

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 536.413

**Тепловое расширение Hastelloy C276
в низкотемпературной области***

Ю.М. Козловский, С.В. Станкус

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

E-mail: stankus@itp.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования дилатометрическим методом теплового расширения сплава Hastelloy C276 в интервале температур 100–370 К. Получены температурные зависимости термических свойств. Проведено сравнение полученных результатов с данными для теплового расширения сверхпроводящих лент марок «Amperium» и «СуперОкс».

Ключевые слова: суперсплав, Hastelloy C276, сверхпроводимость, термический коэффициент линейного расширения, относительное удлинение, дилатометрический метод, низкие температуры.

Hastelloy C276 — востребованный и широко распространенный сплав, относящийся к группе суперсплавов с высоким содержанием никеля и хрома. Он обладает высокой коррозионной стойкостью, жаропрочностью [1] и хорошей свариваемостью [2]. Среди других возможностей применения отдельно следует выделить использование Hastelloy C276 в качестве немагнитной металлической подложки, которая обеспечивает механическую прочность высокотемпературных многослойных сверхпроводящих лент [3]. Для согласования теплового расширения слоев необходимо знать их термические свойства в области отрицательных температур, однако авторам не удалось обнаружить в литературе достоверных данных для Hastelloy C276 при температурах ниже 293 К. Цель настоящей работы заключается в исследовании поведения теплового расширения сплава Hastelloy C276 в низкотемпературной области.

Измерения выполнялись дилатометрическим методом на установке DIL-402С в интервале температур 100–370 К со скоростью 2 К/мин. Исследуемый образец представлял собой ленту длиной 21 мм, шириной 4 мм и толщиной 53 мкм. Четыре последовательных

* Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Российской Федерации в лице Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2020-770).

эксперимента проводились с использованием кварцевой арматуры в инертной атмосфере гелия (99,995 об. %). Для предотвращения изгиба исследуемой ленты при изменении температуры образец помещался в специальный держатель пленок [4].

Первичные данные представлялись в виде температурной зависимости относительного удлинения (ε) образцов:

$$\varepsilon(T) = (L(T) - L_0) / L_0,$$

где L_0 и $L(T)$ — длина образца при 293,15 К и T соответственно. Термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР) α имел вид:

$$\alpha(T) = \frac{1}{L_0} \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_p = \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial T} \right)_p.$$

Температурная зависимость ТКЛР получена численным дифференцированием данных $\varepsilon(T)$. Методика проведения измерений и обработки результатов подробно описывалась в работах [4, 5].

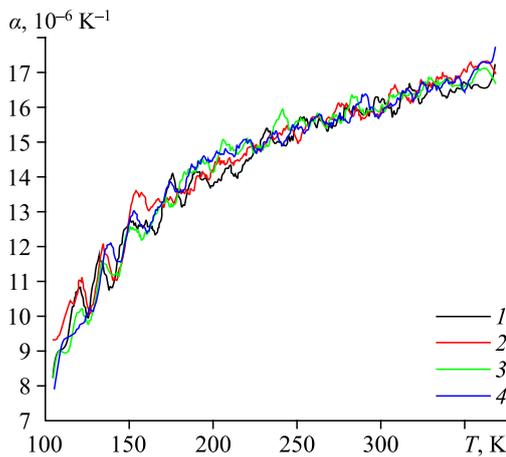
Систематическая погрешность ТКЛР определялась в экспериментах с образцом ленты молибдена толщиной 160 мкм в условиях, идентичных условиям основных экспериментов с Hastelloy C276. Оцениваемая погрешность измерений не превышает 3 %.

На рис. 1 представлены исходные данные по тепловому расширению ленты Hastelloy C276, сглаженные методом Савицкого–Голея. Как видно из графика, результаты экспериментов хорошо согласуются между собой.

Рекомендуемые значения коэффициента теплового расширения Hastelloy C276 получены в результате совместной обработки всех данных методом наименьших квадратов степенными полиномами от температуры:

$$\alpha(T) = \sum_{i=0}^k A_i T^i. \tag{1}$$

Первичные данные не удалось обработать единой зависимостью (1), поэтому интервал измерений был разбит на два: выше и ниже 180 К. При этой температуре наблюдалось изменение характера температурной зависимости ТКЛР. Коэффициенты уравнения (1) представлены в таблице. Относительное удлинение рассчитано интегрированием аппроксимационных уравнений с дополнительным условием равенства нулю значения $\varepsilon(T)$ при $T = 293,15$ К.



изменение характера температурной зависимости ТКЛР. Коэффициенты уравнения (1) представлены в таблице. Относительное удлинение рассчитано интегрированием аппроксимационных уравнений с дополнительным условием равенства нулю значения $\varepsilon(T)$ при $T = 293,15$ К.

Рис. 1. Первичные данные по термическому коэффициенту линейного расширения ленты сплава Hastelloy C276, полученные при последовательных нагревах. 1 — первый нагрев, 2 — второй нагрев, 3 — третий нагрев, 4 — четвертый нагрев.

Таблица
Коэффициенты уравнения (1)

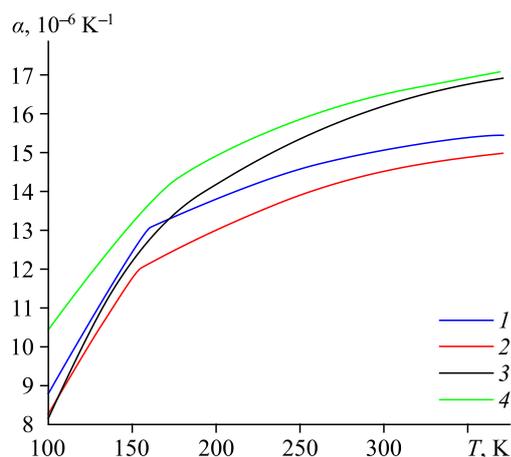
Интервал, К	$A_0, 10^{-6} \text{ К}^{-1}$	$A_1, 10^{-8} \text{ К}^{-2}$	$A_2, 10^{-11} \text{ К}^{-3}$
105–180	–6,5108	$19,141 \cdot 10^{-2}$	$-44,203 \cdot 10^{-5}$
180–368	6,4106	$5,105 \cdot 10^{-2}$	$-6,123 \cdot 10^{-5}$

Рис. 2. Сопоставление данных по ТКЛР сверхпроводящих лент [4] и основных металлических слоев.
1 — лента марки «Amperium»,
2 — лента марки «СуперОкс»,
3 — сплав Hastelloy C276, 4 — медь [9].

На рис. 2 приведено сопоставление полученных данных с термическим коэффициентом линейного расширения сверхпроводящих лент (СПЛ), исследованных в работе [4], и меди, которая также является одним из основных металлических слоев СПЛ. Видно, что ниже 180 К ТКЛР Hastelloy C276 практически

совпадает с термическим коэффициентом линейного расширения СПЛ, а выше имеет заметно большие значения, приближаясь к ТКЛР меди. Следует обратить внимание, что в области 180 К изменяется вид температурной зависимости теплового расширения сплава, а также наблюдается излом $\alpha(T)$ сверхпроводящих лент. Такое соотношение ТКЛР Hastelloy C276 и СПЛ является неожиданным. Можно лишь предположить, что оно связано с возможной анизотропией свойств сплава [6], или его взаимодействием с промежуточными оксидными слоями [7], или различной термообработкой лент [8].

Отметим, что, несмотря на заметное отличие ТКЛР сверхпроводящих лент и Hastelloy C276, разница в их относительном удлинении при 100 К не превышает 0,006–0,02 %.



Список литературы

1. Park J.-H., Chen L., Goretta K.C., Koritala R.E., Balachandran U. Oxidation of Hastelloy C276 // IP Conference Proceedings. 2002. Vol. 48. P. 495–502.
2. Pandit S., Joshi V., Adrawal M., Mano M. Investigations on mechanical and metallurgical properties of dissimilar continuous gta welds of monel 400 and C-276 // Procedia Engng. 2014. Vol. 75. P. 61–65.
3. Zhu J., Chen S., Jin Z. Progress on second-generation high-temperature superconductor tape targeting resistive fault current limiter application // Electronics. 2022. Vol. 11. P. 297.
4. Козловский Ю.М., Станкус С.В. Тепловое расширение сверхпроводящих лент в области низких температур // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28, № 4. С. 641–644.
5. Козловский Ю.М., Станкус С.В. Плотность и тепловое расширение диспрозия в интервале температур 110–1950 К // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 4. С. 521–528.
6. Mehta K.K., Mukhopadhyay P., Mandal P.K., Singh A.K. Mechanical properties anisotropy of cold-rolled and solution annealed ni-based hastelloy C-276 alloy // Metallurgical and Materials Transactions A. 2014. Vol. 45A. P. 3393–3504.
7. Qi Q., Liu Y., Zhang H., Zhao J., Gai L., Huang Z. The TiC/Ni–Cr Composites with Low Thermal Expansion and Electrical Resistivity Applied for IT-SOFC Interconnects // Advanced Engng Materials. 2016. No. 18, Iss. 8. P. 1504–1510.
8. Qiu Z., Wu B., Wang Z., Wexler D., Carpenter K., Zhu H., Muransky O., Zhang J., Li H. Effects of post heat treatment on the microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured Hastelloy C276 alloy // Materials Characterization. 2021. Vol. 177. Art. No. 111158.
9. White G.K., Roberts R.B. Problems in pressing key values: linear expansivity of copper // High Temp. High Press. 1980. Vol. 12, No. 3. P. 311–316.

Статья поступила в редакцию 14 июня 2022 г.,
после доработки — 27 июня 2022 г.,
принята к публикации 2 сентября 2022 г.