0,8 % ($4 \times 10^{-8} - 10 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$) для второй. В таблице приведены рекомендуемые значения термического коэффициента линейного расширения и относительного удлинения стали ЧС-139. Последнее получено интегрированием уравнений (7) и (8), а данные ниже 60 °С — экстраполяцией.

Абсолютные значения ТКЛР стали ЧС-139 (см. табл.) оказались близки к коэффициентам теплового расширения легированных мартенситных сталей [6].

Таблица

Рекомендуемые значения термического коэффициента линейного расширения и относительного удлинения стали марки ЧС-139

$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$\alpha \times 10^6, \text{ K}^{-1}$	$\varepsilon \times 10^6$
20	10,33	0
50	10,54	313
100	10,88	848
150	11,20	1400
200	11,52	1968
250	11,82	2552
300	12,12	3151
350	12,40	3764
400	12,67	4390
450	12,93	5030
500	13,18	5683
535	13,34	6147
550	13,39	6348
600	13,48	7020
650	13,34	7693
700	12,12	8336

Список литературы

1. Шкабура И. Время быстрых // РОСЭНЕРГОАТОМ. 2009. № 12. С. 6–11.
2. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974. 294 с.
3. Kirby R.K. Platinum — a thermal expansion reference material // Int. J. Thermophys. 1991. Vol. 12, No. 4. P. 679–685.
4. Orfanidis S.J. Introduction to signal processing. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1996. 356 p.
5. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Т. 2. М.: Машиностроение, 1997. 1024 с.
6. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: справочник. М.: Атомиздат, 1968. 484 с.

Статья поступила в редакцию 13 августа 2012 г.