

Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 12. С. 559–569
Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 12, pp. 559–569

Научная статья
УДК 538.955
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=184346>
EDN: <https://www.elibrary.ru/EJCHOP>

Экспериментальные и численные исследования тепловых характеристик ленточных сверхпроводящих композитов на основе соединения $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

И.В. Мартиросян^{1✉}, Д.А. Александров², А.Ю. Малявина³, С.В. Покровский⁴,
Р.Г. Батулин⁵

^{1,2,3,4}Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», Москва, Российская Федерация

^{1,5}Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань, Российская Федерация

¹mephizic@gmail.com✉

Аннотация. Современные ленточные высокотемпературные сверхпроводники обладают сложной слоистой архитектурой и выраженной анизотропией тепловых свойств, что затрудняет численный анализ крупномасштабных систем на их основе с использованием методов гомогенизации. Для решения данной проблемы необходимо проведение комплекса экспериментальных и численных исследований, направленных на изучение особенностей распространения тепла в ВТСП композитах при поперечном тепловом потоке. Настоящая работа посвящена определению эффективных тепловых характеристик (теплопроводности и теплоемкости) ВТСП лент и сборок в широком диапазоне температур. Измерения выполнены с использованием режима измерения тепловых свойств образца Thermal Transport Option (ТТО) установки для измерения физических свойств PPMS-9 (Quantum Design), а численное выполнено моделирование методом конечных элементов (COMSOL Multiphysics) с учетом слоистой архитектуры композита. В результате получены экспериментальные и расчетные данные, позволяющие прогнозировать тепловое поведение ВТСП композитов для проектирования и оптимизации сверхпроводящих систем различного масштаба.

Ключевые слова: ленточные ВТСП композиты, анизотропия тепловых свойств, численное моделирование, термическая стабильность, анизотропия теплопроводности, эффективная теплоемкость

Финансирование. Измерения теплоемкости, теплопроводности и численное моделирование ВТСП композитов выполнены в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Измерения теплоемкости подложки Hastelloy C-276 выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10088, <https://rscf.ru/project/22-72-10088/>.

Для цитирования. Мартиросян И.В., Александров Д.А., Малявина А.Ю., Покровский С.В., Батулин Р.Г. Экспериментальные и численные исследования тепловых характеристик ленточных сверхпроводящих композитов на основе соединения $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 12. С. 559–569. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=184346>

Original article

Experimental and numerical studies of thermal characteristics of tape superconducting composites based on $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

I.V. Martirosyan¹, D.A. Alexandrov², A.Yu. Malyavina³, S.V. Pokrovsky⁴, R.G. Batulin⁵

^{1,2,3,4}*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation*

^{1,5}*Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation*

¹*mephizic@gmail.com*

Abstract. Modern high-temperature superconductors based on $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) possess a complex layered architecture and pronounced anisotropy of thermal properties, complicating the numerical analysis of large-scale systems using homogenization methods. To address this challenge, comprehensive experimental and numerical studies were conducted in this work to investigate heat propagation in YBCO composites under transverse heat flow across a wide temperature range. The samples are circular fragments (6,4 mm diameter) of HTS tapes with a multilayer structure: a 1- μm YBCO layer on a Hastelloy C-276 substrate (0,1 mm thick), silver layers (2 μm), and epoxy adhesive. For heat capacity measurements, samples also included a 5- μm copper coating on both sides. The experimental part involved measuring thermal conductivity and heat capacity using the Thermal Transport Option (TTO) of the PPMS-9 system under high vacuum ($\sim 10^{-4}$ Torr). Thermal conductivity was determined by applying a square-wave heat pulse to one end of the sample and measuring temperature gradients (ΔT) between heated and cooled sections. Heat capacity was measured via a relaxation method, analyzing post-heating temperature dynamics to determine specific heat. Numerical modeling was performed using the finite element method in COMSOL Multiphysics. The results revealed that the effective transverse thermal conductivity of the HTS tape is primarily governed by the Hastelloy substrate. However, below 30 K, the high thermal conductivity of silver significantly contributes to the composite's effective thermal conductivity. The effective heat capacity of the HTS tape is also dominated by the substrate, which accounts for over 90 % of the composite's mass. The contributions of YBCO, silver, and copper layers become noticeable only above 50 K due to their lower volumetric heat capacity. Numerical and experimental data agree within an error margin of less than 10 %. Modeling further showed that the low thermal conductivity of the epoxy adhesive ($\sim 0,2$ W/(m \times K) at 10 K) has a negligible impact on the experimental results for effective thermal conductivity. The findings highlight the critical role of substrate properties in the thermal characteristics of HTS tapes. The obtained temperature-dependent thermal conductivity and heat capacity data provide a foundation for optimizing the design of superconducting devices, such as resistive fault current limiters and fusion reactor magnets. Future work will integrate these results into large-scale numerical models of quench propagation and thermal-electric stability in HTS systems to account for the material's thermal anisotropy. Overall, the experimental and computational data enable accurate prediction of thermal behavior in YBCO composites, facilitating the design and optimization of superconducting systems across various scales.

Keywords: tape HTS composites, anisotropy of thermal properties, numerical modeling, thermal stability, anisotropy of thermal conductivity, effective heat capacity

Funding. Measurements of heat capacity, thermal conductivity and numerical modeling of high-temperature composite materials were carried out within the framework of the of the State Assignment (project FSWU-2022-0013) with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Measurements of the heat capacity of the Hastelloy C276 substrate were carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 22-72-10088, <https://rscf.ru/project/22-72-10088/>

For citation. Martirosyan I.V., Alexandrov D.A., Malyavina A.Yu., Pokrovsky S.V., Batulin R.G. Experimental and numerical studies of thermal characteristics of tape superconducting composites based on $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. *Thermal processes in engineering*. 2024, vol. 16, no. 12, pp. 559–569. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=184346>

1. Введение

Технология создания крупномасштабных магнитных и энергетических систем на основе низкотемпературных сверхпроводников на сегодняшний день хорошо отработана и подробно освещена в литературных источниках [1]. Ленточные высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) второго поколения стали коммерчески доступны относительно недавно, и вопросам изучения их свойств при конструировании систем для широкого спектра практических применений уделяется особое внимание [2–6]. Численный анализ подобных систем усложняется тем, что ВТСП композиты имеют сложную слоистую структуру, в которой непосредственно слой сверхпроводника занимает менее 5 % объема композита [7]. Моделирование ленточных сверхпроводников с учетом реальной архитектуры требует высоких затрат вычислительных ресурсов и времени, поэтому в целях сокращения последних расчет крупномасштабных и среднемасштабных систем зачастую выполняют с учетом усредненных характеристик ВТСП композитов: инженерного критического тока, эффективной теплопроводности и теплоемкости, эффективной прочности [8–10]. Еще одна сложность при прогнозировании электродинамических, теплофизических и механических характеристик устройств на основе ленточных ВТСП композитов связана с сильной анизотропией свойств данного конструкционного материала вдоль продольного и поперечного направления лент. Инженерные тепловые характеристики ВТСП композитов в продольном направлении уже исследовались для отдельных образцов ВТСП лент [11, 12], тогда как результаты совместных экспериментальных исследований и численного анализа теплопроводности и теплоемкости ВТСП лент в поперечном направлении в литературных источниках не представлены.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных и численных исследова-

ний теплоемкости и теплопроводности ВТСП лент на основе соединения $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и сборок, был проведен комплекс экспериментальных и численных исследований, направленных на изучение особенностей тепловых процессов в слоистой структуре ВТСП композита при протекании через него поперечного теплового потока, а также вычисление на основе полученных результатов эффективных тепловых характеристик отдельного ВТСП композита и сборок на основе ВТСП лент. В частности, в рамках проведенных исследований получены значения эффективных поперечных тепловых характеристик (теплопроводности и теплоемкости) композитной ВТСП ленты в широком интервале рабочих температур. Полученные результаты будут в дальнейшем применены для численного анализа сверхпроводящих энергетических систем различного масштаба.

2. Материалы и методы

і. Экспериментальные исследования теплопроводности

Измерение теплопроводности ВТСП композитов выполнено с использованием режима измерения тепловых свойств образца Thermal Transport Option (ТТО) установки для измерения физических свойств PPMS-9 (Quantum Design). Эксперименты выполнялись в условиях высокого вакуума ($\sim 10^{-4}$ торр) в диапазоне температур от 2 до 100 К. Принципиальная схема проведения измерений теплопроводности приведена на рисунке 1. Для создания теплового потока через образец на его один конец подается мощность нагревателя ($Q_{+/-}$), в то время как противоположный конец охлаждался через контакт с холодной подошвой. Мощность нагревателя при этом, как и входящий тепловой поток, задается в виде импульса прямоугольной формы. Узлы нагревателя и башмака термометра соединяются с медными выводами посредством винтового соединения. Медные выводы крепятся к образцу

посредством эпоксидных соединений по четырехконтактной схеме. На башмаках термометра измеряются температуры T_{hot} и T_{cold} . На основе экспериментальных измерений система ТТО производит автоматическое вычисление динамического теплового отклика образца на низкочастотный прямоугольный тепловой импульс и вычисление теплопроводности непосредственно из мощности нагревателя, результирующей ΔT и геометрии образца.

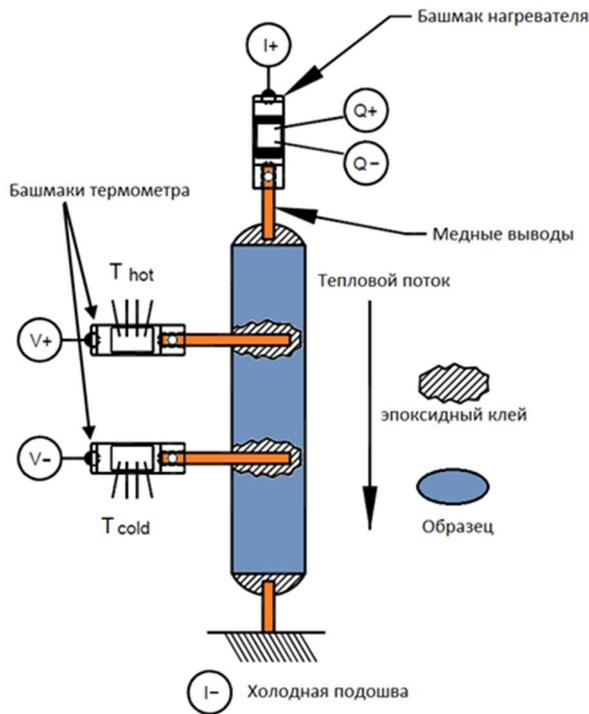


Рис. 1. Принципиальная схема измерения теплопроводности материалов

Система ТТО позволяет измерять теплопроводность композитного материала, отслеживая изменение температуры вдоль образца при пропускании через него заданного теплового потока. Теплопроводность K определяется как:

$$K = \frac{P}{\Delta T}, \quad (1)$$

где P – тепловой поток через образец, ΔT – изменение температуры между горячим и холодным башмаками термометра.

Поскольку тепловой поток не может быть измерен напрямую, чистое тепло, проводимое через образец, определяется как мощность I^2R , рассеиваемая на резисторе нагревателя с учетом потерь на излучение и потерь за счет теплопро-

водности по медным выводам от башмаков нагревателя. Таким образом, выражение для теплопроводности принимает вид:

$$K \left[\frac{W}{K} \right] = \frac{I^2 R - P_{rad}}{\Delta T} - K_{shoes}, \quad (2)$$

где $K_{shoes} = aT + bT^2 + cT^3$ – стандартная оценка теплопроводности башмаков нагревателя (a , b и c – константы), P_{rad} – излучение от образца, вычисляемое как:

$$P_{rad} = \sigma_T \times \left(\frac{S}{2} \right) \times \varepsilon \times (T_{hot}^4 - T_{cold}^4), \quad (3)$$

где $\sigma_T = 5,67 \times 10^{-8}$ [Вт м⁻² К⁻⁴] – константа Стефана–Больцмана, S – общая излучающая поверхность образца, ε – коэффициент излучения, $T_{hot/cold}$ – средние температуры холодного и горячего башмаков термометра. Множитель $\frac{1}{2}$ в уравнении радиационных потерь связан с приближением, что только половина образца излучает при повышенной температуре, а другая половина – при пониженной температуре. Из-за сложности экспериментального определения потерь на радиационное излучение погрешность измерения теплопроводности составляет несколько мВт/К.

В рамках экспериментальных исследований проведено измерение теплопроводности композитной ВТСП ленты вдоль направления с ориентации кристаллографических осей сверхпроводящей пленки. Образец представляет собой фрагмент ВТСП ленты SuperOx круглой формы диаметра 6,4 мм, с которой методами химического травления предварительно удаляется медный сой. Таким образом, исследуемый образец представляет собой слоистую структуру, содержащую ВТСП пленку $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (толщина 1 мкм) на металлической подложке сплава Hastelloy C276 (толщина 0,1 мм), а также двустороннее покрытие слоем серебра (2 мкм с каждой стороны). Измерение толщины образца выполняется автоматически системой ТТО при размещении образца в специальной шайбе (рисунок 2), которая помещается в держатель образца опции ТТО установки для измерения физических свойств PPMS-9 для проведения измерений. Общая толщина образца с учетом эпоксидного клея H20 Ероху (с двух сторон) составила $0,117 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$. Площадь радиационной поверхности составила $\sim 32,3 \text{ мм}^2$.



Рис. 2. Вставка в ТТО для измерения тепловых свойств материалов

ii. Экспериментальные исследования теплоемкости

Система ТТО позволяет проводить экспериментальное определение теплоемкости композитных ВТСП материалов при постоянном давлении, отслеживая количество тепла, подводимого к образцу и отводимого от него, а также результирующие изменение температуры при нагреве и охлаждении. Схема проведения измерений приведена на рисунке 3.

Нагреватель и термометр крепятся к платформе для образцов и соединяются посредством тонких соединительных проводов с тепловым резервуаром, в качестве которого выступают стенки измерительной шайбы. Образец крепится к платформе при помощи тонкого слоя апиэзоновой смазки, обеспечивающей равномерный тепловой контакт образца с платформой. При проведении измерений импульс тепла постоянной мощности подводится к платформе в течении фиксированного времени, после чего следует период охлаждения той же длительности. Поскольку измерения проводятся в вакууме ($\sim 10^{-4}$ торр), теплопроводность между платформой и измерительной шайбой полностью определяется теплопроводностью соединительных проводов.

После установления теплового равновесия между образцом и платформой, которые находятся в хорошем тепловом контакте, временная зависимость температуры для них может быть определена как:

$$C_{total} \frac{dT}{dt} = -K_w(T - T_b) + P(t), \quad (4)$$

где C_{total} – общая теплоемкость образца и платформы, K_w – теплопроводность соединительных

проводов, T_b – температура теплового резервуара (измерительной шайбы), $P(t)$ – зависимость мощности нагревателя от времени.

Мощность нагревателя является постоянной во время приложения теплового импульса и равной нулю во время периода остывания образца. Исходя из известных временных зависимостей для приложенной тепловой нагрузки, известной температурной зависимости теплоемкости платформы, результирующей разности температур, геометрии и массы образца, система ТТО производит автоматическое вычисление эффективной теплоемкости композитного материала.

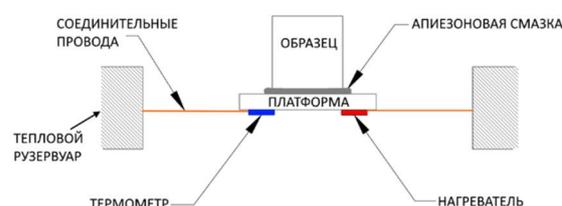


Рис. 3. Принципиальная схема измерения теплоемкости

Описанная методика обеспечивает воспроизводимую тепловую связь и позволяет установить временную константу, необходимую для установления теплового равновесия между платформой и образцом.

В рамках экспериментальных исследований было проведено измерение эффективной теплоемкости композитной ВТСП ленты производства фирмы SuperOx с медным покрытием и теплоемкость подложки Hastelloy C276. Образец представляет собой фрагмент ВТСП ленты прямоугольной формы с размерами 3x4 мм и содержит слои подложки сплава Hastelloy C276 (толщина 0,1 мм), ВТСП слой (толщина 1 мкм), слой серебра (2 мкм с каждой стороны) и двустороннее медное покрытие (толщина 5 мкм). Архитектура ВТСП ленты, а также фотография измерительной шайбы с образцом показаны на рисунке 4.

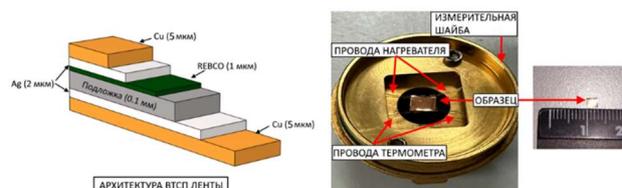


Рис. 4. Архитектура исследуемой ВТСП ленты (справа) и измерительная шайба с образцом (слева)

iii. Моделирование тепловых характеристик ВТСП композитов

Для вычисления эффективных тепловых характеристик композитной ВТСП ленты в поперечном направлении была разработана трехмерная численная модель на основе метода конечных элементов. Модель учитывает температурные зависимости теплопроводностей и теплоемкостей всех слоев ленты и позволяет выполнять детальный анализ процессов теплопереноса в слоистой структуре композита. Моделирование выполнено методом конечных элементов в программной среде Comsol Multiphysics.

Геометрия расчетной системы приведена на рисунке 5.

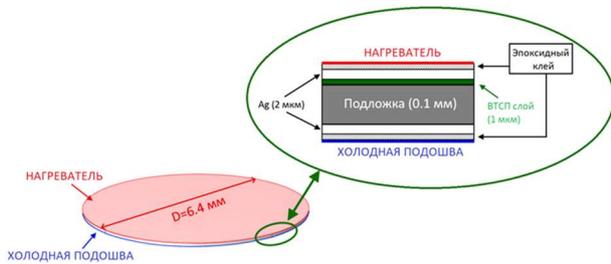


Рис. 5. Геометрия расчетной системы

Размеры и архитектура моделируемого образца, а также параметры тепловой нагрузки в рамках моделирования соответствуют методике проведения экспериментальных исследований. Толщина эпоксидной смазки, используемой в рамках экспериментальных исследований для крепления медных выводов к образцу, доподлинно неизвестна. Первоначально в рамках модели толщина эпоксидного слоя составляет 5 мкм, но поскольку результирующие тепловые характеристики самой композитной ленты не зависят от контакта со внешними покрытиями, по сути, толщина эпоксидного слоя не важна. Учет данного слоя необходим лишь для проведения сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными. С этой целью толщина эпоксидного слоя $h_{эпоху}$ рассматривается в рамках модели как варьируемый параметр, позволяющий добиться более точного соответствия экспериментальных и расчетных результатов.

Процесс моделирования тепловых процессов основан на численном решении нестационарных уравнений сохранения энергии, которые описывают теплообмен между слоями ВТСП композита,

а также процессы нагрева от внешнего источника тепла и охлаждения за счет контакта с теплоотводящими элементами [13]. Температурные зависимости плотностей, теплопроводностей и теплоемкостей всех слоев композита, кроме ВТСП слоя, известны. В рамках модели эти зависимости взяты из библиотеки материалов Comsol и дополнены при необходимости в области криогенных температур с использованием литературных источников [14–16]. Входные температурные зависимости всех слоев ВТСП композита представлены на рисунке 6. В рамках модели предполагается идеальный тепловой контакт между слоями ВТСП композита и слоев серебра с эпоксидным клеем.

В качестве поверхностного источника тепла выступает верхняя граница слоистой структуры (см. рисунок 5), для которой мощность тепловыделения задается в виде прямоугольной временной функции.

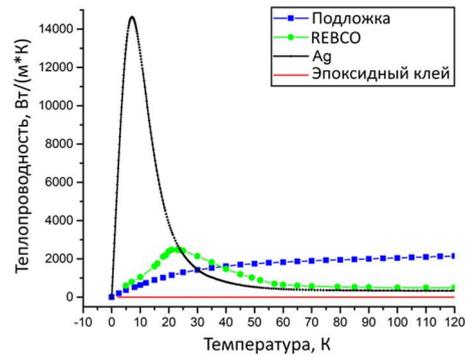


Рис. 6. Температурные зависимости теплопроводностей моделируемых слоев ВТСП ленты и эпоксидной смазки

Вместе с тем, на верхней и нижней границах образца осуществляется теплоотвод посредством контакта этих границ с медными выводами. На всех внешних поверхностях образца происходит радиационное охлаждение.

$$\vec{n} \times \vec{q}|_{\Omega_{tape}} = \epsilon \epsilon_{SB} (T^4 - T_{окр}^4), \quad (6)$$

$\epsilon_{SB} = 5,67 \times 10^{-8}$ [Вт м⁻² К⁻⁴] – постоянная Стефана–Больцмана, ϵ – коэффициент поверхностной эмиссии, Ω_{tape} – внешние границы ленты, q – плотность теплового потока, n – вектор нормали.

Начальные условия:

$$T|_{\Omega_{tape}} = T_0, \quad (7)$$

где T_0 – начальная температура.

3. Результаты и обсуждение

Эффективные тепловые характеристики ВТСП композитов, очевидно, зависят от теплопроводностей и теплоемкости всех слоев лент. Как видно из рисунка 6, при снижении температуры ниже 30 К теплопроводность слоя серебра резко возрастает, а вот теплопроводность эпоксидного слоя при любых температурах существенно ниже теплопроводностей каждого слоя ВТСП ленты. Два этих фактора могут оказывать существенное влияние на результирующие тепловые свойства рассматриваемой системы, как при выполнении моделирования, так и при проведении экспериментальных исследований. Для того, чтобы проверить это, рассмотрим динамику тепловых процессов при нагреве верхней поверхности слоистой структуры композита источником тепла с максимальной мощностью 10^{-4} Вт, выделяемой в виде импульса прямоугольной формы, как показано на рисунке 7. Поскольку на практике приложение строго прямоугольного импульса тепла от нагревателя является невозможным, в рамках модели прямоугольная функция для мощности тепловыделения источника тепла является сглаженной – нарастание и убывание мощности не является мгновенным и происходит за 10 мс.

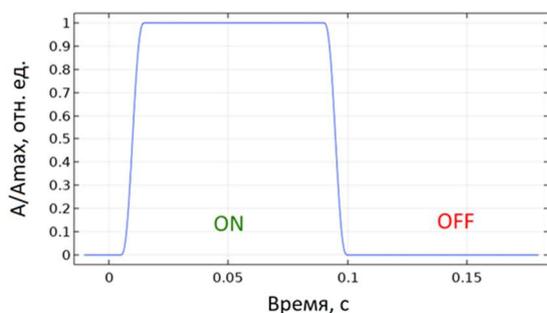


Рис. 7. Временная зависимость амплитуды мощности поверхностного источника тепла. Максимальная амплитуда $A_{\max} = 10^{-4}$ Вт

На рисунке 8 совместно с результатами вычислений приведены результаты измерения поперечной теплопроводности композитной ВТСП ленты в широком интервале температур. Результаты вычислений эффективной теплопроводности ВТСП ленты находятся в согласии с результатами экспериментальных исследований. Кроме того, можно утверждать, что основной вклад в усредненную теплопроводность ленты вносит массивный слой металлической подложки (ри-

сунк 9), однако при температурах ниже 30 К высокая теплопроводность серебра (см. рисунок 6) приводит к увеличению общей теплопроводности ленты в сравнении с подложкой.

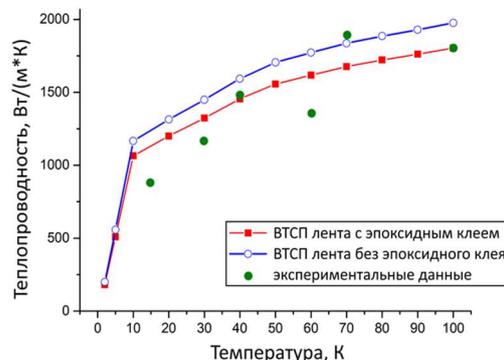


Рис. 8. Экспериментальная и расчетные зависимости эффективной теплопроводности ВТСП композита от температуры

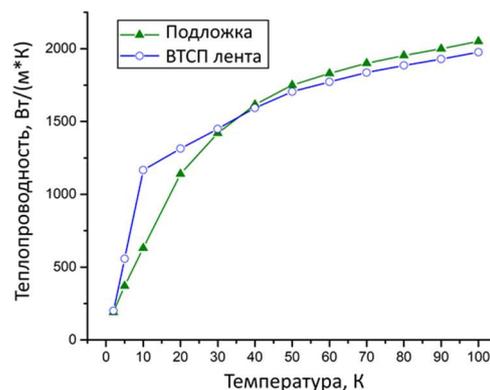


Рис. 9. Температурные зависимости теплопроводности слоя подложки и эффективной теплопроводности композитной ВТСП ленты

Для детального анализа процессов распространения тепла на рисунке 10 представлена динамика изменения температуры в ВТСП ленте с двусторонним эпоксидным покрытием в процессе и после приложения теплового импульса при начальной температуре системы 10 К. Для удобства визуализации распределения температур приводятся для фрагмента ВТСП ленты ширины 0,2 мм из области центрального сечения круглого образца. В начальный момент времени система находится в состоянии теплового равновесия. Сразу после приложения теплового импульса начинается нагрев верхнего слоя, при этом тепло, сосредоточенное в эпоксидном слое, передается в нижние слои с заметным замедлением, обусловленным низкой теплопроводностью клея. После окончания нагрева, выделившееся тепло

распространяется в объеме ВТСП композита, при этом все его слои оказываются нагретыми практически в равной степени. Через 0,2 с после окончания теплового импульса вся система возвращается в тепловое равновесие, но несмотря на практически равномерную температуру во всех слоях, эпоксидный слой, через который осуществляется отвод тепла к медным выводам, остается чуть более нагретым в сравнении со слоями ВТСП ленты, что также связано с низкой теплопроводностью эпоксидного материала.

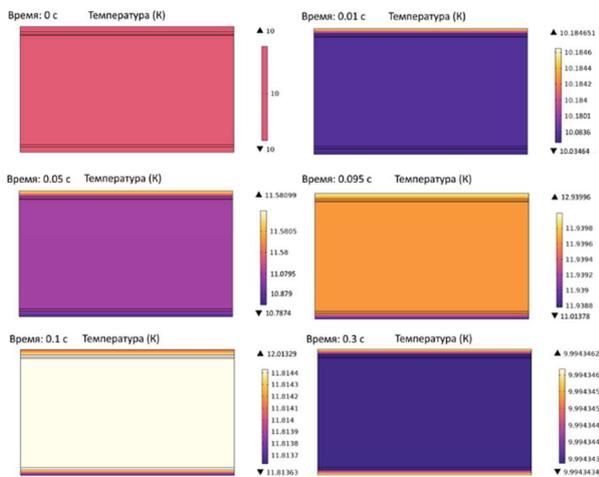


Рис. 10. Динамика изменения температуры в слоистой структуре (ВТСП композит с эпоксидным покрытием) в процессе и после приложения теплового импульса прямоугольной формы. Начальная температура 10 К

При изменении начальной температуры образца картина перераспределения тепла в слоистой структуре качественно не отличается от представленной на рисунке 10. Для количественной оценки изменения температуры в системе и времени ее возврата в первоначальное состояние на рисунке 11 приведены зависимости изменения температуры в слоистой структуре ВТСП ленты с эпоксидным клеем от времени для различных начальных температур. Зависимости изменения температуры от времени $\Delta T(t)$ при пониженных температурах (2–15 К) с хорошей точностью соответствуют модельной кривой изменения температуры ТТО, асимптотический дифференциал ΔT_ω и временные константы динамического теплового отклика системы, необходимые для вычисления теплопроводности с использованием режима ТТО, с хорошей точностью определимы. При более высоких

начальных температурах максимальное изменение температуры в образце снижается, а время возврата системы к начальной температуре возрастает, в связи с чем зависимости $\Delta T(t)$ приобретают острый пик во временной области приложения тепловой нагрузки, а затем монотонно убывают.

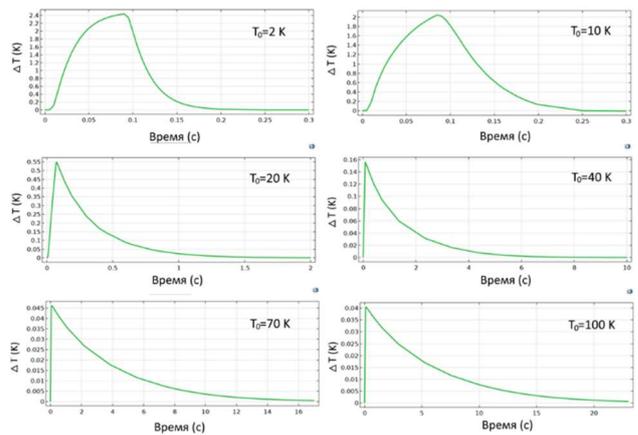


Рис. 11. Временные зависимости изменения температуры в системе при различных начальных температурах T_0 образца

Измерение теплоемкости композитной ВТСП ленты с медным покрытием было выполнено в диапазоне температур от 2 до 300 К. Медные выводы в этом случае напрямую контактируют с серебряным покрытием ВТСП ленты, параметры приложенного теплового импульса при этом остаются неизменными (см. рисунок 7). На рисунке 12 представлена экспериментальная температурная зависимость теплоемкости ВТСП ленты с медным слоем, а также вычисленная эффективная температурная зависимость теплоемкости ВТСП ленты без медного покрытия в диапазоне температур от 2 до 100 К.

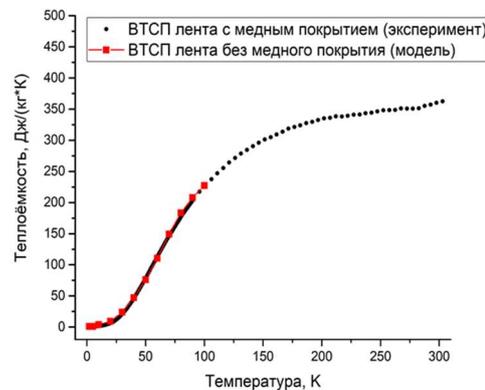


Рис. 12. Температурные зависимости эффективной теплоемкости ВТСП ленты с медным покрытием и без него

Температурные зависимости теплоемкостей всех слоев композита и вычисленная эффективная теплоемкость ВТСП ленты в поперечном направлении приведены на рисунке 13. Видно, что эффективная теплоемкость ВТСП ленты практически полностью дублирует график зависимости для слоя металлической подложки, имея лишь небольшое отклонение от нее в области высоких температур, где усредненная теплоемкость становится меньше теплоемкости хастеллоя ввиду влияния свойств слоев ВТСП и серебра.

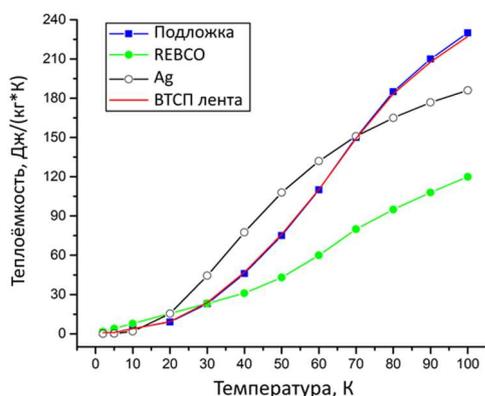


Рис. 13. Температурные зависимости теплоемкостей слоев ВТСП композита и эффективная теплоемкость ВТСП ленты

Для визуализации процессов теплопереноса в слоистой структуре ленты на рисунке 14 показана динамика изменения температуры в описанной системе для случая, когда ВТСП композит был предварительно охлажден до начальной температуры 10 К. В начальный момент времени температура всех слоев ленты одинакова. С началом нагрева тепло быстро достигает слоя подложки за счет хорошей теплопроводности слоя серебра и ВТСП слоя и продолжает распространяться вглубь композита вплоть до окончания действия теплового импульса. По окончании приложения теплового импульса наиболее нагретой оказывается центральная часть ВТСП композита, поскольку тепловой поток начинает покидать объем образца посредством теплового контакта с медными выводами. В конечный момент времени, когда тепловое равновесие в системе практически установлено, верхняя и нижняя границы ВТСП композита чуть более нагреты, нежели центральная область ленты, поскольку оставшийся тепловой поток продолжает покидать образец в данной области.

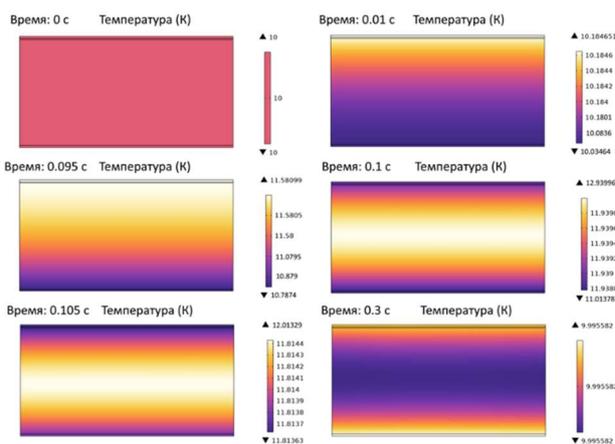


Рис. 12. Динамика изменения температуры в слоистой структуре ВТСП композита в процессе и после приложения теплового импульса прямоугольной формы. Начальная температура 10 К

Вообще говоря, зависимости теплоемкости меди и подложки от температуры имеют схожий вид и близкие значения (рисунок 15), тем не менее толщина подложки в 10 раз превышает суммарную толщину медных слоев. В связи с этим, вероятнее всего, медный слой, также, как и слои серебра и YBCO, вносит лишь малый вклад в эффективную теплоемкость ВТСП ленты.

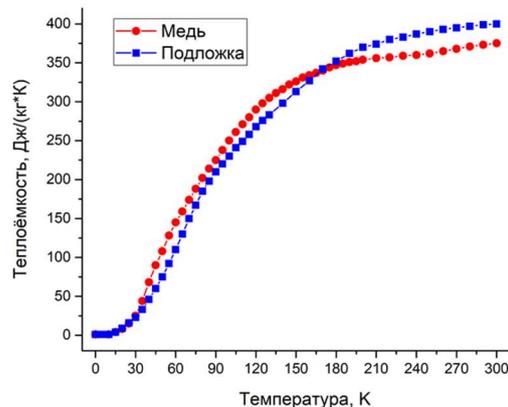


Рис. 15. Температурные зависимости теплоемкости меди и подложки

4. Заключение

В настоящей работе представлены результаты комплекса исследований, направленных на изучение особенностей тепловых процессов в слоистой структуре композитной ВТСП ленты на основе соединения $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ при протекании через него поперечного теплового потока, а также вычисление на основе полученных результатов эффективных тепловых характеристик (теплоемкости и теплопроводности) ВТСП композита.

та. Экспериментальные исследования теплопроводности и теплоемкости композитной ВТСП ленты, содержащей слои подложки, сверхпроводника и серебра, были выполнены в широком интервале температур (от 2 до 100 К) с использованием системы измерения тепловых свойств материалов (ТТО) вибрационного магнитометра. Вычисление на основе метода конечных элементов эффективных тепловых характеристик ленты, а также анализ тепловых процессов в процессе нагрева и охлаждения, выполнены на основе заданных температурных зависимостей теплопроводностей и теплоемкостей всех слоев композитной ленты.

В рамках проведенных исследований получены значения удельных эффективных тепловых характеристик (теплопроводности и теплоемкости) композитной ВТСП ленты в широком интервале рабочих температур, проведен численный анализ динамики распространения тепла в слоистой структуре. Показано, что слой эпоксидного клея, используемый в рамках экспериментальных исследований для крепления медных выводов к образцу, приводит к отклонению в измерении эффективной теплопроводности образца не более, чем на 10 %. Тем не менее, данная особенность должна быть учтена при обработке экспериментальных результатов. Кроме того, установлено, что тепловые свойства ленточных композитов определяются, по большей мере, параметрами массивного слоя металлической подложки. Незначительный вклад ВТСП слоя и слоя серебра в теплопроводность ленты проявляется, в основном, при пониженных (менее 30 К) температурах. Медный слой, обладающий теплоемкостью, схожей с теплоемкостью подложки, в исследованном интервале температур не оказывает влияния на общий ход температурной зависимости эффективной теплоемкости ВТСП ленты с медным покрытием.

Список источников

- Zhang Y., Xin C., Gao P. et al. Strain Measurement Method Based on External Symmetrical Compensation Bridge Composed of Strain Gauges with Four-Wire Configuration for a Large-Scale NbTi Superconducting Dipole Magnet Detector // *Journal of Low Temperature Physics*. 2023. Т. 213. С. 1–17. DOI: 10.1007/s10909-023-02989-9
- Takeda Y., Maeda H., Ohki K. et al. Review of the temporal stability of the magnetic field for ultra-high field superconducting magnets with a particular focus on superconducting joints between HTS conductors // *Superconductor Science and Technology*. 2022. Т. 35. № 4. DOI: 10.1088/1361-6668/ac5645
- Russo G., Yazdani-Asrami M., Scheda R. et al. Artificial intelligence-based models for reconstructing the critical current and index-value surfaces of HTS tapes // *Superconductor Science and Technology*. 2022. Т. 35. № 12. DOI: 10.1088/1361-6668/ac95d6
- Zampa A., Holleis S., Badel A. et al. Influence of Local Inhomogeneities in the REBCO Layer on the Mechanism of Quench Onset in 2G HTS Tapes // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2022. Т. 32. № 3. С. 1–7. DOI: 10.1109/TASC.2022.3151950
- Zhu J., Chen S., Jin Z. Progress on Second-Generation High-Temperature Superconductor Tape Targeting Resistive Fault Current Limiter Application // *Electronics*. 2022.
- Li M., Zheng J., Sheng J. et al. Research on a novel HTS double pancake coil based on CORC: used for kA-level SMES of accelerator // *Superconductor Science and Technology*. 2022. Т. 35. № 12. DOI: 10.1088/1361-6668/ac96b4
- Qin M.J., Dou S.X. Superconductors, High Tc. *Encyclopedia of Condensed Matter Physics*. Oxford: Elsevier, 2005. С. 112–120.
- Wolf M.J., Bagrets N., Fietz W.H. et al. Critical Current Densities of 482 A/mm² in HTS CrossConductors at 4.2 K and 12 T // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018. Т. 28. № 4. С. 1–4. DOI: 10.1109/TASC.2018.2815767
- Lee J., Ko T.K. Estimation of the Engineering Critical Current Criteria for HTS Wire Carrying an Alternating Current // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2014. Т. 24. № 3. С. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2013.2290507
- Dong F., Huang Z., Xu X. et al. Method and Process of Mechanical Evaluation of a 2G HTS Magnet System for Maglev Applications // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2020. Т. 30. № 4. С. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2020.2973600
- Pi W., Liu Z., Ma S. et al. Investigation on Thermal Stability of Quasi-Isotropic Superconducting Strand Stacked by 2 mm Wide REBCO Tapes and Cu Tapes // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2020. Т. 30. № 4. С. 1–6. DOI: 10.1109/TASC.2020.2977904
- Pi W., Liu Z., Li G. et al. 4D simulation of quench behavior in quasi-isotropic superconducting cable of stacked REBCO tapes considering thermal contact resistance // *Superconductor Science and Technology*. 2020. Т. 33. № 8. DOI: 10.1088/1361-6668/ab9aa3
- Zubko V.V., Ryabov S.M., Fetisov S.S. et al. Heat Transfer Simulation to Liquid Nitrogen from HTS Tapes at the Overload Currents // *Physics Procedia*. 2015. Т. 67. С. 619–624. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.06.105
- Lu J., Choi E.S., Zhou H.D. Physical properties of Hastelloy® C-276™ at cryogenic temperatures // *Journal of Applied Physics*. 2008. Т. 103. № 6. DOI: 10.1063/1.2899058

15. Amils R.I., Gallego J.D., Sebastian J.L. et al. Thermal conductivity of silver loaded conductive epoxy from cryogenic to ambient temperature and its application for precision cryogenic noise measurements // *Cryogenics*. 2016. T. 76. C. 23–28. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2016.03.001
16. Ikebe M., Fujishiro H., Naito T. et al. Thermal conductivity of YBCO(123) and YBCO(211) mixed crystals prepared by MMTG // *Cryogenics*. 1994. T. 34, № 1. C. 57–61. DOI: 10.1016/0011-2275(94)90053-1
7. Qin MJ, Dou SX. *Superconductors, High Tc*. In: Bassani F, Liedl GL, Wyder P, editors. *Encyclopedia of Condensed Matter Physics*. Oxford: Elsevier; 2005. p. 112–120.
8. Wolf MJ, Bagrets N, Fietz WH et al. Critical Current Densities of 482 A/mm² in HTS CrossConductors at 4.2 K and 12 T. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018;28(4):1–4. DOI: 10.1109/TASC.2018.2815767
9. Lee J, Ko TK. Estimation of the Engineering Critical Current Criteria for HTS Wire Carrying an Alternating Current. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2014;24(3):1–5. DOI: 10.1109/TASC.2013.2290507

References

1. Zhang Y, Xin C, Gao P et al. Strain Measurement Method Based on External Symmetrical Compensation Bridge Composed of Strain Gauges with Four-Wire Configuration for a Large-Scale NbTi Superconducting Dipole Magnet Detector. *Journal of Low Temperature Physics*. 2023;213:1–17. DOI: 10.1007/s10909-023-02989-9
2. Takeda Y, Maeda H, Ohki K et al. Review of the temporal stability of the magnetic field for ultra-high field superconducting magnets with a particular focus on superconducting joints between HTS conductors. *Superconductor Science and Technology*. 2022;35(4). DOI: 10.1088/1361-6668/ac5645
3. Russo G, Yazdani-Asrami M, Scheda R, et al. Artificial intelligence-based models for reconstructing the critical current and index-value surfaces of HTS tapes. *Superconductor Science and Technology*. 2022;35(12). DOI: 10.1088/1361-6668/ac95d6
4. Zampa A, Holleis S, Badel A et al. Influence of Local Inhomogeneities in the REBCO Layer on the Mechanism of Quench Onset in 2G HTS Tapes. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2022;32(3): 1–7. DOI: 10.1109/TASC.2022.3151950
5. Zhu J, Chen S, Jin Z. Progress on Second-Generation High-Temperature Superconductor Tape Targeting Resistive Fault Current Limiter Application. *Electronics*. 2022;11(3).
6. Li M, Zheng J, Sheng J et al. Research on a novel HTS double pancake coil based on CORC: used for kA-level SMES of accelerator. *Superconductor Science and Technology*. 2022;35(12). DOI: 10.1088/1361-6668/ac96b4
10. Dong F, Huang Z, Xu X et al. Method and Process of Mechanical Evaluation of a 2G HTS Magnet System for Maglev Applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2020;30(4):1–5. DOI: 10.1109/TASC.2020.2973600
11. Pi W, Liu Z, Ma S et al. Investigation on Thermal Stability of Quasi-Isotropic Superconducting Strand Stacked by 2 mm Wide REBCO Tapes and Cu Tapes. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2020; 30(4):1–6. DOI: 10.1109/TASC.2020.2977904
12. Pi W, Liu Z, Li G et al. 4D simulation of quench behavior in quasi-isotropic superconducting cable of stacked REBCO tapes considering thermal contact resistance. *Superconductor Science and Technology*. 2020;33(8). DOI: 10.1088/1361-6668/ab9aa3
13. Zubko VV, Ryabov SM, Fetisov SS et al. Heat Transfer Simulation to Liquid Nitrogen from HTS Tapes at the Overload Currents. *Physics Procedia*. 2015;67:619-24. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.06.105
14. Lu J, Choi ES, Zhou HD. Physical properties of Hastelloy® C-276™ at cryogenic temperatures. *Journal of Applied Physics*. 2008;103(6). DOI: 10.1063/1.2899058
15. Amils RI, Gallego JD, Sebastian JL et al. Thermal conductivity of silver loaded conductive epoxy from cryogenic to ambient temperature and its application for precision cryogenic noise measurements. *Cryogenics*. 2016;76:23–28. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2016.03.001
16. Ikebe M, Fujishiro H, Naito T et al. Thermal conductivity of YBCO(123) and YBCO(211) mixed crystals prepared by MMTG. *Cryogenics*. 1994;34(1):57–61. DOI: 10.1016/0011-2275(94)90053-1