

УДК 536.413

Тепловое расширение сверхпроводящих лент в области низких температур*

Ю.М. Козловский, С.В. Станкус

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

E-mail: stankus@itp.nsc.ru

Представлены результаты дилатометрического исследования термического коэффициента линейного расширения сверхпроводящих лент «Amperium» и «СуперОкс» в интервале температур 100–370 К. Получены температурные зависимости и рассчитаны справочные таблицы рекомендуемых значений термических свойств. Исследовано влияние деформации пленок на результаты измерений. Разработана конструкция держателя образцов, устраняющая изгиб лент. Проведено сравнение термического коэффициента линейного расширения лент с тепловым расширением металлических слоев пленок. Показано, что разница относительного расширения в интервале температур от 100 до 293 К не превышает 0,05 %.

Ключевые слова: сверхпроводящие ленты, Amperium, СуперОкс, термический коэффициент линейного расширения, относительное удлинение, дилатометрический метод.

Сверхпроводящие пленки на основе высокотемпературных сверхпроводящих материалов находят все более широкое применение для решения практических задач. Кроме традиционного использования сверхпроводников для создания мощных магнитных полей, они используются в различном энергетическом оборудовании. Так, в ряде стран, включая Россию, ведутся работы по созданию сверхпроводящего авиационного двигателя, который позволит существенно увеличить топливную эффективность самолетов и уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду [1]. Разработанные сверхпроводящие ленты второго поколения позволили достичь плотности критического тока при азотных температурах до нескольких МА/см² и его рекордной устойчивости в магнитных полях. Сами ленты, обычно шириной 4–12 мм, толщиной 100–400 мкм и длиной в сотни метров, представляют многослойную (до 10 и более слоев) структуру, основными составляющими которой являются немагнитная металлическая подложка из сплавов на основе никеля (например Hastelloy C276) толщиной 10–100 мкм, которая обеспечивает механическую прочность ленты; сверхпроводник толщиной в единицы мкм; микронный слой серебра, который защищает слой от механических повреждений и взаимодействия с атмосферными газами и медью; несколько нанометровых оксидных слоев для согласования параметров кристаллической решетки подложки и сверхпроводника, а также упорядочения структуры последнего; медное герметизирующее и шунтирующее покрытие

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2020-770).

с двух сторон ленты (5–40 мкм). В ряде случаев лента покрывается электроизоляционным полимерным покрытием.

Достоверные данные по тепловому расширению сверхпроводящих лент (СПЛ) в интервале температур их использования необходимы для правильного выбора материалов и конструкций сверхпроводящих установок, т.к. возникновение механических напряжений уменьшает ресурс работы СПЛ и в предельном случае может привести к разрушению сверхпроводящего слоя. В представленной работе экспериментально исследуются относительное удлинение ε и термический коэффициент линейного расширения α (ТКЛР) двух сверхпроводящих лент: марки «Amperium» производства компании American Superconductor (AMSC) и Российской «СуперОкс». Рассматривались ленты одинаковой ширины — около 4 мм, но разной толщины: «Amperium» — 319 мкм, «СуперОкс» — 129 мкм.

Измерения проводились на горизонтальном дилатометре DIL-402С производства фирмы NETZSCH (Германия) с держателем и толкателем, изготовленными из плавленого кварца, в интервале температур 100–370 К. Охлаждение печи осуществлялось с помощью жидкого азота. Перед экспериментом установка вакуумировалась (1 Па) и заполнялась гелием (99,995 об. %). Скорость нагрева–охлаждения печи составляла 2 К/мин, а изотермическая выдержка при максимальной и минимальной температурах — 15 минут. Такой режим позволял получить при каждом нагреве (охлаждении) более тысячи экспериментальных точек. Результаты основных измерений представлялись в виде температурной зависимости относительного удлинения образцов:

$$\varepsilon(T) = \frac{L - L_{293}}{L_{293}}, \quad (1)$$

где L и L_{293} — длина образца при температуре T и 293,15 К соответственно. Наличие зависимости $\varepsilon(T)$ позволяет рассчитать ТКЛР как

$$\alpha(T) = \frac{1}{L_{293}} \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_P = \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial T} \right)_P, \quad (2)$$

где P — давление. Значения $\alpha(T)$ определялись численным дифференцированием измеренных значений относительного удлинения $\varepsilon(T)$:

$$\alpha(T_i) = \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{T_{i+1} - T_i} + \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{T_i - T_{i-1}} \right), \quad (3)$$

где $\varepsilon_i = \varepsilon(T_i)$ — относительное удлинение исследуемого образца при температуре T_i . Подробно методика проведения измерений и обработки результатов описывались в работах [2–4].

Первичные данные по ТКЛР ленты «Amperium» представлены на рис. 1. Первая серия измерений проводилась с держателем тонких пленок фирмы NETZSCH. На температурной зависимости α были зафиксированы аномалии ТКЛР, которые отсутствовали в экспериментах с лентой «СуперОкс». Было высказано предположение, что появление минимумов и максимумов ТКЛР ленты «Amperium» связано с «биметаллическим» эффектом, т.е. с изгибом ленты из-за разного теплового расширения подложки и медных слоев. Чтобы исключить этот эффект был разработан новый держатель, который не только фиксировал пленку между основным держателем и толкателем дилатометра, но и предотвращал ее изгиб при изменении температуры. В экспериментах с его использованием (рис. 1, вторая серия) были получены данные по ТКЛР без экстремумов,

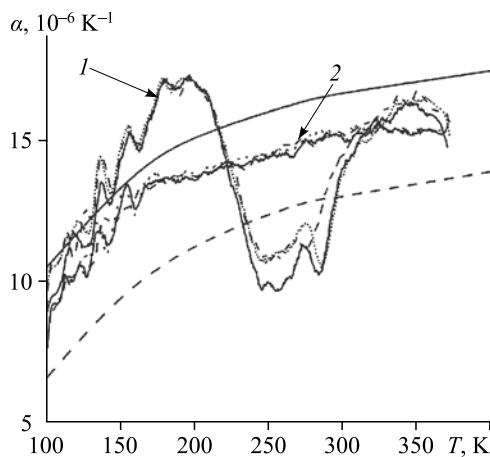


Рис. 1. Первичные данные по термическому коэффициенту линейного расширения сверхпроводящей ленты «Amperium», полученные при последовательных нагревах.

1 и 2 — первая и вторая серии измерений соответственно; сплошная кривая — данные для меди [5], штриховая — для никеля [6].

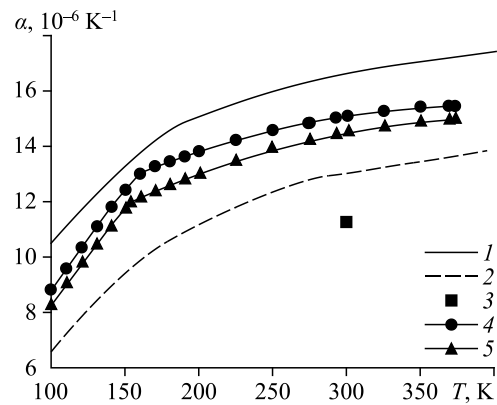


Рис. 2. Сопоставление полученных и литературных данных по термическому коэффициенту линейного расширения.

1 — медь [5], 2 — никель [6], 3 — Hastelloy C276 [7]; 4, 5 — данные настоящей работы для «Amperium» и «СуперОкс» соответственно.

а зависимость $\alpha(T)$ оказалась близкой к таковой для ленты «СуперОкс» (рис. 2). На температурных зависимостях ТКЛР обеих лент — «Amperium» и «СуперОкс» — наблюдались изломы при $T = 159$ К и $T = 153$ К соответственно.

Для получения рекомендуемых значений по тепловому расширению СПЛ первичные данные по ТКЛР при нагревах были объединены и совместно обработаны методом наименьших квадратов степенными полиномами от температуры. Относительное удлинение лент рассчитывалось интегрированием аппроксимационных уравнений с дополнительным условием равенства нулю значения $\varepsilon(T)$ при 293,15 К. Сопоставление полученных данных с термическими коэффициентами линейного расширения металлов, входящих в состав СПЛ, приведено на рис. 2. Видно, что ТКЛР лент меньше коэффициента линейного расширения меди, но больше ТКЛР никеля и Hastelloy C276 (для последнего данных по ТКЛР при низких температурах обнаружить не удалось). Это указывает на то, что при низких температурах слои лент находятся в напряженном состоянии. Однако хорошая воспроизводимость результатов измерений в различных термических циклах, а также незначительная разница в относительном удлинении лент от ε меди и никеля (при 100 К меньше 0,05 %) позволяют утверждать, что возникающие в лентах напряжения не превышают пределы упругости металлов. С другой стороны, наличие излома на температурных зависимостях СПЛ, который отсутствует у Cu и Ni, возможно связано с частичным снятием напряжений в слоях.

Анализ полученных данных в первых сериях измерений на изгибающихся образцах может дать ценную информацию о температурных интервалах накопления напряжений в лентах и их снятия.

Список литературы

1. Dezhin D., Ivanov N., Kovalev K., Kobzeva I., Semenihih V. System approach of usability of HTS electrical machines in future electric aircraft // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2018. Vol. 28, No. 4. P. 5201905-1–5201905-5.
2. Козловский Ю.М., Станкус С.В. Тепловое расширение окиси бериллия в интервале температур 20–1550 °С // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, № 4. С. 563–567.
3. Козловский Ю.М., Станкус С.В. Плотность и тепловое расширение самария в широком интервале температур // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 4. С. 625–631.

4. Абдуллаев Р.Н., Хайруллин Р.А., Станкус С.В., Козловский Ю.М. Плотность и тепловое расширение сплава Inconel 718 в твердом и жидком состояниях // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 5. С. 837–840.
5. 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.
6. Touloukian Y.S., Kirby R.K., Taylor R.E., Desai P.D. Thermal expansion: metallic elements and alloys. Thermophys. Prop. Matter. N.Y., Washington: IFI/Plenum, 1975. Vol. 12. 1348 p.
7. ASME BPVC Section II Part D (Properties). Фрагмент: <http://www.metalspiping.com/thermal-expansion-coefficients-for-hastelloy-c276-at-elevated-temperatures.html>.

*Статья поступила в редакцию 3 июня 2021 г.,
после доработки — 3 июня 2021 г.,
принята к публикации 30 июня 2021 г.*