

# Соединение токовводов с высокотемпературными сверхпроводниками<sup>1</sup>

БУЯНОВ Ю.Л.

*На основе упрощенной модели, описывающей распределение тока в паяном соединении токоввода с ВТСП проводом, стабилизированным медью или нержавеющей сталью, получены аналитические зависимости, определяющие изменение температуры и теплового потока в паяном соединении. Представлена методика определения расчетным путем электрического сопротивления многокомпонентного припоя и изучено влияние системы «токоввод–припой–стабилизатор» сверхпроводника на тепловой режим контактного соединения.*

**Ключевые слова:** высокотемпературные сверхпроводники, сверхпроводниковые устройства, токовводы, паяные соединения сверхпроводников

Паяное соединение сверхпроводящих проводов, как между собой, так и с подводными током проводниками, является необходимой технологической операцией при изготовлении сверхпроводниковых устройств. Надежность этих соединений, в особенности места соединения токоввода со сверхпроводником, в значительной степени определяет эффективность работы устройств в целом. Для соединения сверхпроводник – сверхпроводник важным параметром является сопротивление этого контактного соединения, определяющего при большом их числе эксплуатационные характеристики сверхпроводникового устройства, обусловленные выделением тепла в соединении, что компенсируется дополнительным расходом криогенной жидкости, охлаждающей устройство, или дополнительной холодильной мощностью криогенной газовой машины (в случае безжидкостного охлаждения). В [1] приводятся опытные данные о сопротивлении паяных соединений высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) второго поколения на основе иттрий-барий оксида меди (YBCO), упрочненных лентами из меди, латуни и нержавеющей стали.

В случае соединения сверхпроводник–токоввод критическим параметром является температура спаивания токоввода со сверхпроводником, так как повышенное тепловыделение в месте соединения может способствовать переходу сверхпроводника в

*Analytical dependences determining the change of temperature and heat flux in a soldered connection are obtained using a simplified model describing the distribution of current in a soldered connection of current leads with a high-temperature superconducting wire stabilized by copper or stainless steel. A procedure for calculating the electrical resistance of a multicomponent solder is presented, and the influence of the «current lead–solder–stabilizer» system of a superconductor on the temperature operating conditions of the contact connection is studied*

**Key words:** high-temperature superconductors, superconducting devices, current leads, soldered connections of superconductors–frequency sine-wave pulse-width modulation.

нормальное состояние, отпайке сверхпроводящего провода или даже разрушению его структуры. Поэтому при разработке сверхпроводниковых устройств, в особенности устройств с сильными токами, необходим расчет температуры в контактном соединении. Методы расчета распределения температуры в контактном соединении нормальный проводник – сверхпроводник разрабатывались уже давно [2, 3], но они касались низкотемпературных сверхпроводников, охлаждаемых жидким гелием. В связи с низкой температурой охлаждения контакта (4,2 К) в уравнении теплопроводности, описывающем распространение тепла в паяном соединении, температура охлаждающей среды принималась равной нулю [2], поэтому полученные зависимости не применимы для описания распределения температуры в контактных соединениях современных высокотемпературных сверхпроводников. В статье применительно к ленточным ВТСП рассматривается влияние теплофизических свойств материала токоввода, припоя, стабилизатора ВТСП провода на изменение количества выделяющегося тепла в контактном соединении токоввода и сверхпроводника.

**Схема соединения токоввода со сверхпроводящим проводом.** Характер охлаждения контакта зависит от общей конструктивной схемы сверхпроводникового устройства, используемой криогенной жидкости и ее агрегатного состояния. Контакт может быть целиком погружен в криогент (например в жидкий азот), рис. 1,а, или находится в среде холодного газа (по конструктивным требованиям или

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 10-08-01184-а.

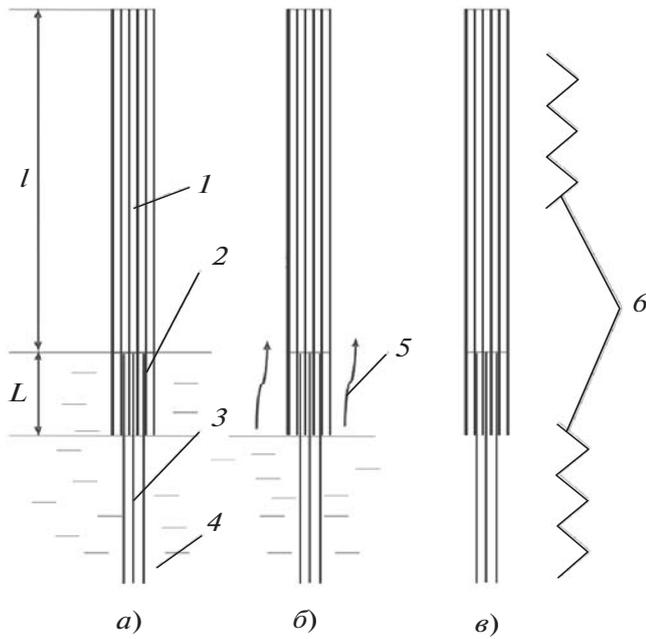


Рис. 1. Возможные способы охлаждения места соединения токоввода со сверхпроводником: а – криожидкостью; б – парами испаряющейся криожидкости; в – криокулером; 1 – токоввод (пакет из медных лент); 2 – паяное соединение; 3 – ВТСП провода; 4 – криожидкость; 5 – холодный пар; 6 – охлаждающие ветви криокулера;  $L$  – длина соединения,  $l$  – длина токоввода

в результате понижения уровня криогенной жидкости, рис. 1,б. В безжидкостных системах контактные соединения, как и все сверхпроводниковое устройство, охлаждаются с помощью криогенных газовых машин (криокулеров), рис. 1,в. Резистивная часть токоввода  $l$  может состоять из пакета нормальных проводников, например медных лент, которые в низкотемпературной зоне соединяются с ВТСП проводами. На рис. 2 показана схема одного такого соединения.

Ток  $I_0$ , текущий по ленте  $l$ , через слой припоя  $3$  проходит в сверхпроводник. Конфигурация провода соответствует сверхпроводящему проводу второго поколения Amperium™ (который аналогичен сверхпроводнику, ранее называвшемуся «проводом 344») фирмы American Superconductor Corp. (AMSC). Провод содержит ядро  $4$ , состоящее из подложки из никель-вольфрамового сплава толщиной 50–75 мкм, на которую через три буферных слоя нанесен токоведущий слой YBCO сверхпроводника толщиной 0,8 мкм или 1,4 мкм, закрытый тонким слоем серебра. Для механической защиты и обеспечения требуемых тепловых свойств керамика YBCO ламинирована с обеих сторон стабилизирующими медными лентами  $5$  толщиной 50 мкм с использованием мягкого припоя с температурой плавления 179 °С. Ленты изготовлены из медного сплава SuperSilverCopper-155™. Содержание меди в сплаве составляет 99,75%, серебра до 0,1%; остальные составляющие – магний и фосфор. Ши-

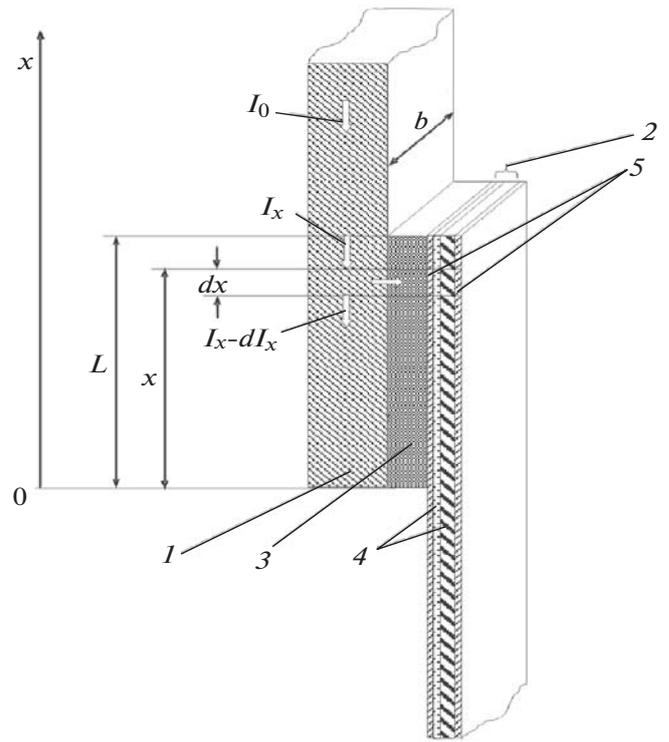


Рис. 2. Схема соединения ВТСП провода с токовводом: 1 – токоподводящая лента (токоввод); 2 – ВТСП провод; 3 – припой; 4 – ядро ВТСП провода (подложка, буферные слои, сверхпроводник); 5 – стабилизатор

рина сверхпроводящего провода Amperium™ 4,7–4,95 мм (провода «344» – 4,4 мм). Для использования в напряженных конструкциях провода ламинируются вместо медной ленты лентой из нержавеющей стали 316 L толщиной 25 мкм (провод «344S») или латунной лентой «344В».

**Теоретическая модель.** На основе рис. 2 рассмотрим упрощенную модель протекания тока в контактном соединении. На участке токопроводящей ленты  $l$  с координатой  $x$  выделим элементарный параллелепипед, ограниченный ребрами  $dx$  и  $b$ , где  $b$  – ширина ленты. Принимаем, что ширина токопроводящей ленты равна ширине сверхпроводящей ленты и слоя припоя. Постоянный ток  $I_x$ , поступающий в этот элементарный объем, определяется разностью потенциалов на гранях элементарного объема  $dU_x$  и сопротивлением элементарного объема  $dR_1 = \rho_1 dx / b\delta_1$ , где  $\rho_1$  – удельное сопротивление материала, из которого изготовлена токопроводящая лента;  $\delta_1$  – толщина ленты:

$$I_x = dU_x / dR_1. \quad (1)$$

Из элементарного параллелепипеда выходит ток  $I_x - dI_x$ , так как ток  $dI_x$  через слой припоя  $3$  и стабилизатор  $5$  переходит в сверхпроводник. Этот ток определяется выражением

$$dI_x = U_x / dR_c, \quad (2)$$

где  $U_x$  – потенциал токоввода (медной ленты) относительно нулевого потенциала сверхпроводника;  $R_c$  – сопротивление паяного контактного соединения токоввода со сверхпроводящим проводом.

В этом случае  $R_c = R_2 + R_3$  и  $dR_c = (dx \cdot b)^{-1} (\rho_2 \delta_2 + \rho_3 \delta_3)$ . Здесь  $\rho_2$ ,  $\rho_3$  и  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  – удельные сопротивления и толщина припоя и стабилизатора. Конструкция ВТСП провода асимметрична. Контакт токоввода со сверхпроводником со стороны Ni-W подложки будет иметь большее сопротивление, чем с другой стороны, где путь протекания тока к токоведущему слою сверхпроводника меньше. Поэтому рассматриваем случай присоединения токоввода к ВТСП проводу со стороны меньшего сопротивления.

Дифференцируя уравнение (2), находим

$$\frac{dU_x}{dx} = R_c L \frac{d^2 I_x}{dx^2} \quad (3)$$

и после подстановки уравнения (3) в (1) получаем дифференциальное уравнение, описывающее изменение тока по оси  $x$  в токопроводящей ленте (токовводе):

$$\frac{d^2 I_x}{dx^2} - \psi I_x = 0, \quad (4)$$

где  $\psi = R_1 / (R_2 + R_3) L^2 = \rho_1 / \delta_1 (\rho_2 \delta_2 + \rho_3 \delta_3)$ .

Подобная задача о прохождении тока в контактном соединении нормального металла со сверхпроводником рассматривалась в несколько ином виде в [2, 3]. Решая уравнение (4) с граничными условиями  $I|_{x=L} = I_0$ ,  $I|_{x=0} = 0$ , получаем изменение тока в нормальном проводнике:

$$I_x = I_0 \operatorname{sh}(\sqrt{\psi} x) / \operatorname{sh}(\sqrt{\psi} L).$$

Из-за незначительной толщины элементов, составляющих контактное соединение, полагаем, что температура вдоль оси, перпендикулярной оси  $x$ , не изменяется. В элементарном объеме токоввода дифференциальное уравнение теплопроводности при одномерном распространении теплового потока вдоль оси  $x$  будет иметь вид

$$\lambda S \frac{d^2 T_x}{dx^2} + \frac{I_0^2 \rho_1}{S} \frac{\operatorname{sh}^2(\sqrt{\psi} x)}{\operatorname{sh}^2(\sqrt{\psi} L)} = \alpha P (T_x - T_0), \quad (5)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала токоввода;  $S$  – площадь поперечного сечения;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $P$ ,  $T_x$  – омываемый периметр и температура паяного контактного соединения;  $T_0$  – температура окружающей среды. Величины  $\lambda$ ,  $\rho_1$  и  $\psi$  приняты постоянными, усредненными по температуре. Решая уравнение

(5), находим распределение температуры  $T_x$  и теплового потока  $Q_x$  вдоль контакта:

$$T_x = T_0 + G_1 \exp(\sqrt{A} x) + G_2 \exp(-\sqrt{A} x) + \frac{I_0^2 \rho_1 \operatorname{ch}(2\sqrt{\psi} x)}{S^2 \lambda (A - 4\psi) [\operatorname{ch}(2\sqrt{\psi} L) - 1]} - \frac{I_0^2 \rho_1 + 2PST_0 \alpha}{2PS\alpha \operatorname{sh}^2(\sqrt{\psi} L)}; \quad (6)$$

$$Q_x = \lambda S \frac{dT_x}{dx} = (\alpha \lambda PS)^{1/2} [G_1 \exp(\sqrt{A} x) - G_2 \exp(-\sqrt{A} x)] + \frac{I_0^2 \rho_1 \sqrt{\psi} \operatorname{sh}(2\sqrt{\psi} x)}{S(A - 4\psi) \operatorname{sh}^2(\sqrt{\psi} L)}, \quad (7)$$

где  $A = \alpha P / \lambda S$ ;  $G_1$  и  $G_2$  – постоянные интегрирования, которые находятся после установления граничных условий.

Принимаем, что к верхней границе контактного соединения по токовводу подходит тепловой поток  $Q_{x=L} = Q_h$ , а нижняя часть соединения находится при температуре  $T_{x=0} = T_c$ . Подставляя в уравнения (6) и (7)  $T_x = T_c$  при  $x=0$  и  $Q_x = Q_h$  при  $x=L$ , получаем систему уравнений, из которой находим выражения, определяющие  $G_1$  и  $G_2$ , что позволяет получить уравнения, однозначно определяющие функции  $T_x$  и  $Q_x$ . После соответствующих упрощений (пренебрегая малыми членами) из уравнений (6) и (7) получаем формулы, позволяющие определить распределение температуры в контактном соединении и изменение в нем теплового потока:

$$T_x = T_0 - (T_0 - T_c) \frac{\operatorname{ch}[\sqrt{A}(L-x)]}{\operatorname{ch}(\sqrt{A}L)} + (Q_h - \frac{2I_0^2 \rho_1}{S} \frac{\sqrt{\psi}}{A-4\psi}) (\alpha \lambda PS)^{-1/2} \frac{\operatorname{sh}(\sqrt{A}x)}{\operatorname{ch}(\sqrt{A}L)}; \quad (8)$$

$$Q_x = (T_0 - T_c) (\alpha \lambda PS)^{1/2} \frac{\operatorname{sh}[\sqrt{A}(L-x)]}{\operatorname{ch}(\sqrt{A}L)} + (Q_h - \frac{2I_0^2 \rho_1}{S} \frac{\sqrt{\psi}}{A-4\psi}) \frac{\operatorname{ch}(\sqrt{A}x)}{\operatorname{ch}(\sqrt{A}L)}. \quad (9)$$

В частном случае, когда температура среды, окружающей контакт, равна температуре в самой нижней точке контакта, уравнения (8) и (9) упрощаются. Определяя  $S = b\delta_1$  и  $P = 2(b + \delta_1)$ , получаем:

$$T_x = T_0 + \left( Q_h - \frac{2I_0^2 \rho_1}{\delta_1 b} \frac{\sqrt{\psi}}{A-4\psi} \right) \times [2\alpha \lambda (\delta_1 + b) \delta_1 b]^{-1/2} \frac{\operatorname{sh}(\sqrt{A}x)}{\operatorname{ch}(\sqrt{A}L)};$$

$$Q_x = \left( Q_h - \frac{2I_0^2 \rho_1}{\delta_1 b} \frac{\sqrt{\psi}}{A-4\psi} \right) \frac{\operatorname{ch}(\sqrt{A}x)}{\operatorname{ch}(\sqrt{A}L)}.$$

В случае, когда охлаждение происходит с помощью криогенной газовой машины (криокулера), отвод тепла от соединения токоввода со сверхпроводником происходит за счет теплопроводности. Тепло отводится к участку сверхпроводникового устройства, на котором осуществляется тепловая связь с криокулером. Уравнение (5) принимает вид

$$\frac{d^2 T_x}{dx^2} = -\frac{I_0^2 \rho_1}{\lambda S^2} \frac{\text{sh}^2(\sqrt{\psi} x)}{\text{sh}^2(\sqrt{\psi} L)}$$

Решая это уравнение с граничными условиями  $Q|_{x=L}=Q_h$ ,  $T|_{x=0}=T_c$  получаем распределение температуры вдоль паяного соединения токоввода со сверхпроводником. Температура  $T_c$  поддерживается криокулером. Тогда

$$T_x = T_c + \left[ \frac{I_0^2 \rho_1}{16\lambda S^2} \frac{2\sqrt{\psi} x - 1}{\psi \text{sh}^2(\sqrt{\psi} L)} \right] \exp(2\sqrt{\psi} x) + \left[ \frac{Q_h}{\lambda S} + \frac{I_0^2 \rho_1}{4\lambda S^2} \times \frac{\text{sh}(2\sqrt{\psi} L) - \text{sh}(2\sqrt{\psi} x) - 2\sqrt{\psi}(L-x)}{\sqrt{\psi} \text{sh}^2(2\sqrt{\psi} L)} \right] x. \quad (10)$$

Для того чтобы воспользоваться полученными уравнениями, необходимо выбрать припой и определить температурную зависимость удельных сопротивлений материала токоввода, припоя и стабилизатора сверхпроводника.

#### Пайка высокотемпературного сверхпроводника.

При пайке ВТСП провода соединение должно быть осуществлено непосредственно с его металлическим стабилизатором, но при этом для того чтобы избежать расслоения структуры сверхпроводника, температура паяльного инструмента в процессе пайки  $T_{\text{п}}$  не должна превышать 165 °С, при этом максимальная температура нагрева не может быть выше 175 °С в течение трех минут. На рис. 3, основываясь на данных AMSC [5], показано изменение допустимого диапазона температуры от времени теплового воздействия на ВТСП провод. В сверхпроводящем проводе, производимом фирмой SuperPower Inc., пленка сверхпроводника толщиной 1–3 мкм нанесена на подложку из сплава Hastelloy® С-276 (Ni-Cr-Mo) толщиной 50 мкм и ламинирована медной лентой толщиной 20 мкм. При пайке сверхпроводящего провода SuperPower® максимальная температура нагрева составляет 250 °С, что выше, чем у других ВТСП проводов.

В таблице указаны некоторые марки припоев, конечная температура плавления которых не превышает  $T_{\text{п}}$ . Припои, отмеченные значком \*, рекомендуются AMSC [5], для пайки сверхпроводящих

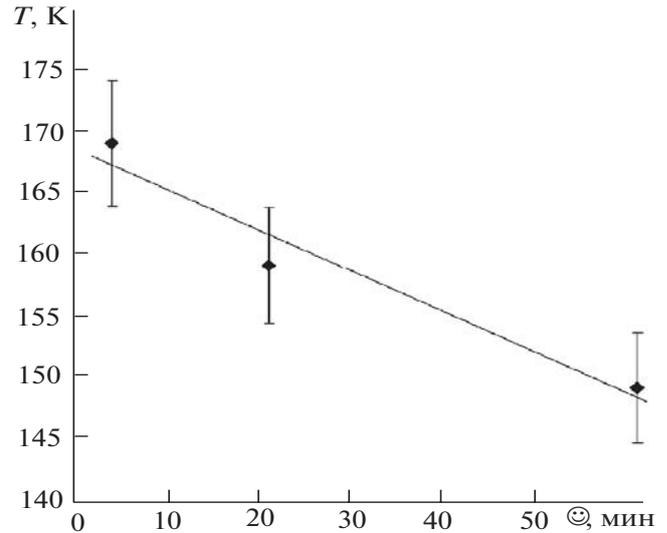


Рис. 3. Зависимость допустимой температуры нагрева от времени теплового воздействия при пайке ВТСП проводов Amperium™

проводов; марки припоев со значком \*\* были использованы для соединения ВТСП проводов между собой [1]. В таблице также приведены мягкие припои, систематизированные в [6], соответствующие ГОСТ 21930-76 или техническим условиям. Производитель SuperPower рекомендует для пайки своих проводов припой 40Pb-60Sn (типа ПОС-61). Следует заметить, что оптимальная температура пайки для каждого припоя выше, чем конечная температура припоя (ликвидус) на некоторую величину  $\Delta T$ , которая в некоторых случаях может достигать десятков градусов. Эта величина зависит от методов подготовки (очистки) соединяемых поверхностей, используемого флюса и скорости пайки. Сводка припоев в таблице представлена исключительно по основному технологическому признаку – температуре плавления. Но применение того или иного припоя еще обусловлено многими необходимыми физико-техническими требованиями: механической прочностью припоя (например, легкоплавкие припои с большим содержанием висмута стабильны, но хрупки), возможностью сочетания с используемым флюсом, уровнем газовыделения, смачиваемости металла припоем и т.д.

**Определение сопротивления материалов соединения.** Электрическое сопротивление паяного соединения с ВТСП проводами зависит от многих факторов, в том числе от материала припоя. Для того чтобы выяснить расчетным путем распределение температуры в зоне контакта, необходимо знать зависимость удельного сопротивления припоя от температуры, но данных, касающихся зависимости  $\rho(T)$  в широком диапазоне изменения температуры не только припоев, но и их компонентов, недостаточно или они отсутствуют. Разрозненные данные в основном касаются значений электросопротивле-

Марка припоя	Массовая доля компонентов припоя, %							Конечная температура плавления, °С
	In	Bi	Pb	Sn	Cd	Zn	Ag	
InSnZn	52,2	—	—	46	—	1,8	—	108
Indalloy 53**	33	67	—	—	—	—	—	109
BiPbSn	—	50	25	25	—	—	—	95–115
InCdZn	74,2	—	—	—	24	1,8	—	116
Indalloy 1E*	52	—	—	48	—	—	—	118
BiPbSn	—	55	44	1	—	—	—	117–120
ПОИИ 52	52	—	—	48	—	—	—	120
InCd	74	—	—	—	26	—	—	123
BiPb	—	56,5	43,5	—	—	—	—	125
ПОСВ 33	—	33,3	33,4	33,3	—	—	—	130
BiSnZn	—	56	—	40	—	4	—	130
BiSn	—	57	—	43	—	—	—	139
ПСр3И	97	—	—	—	—	—	3	141
ПОСК 50–18	—	—	32	50	18	—	—	145
BiSnPb	—	25	42	33	—	—	—	150
In (ГОСТ 10297-94)	100	—	—	—	—	—	—	156
Indalloy 4*	100	—	—	—	—	—	—	157
SnPbBi**	—	16	43	43	—	—	—	163
ПОС-61	—	—	39–40	59–61	—	—	—	183–185
SnAg**	—	—	—	96,5	—	—	3,5	221

ния при комнатной температуре (или при 0 °С) чистых или сверхчистых веществ, в то время как при производстве припоев используют металлы, имеющие примесь.

Рассмотрим случай, когда токоввод припаян к сверхпроводнику трехкомпонентным припоем ПОСК 50–18, состоящим из 50% олова, 32% свинца и 18% кадмия. Известно, что для металлов достаточно точно значения идеального сопротивления  $\rho_i$  при понижении температуры могут быть определены до величины  $\sim \theta_D / 3$ , где  $\theta_D = h\omega_{\max} / k$  – температура Дебая, характерная для каждого вещества и определяющая его состояние при максимально возможной частоте  $\omega_{\max}$  колебаний атомов (здесь  $h$  – постоянная Планка,  $k$  – постоянная Больцмана). От высоких температур и до  $\sim \theta_D / 3$  (для Pb ~30 К, для Sn и Cd ~60–80 К) значения  $\rho_i$  уменьшаются практически пропорционально температуре. Ниже этой температуры  $\rho_i(T)$  имеет более сложную зависимость. Это связано с тем, что в интервале от комнатной температуры до 30–80 К изменяющееся пропорционально температуре удельное электрическое сопротивление в основном определяется тепловыми колебаниями кристаллической решетки металла, препятствующими движению свободных электронов, а в области низких

температур, ниже указанного температурного уровня, начинает преобладать остаточное сопротивление, не зависящее от температуры, обусловленное физическими дефектами решетки и химическим составом примесей.

Трудности, касающиеся определения зависимости  $\rho(T)$ , могут быть преодолены путем использования ряда расчетных приемов. Зависящее от температуры идеальное сопротивление каждого компонента сплава  $\rho_i(T)$ , которое обусловлено рассеянием электронов из-за тепловых колебаний кристаллической решетки (электрон-фононное взаимодействие) согласно правилу Матиссена может быть выражено равенством  $\rho_i(T) = \rho(T) - \rho_r$ , где  $\rho(T)$  – полное сопротивление металла;  $\rho_r$  – сопротивление, связанное с несовершенством решетки и наличием в металле примесей. Приближенные значения  $\rho_i(T)$  для каждого металла найдем используя уравнение Блоха–Грюнайзена, записанное в виде

$$\rho_i(T) = C(T/\theta)^5 \int_0^{\theta/T} \frac{x^5 dx}{\text{sh}^2(x/2)}, \quad (11)$$

где  $\theta$  – характеристическая дебаевская температура;  $C = 1,0565\rho_i^\theta$  – постоянная, отражающая индивидуальные свойства вещества в уравнении (11);  $\rho_i^\theta$  –

удельное электрическое сопротивление при температуре  $T=\theta$ ;  $x=h\omega/kT$  – безразмерная переменная;  $\omega$  – частота колебаний атомов в кристаллической решетке металла.

Оценочный характер вычисления сопротивления по уравнению Блоха–Грюнайзена (в особенности в области низких температур) носит объективный характер, так как формула Блоха–Грюнайзена не учитывает всей сложности процесса электрон-фононного взаимодействия. Кроме этого, выбор значения характеристической дебаевской температуры  $\theta$  является достаточно неопределенной задачей. Эта постоянная устанавливается при совпадении экспериментального значения  $\rho_i$  с теоретическим, полученным из уравнения Блоха–Грюнайзена (11) или его модификаций.

Более известны дебаевские характеристики температуры, полученные при изучении зависимости теплоемкости вещества от температуры. Зависимость теплоемкости твердого тела от температуры хорошо описывается уравнением Дебая  $c_v = 2,25R_0(\theta/T)^3 \int_0^{\theta/T} \frac{x^4 dx}{\text{sh}^2(x/2)}$ , где связаны между

собой переменная  $x$ , удельная теплоемкость при постоянном объеме  $c_v$ , универсальная газовая постоянная  $R_2$  и величина  $\theta$ . Подстановка в уравнение Дебая экспериментальных значений  $c_v$  позволяет определить величину  $\theta$  данного металла. Дж. Бардин показал (1940 г.) [7] универсальность дебаевской характеристической температуры, полученной на основе теплоемкости, которая может быть использована для расчетной оценки величины электрического сопротивления. Анализ справочных данных показывает, что для каждого металла существует большой разброс значений дебаевской характеристической температуры (для олова 160–200 К, кадмия 175–209 К, свинца 88–195 К). Это связано с тем, что указанные металлы имеют разное содержание примесей; при температуре ниже 50 К характеристическая температура Дебая отклоняется от постоянного значения, которое следует из теории Дебая, и поэтому температурный интервал измерений или привязка характеристической константы к определенной температуре влияет на ее значение, указанное в различных справочниках, где также могут быть приведены граничные значения характеристической температуры  $\theta_0$  при  $T \rightarrow 0$  К или постоянное асимптотическое значение  $\theta_\infty$  при  $T \rightarrow \infty$ .

Кроме подобранного значения величины  $\theta$  для расчета удельного электрического сопротивления необходимо знать экспериментальное значение идеального электрического сопротивления при температуре окружающей среды  $T_{o.c}$  при 0 °С или

комнатной температуре  $\rho_i^{T_{o.c}}$ . Для определения температурной зависимости  $\rho_i(T)$  свинца, олова и кадмия воспользуемся значениями характеристических дебаевских температур из [8]: белое олово –  $\theta_{Sn}=195$  К; кадмий –  $\theta_{Cd}=186$  К; свинец –  $\theta_{Pb}=96$  К. Постоянную  $C$  для каждого металла определяем при  $T=273$  К, используя формулу (11) и подставляя в нее опытные значения  $\rho_i^{273K}=19,3 \cdot 10^{-8}$  Ом·м для (Pb);  $11,5 \cdot 10^{-8}$  Ом·м для (Sn) из [8] и  $10,05 \cdot 10^{-8}$  Ом·м (для технического кадмия) из [9]. Последнее значение найдено расчетным путем из уравнения  $\rho(T) = \rho^{T_{o.c}} [1 - \beta(T_{o.c} - T)]$ , где  $\beta = 4,24 \cdot 10^{-3}$  К – температурный коэффициент сопротивления кадмия. Принято  $\rho^{T_{o.c}} = 10,98 \cdot 10^{-8}$  Ом·м при  $T_{o.c} = 293$  К [9]. Для олова и кадмия используем данные, относящиеся к полному сопротивлению, полагая, что при температуре 273 К полное сопротивление в основном определяется составляющей  $\rho_i$ . Зная  $\rho_i^{273K}$  из уравнения (11) для каждого металла, находим  $\rho_i^\theta$  и значения постоянных  $C_{Pb} = 6,83 \cdot 10^{-8}$ ;  $C_{Sn} = 8,44 \cdot 10^{-8}$ ;  $C_{Cd} = 6,88 \cdot 10^{-8}$ , которые позволяют определить  $\rho_i(T)$ .

При известном идеальном сопротивлении  $\rho_i(T)$  и остаточном сопротивлении  $\rho_r$  можно, используя правило Матиссена, подсчитать полное сопротивление, но достаточно трудно численно связать значение  $\rho_r$  с процентным содержанием в металле примесей; поэтому в первом приближении эту величину определим следующим образом. Для свинца воспользуемся законом Видемана–Франца и данными о теплопроводности при 10 К  $\lambda^{10K}$  из [10] и вычисленным по уравнению (11)  $\rho_i^{10K}$ , тогда  $\rho_r = (L_0 T / \lambda^{10K} - \rho_i^{10K}) = 0,098 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, где  $L_0 = 2,45 \cdot 10^{-8}$  Вт·Ом·К<sup>2</sup> – число Лоренца. Экспериментальные данные об электрическом сопротивлении технических сортов кадмия при низких температурах практически отсутствуют или труднодоступны. Из имеющихся данных о теплопроводности чистых олова и кадмия видно, что экспериментальные графики зависимости коэффициента теплопроводности от температуры этих металлов схожи, следовательно, температурные зависимости электрического сопротивления кадмия и олова близкой чистоты также будут близки. Подсчет  $\rho(T)$  для кадмия и олова проводим при заданном соотношении  $\rho_i^{273K} / \rho_r = 50$ , характерном для металлов технической частоты.

В сплавах электрическое сопротивление зависит от объемного состава металлов, являющихся компонентами сплава. Хаотическое расположение ато-

мов компонентов в решетке сплава увеличивает вероятность дополнительного столкновения электронов. Чтобы определить электрическое сопротивление припоя, можно рассмотреть две упрощенные модели. В одной из них ток в объеме припоя проходит параллельно в несоприкасающихся между собой кристаллических структурах каждого компонента; при этом сумма объемов каждого компонента равна общему объему припоя. В этом случае удельное сопротивление припоя  $\rho_s$  выражается формулой

$$\rho_s = \left( \sum_{i=1}^n v_i \rho_i \right)^{-1} = \left( \gamma_s \sum_{i=1}^n m_i / \rho_i \gamma_i \right)^{-1}, \quad (12)$$

где  $\rho_i$  – удельное сопротивление компонента припоя;  $v_i = V_i / V$ ;  $m_i = M_i / M$  – объемная и массовая доля компонента припоя соответственно;  $\gamma_s, \gamma_i$  – плотность припоя и каждого его составляющего металла;  $V, M$  – объем и масса припоя.

Сопротивление припоя при расчете по формуле (12) будет меньше значения, рассчитанного по формуле

$$\rho_s = \sum_{i=1}^n \rho_i v_i = \gamma_s \sum_{i=1}^n \rho_i m_i / \gamma_i, \quad (13)$$

где сопротивление припоя определяется суммой сопротивлений составляющих компонентов.

На рис. 4 представлены зависимости удельных сопротивлений от температуры для материалов, из которых может состоять контактное соединение. Показано рассчитанное по уравнению (13) изменение в зависимости от температуры удельного сопротивления припоя ПОСК 50-18. Температурная зависимость сопротивления технически чистого индия построена по экспериментальным данным, приведенным в [8]. Зависимости  $\rho(T)$  для меди М1 и М3 вычислялись по уравнению Матиссена, где за остаточное сопротивление принимались значения

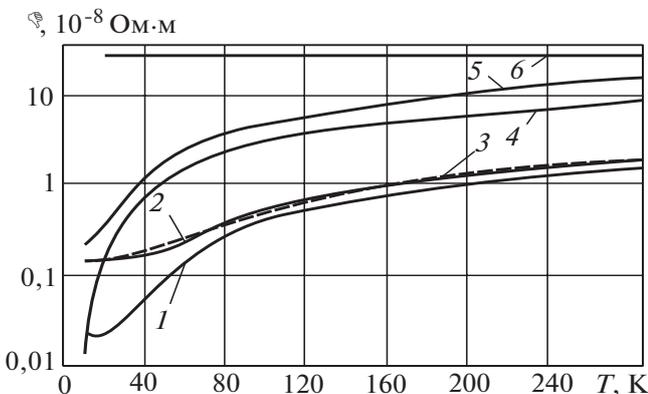


Рис. 4. Расчетные зависимости удельных сопротивлений от температуры материалов в паяном соединении токоввода со сверхпроводником: 1 – медь М1; 2 – медный сплав Cu-155; 3 – медь М3; 4 – индий; 5 – припой ПОСК 50-18; 6 – нержавеющая сталь 316L

удельного сопротивления медных образцов, измеренных в жидком гелии:  $\rho_{4,2} = 0,143 \cdot 10^{-8}$  Ом·м (М3) и  $\rho_{4,2} = 0,0206 \cdot 10^{-8}$  Ом·м (М1). Зависимость удельного сопротивления от температуры для нержавеющей стали марки 316 L взята из [11]. Медный сплав Cu=155, имеющий  $\rho_{20^\circ\text{C}} = 1,83 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, по своим электрическим свойствам близок к меди марки М3.

На рис. 5 показано изменение коэффициента  $\psi = \rho_1 / \delta_1 (\rho_2 \delta_2 + \rho_3 \delta_3)$  в зависимости от температуры. Рассмотрены различные сочетания материалов в контактном соединении: токоввод (медь М1 или М3); припой (ПОСК 50-18 или индий); стабилизатор сверхпроводника (медный сплав Cu-155 или нержавеющая сталь 316L). Принято  $\delta_1 = 1$  мм,  $\delta_2 = 100$  мкм,  $\delta_3 = 50$  мкм. Видно, что наиболее сильные изменения коэффициента  $\psi$  происходят в области температур ниже 40 К, что связано с характером изменения удельных сопротивлений при низких температурах.

**Определение температуры контактного соединения.** По формуле (8) для ВТСП проводника с определенными значениями ширины ленты  $b$ , толщины  $\delta$  и материалом стабилизатора можно подсчитать распределение температуры в соединении, задавая геометрические параметры контактного соединения (длину контакта, толщину токоввода и паяного шва) и определяя условия охлаждения (температуру нижней точки контакта, коэффициент теплоот-

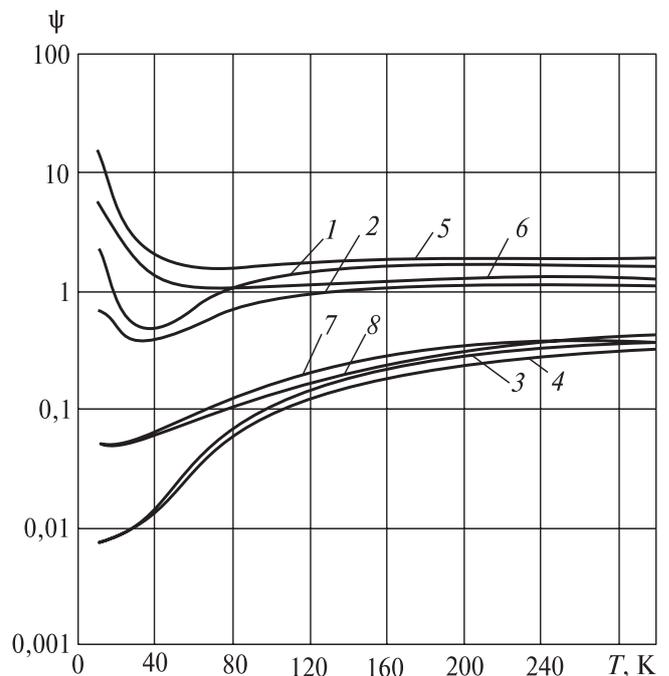


Рис. 5. Зависимость коэффициента  $\psi$  от температуры  $T$  в разных контактных соединениях ВТСП проводов со стабилизатором из медного сплава Cu-155 или нержавеющей стали 316L, припаянных индием (In) или припоем ПОСК 50-18 к токовводам из меди марок М1 и М3: 1 – М1/In/Cu-155; 2 – М1/ПОСК 50-18/Cu-155; 3 – М1/In/316L; 4 – М1/ПОСК 50-18/316L; 5 – М3/In/Cu-155; 6 – М3/ПОСК 50-18/Cu-155; 7 – М3/In/316L; 8 – М3/ПОСК 50-18/316L

дачи в криогенной среде, охлаждающей контакт, и температуру среды). Для определения зависимости  $T(x)$  необходимо задать значение теплового потока  $Q_h$ , который подходит к контактному соединению.

На рис. 6 нанесены расчетные точки изменения температуры вдоль контактного соединения длиной  $L=100$  мм,  $I_0=50$  А. Контакт охлаждается парами азота. Ширина соединяемых лент – ВТСП провода и токоввода из меди марок М1 и М3 – равна  $b = 4,4$  мм. В расчетах было принято: толщина медной ленты, припоя и стабилизатора сверхпроводника соответственно:  $\delta_1=1$  мм,  $\delta_2=100$  мм,  $\delta_3=50$  мкм;  $T_c=78$  К;  $T_0=80$  К;  $\alpha=5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $Q_h=0,5$  Вт. Расчеты показали, что при одинаковых условиях охлаждения основное влияние на максимальную температуру контакта оказывает материал токоввода, а не тип припоя или материал стабилизатора. При одинаковом материале токоввода и равной силе тока наибольшая температура будет, как и следовало ожидать, в соединении ПОСК/316L, а наименьшая – в соединении In/Cu-155 ( в котором используются материалы с меньшим электрическим сопротивлением). Для исследуемой геометрии соединения при равной силе тока и плотности тока до 50 А/мм<sup>2</sup> эта равность температур невелика (1–2 К). При увеличении плотности тока изменение температуры вдоль контактного соединения со сверхпроводником, и температура соединения может оказаться выше температуры перехода сверхпроводника в нормальное состояние.

Снижения температуры в контактном соединении можно добиться увеличением толщины токоввода. На рис. 7 показано распределение температуры вдоль контактного соединения с токовводами разной толщины, а на рис. 8,а – изменение максимальной температуры  $T_h$

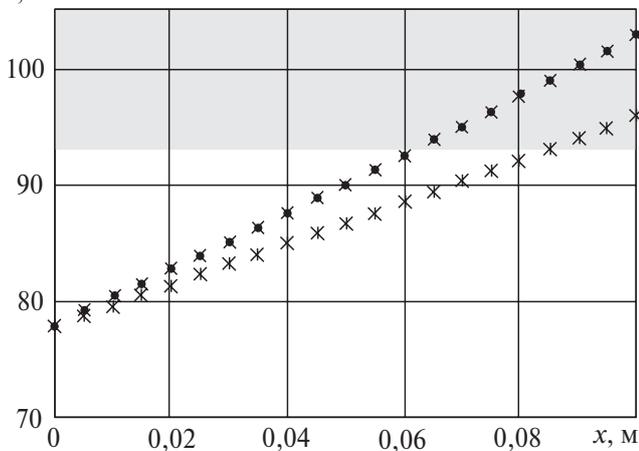


Рис. 6. Изменение температуры  $T$  вдоль паяного соединения токоввода с ВТСП проводом, находящегося в парах азота ( $x$  – осевая координата): заштрихованная область – зона возможного перехода сверхпроводника в нормальное состояние; ● – М3/ПОСК/Cu-155; + – М1/ПОСК/Cu-155; × – М3/In/316L; \* – М1/In/316L

максимальной температуры в контактном соединении. Длина контакта, толщина припоя и стабилизатора сверхпроводника аналогичны геометрии контакта,

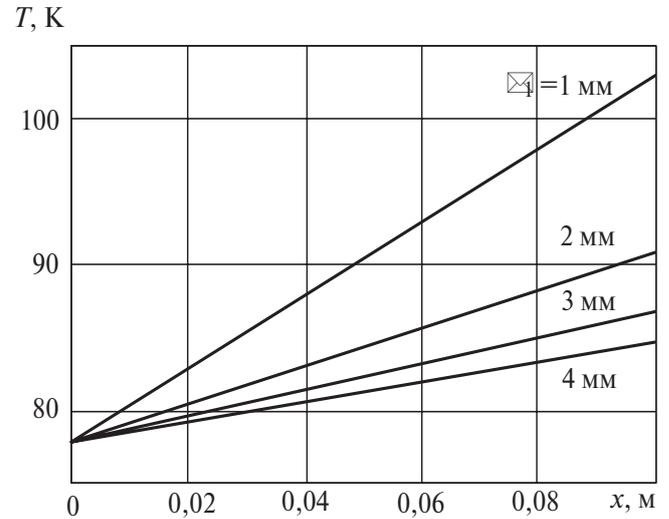


Рис. 7. Распределение температуры  $T$  вдоль осевой координаты в соединении М3/ПОСК/Cu-155 при различной толщине медной ленты  $\delta_1$

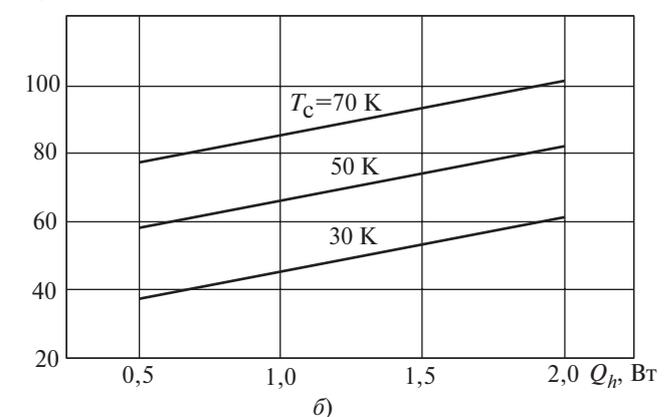
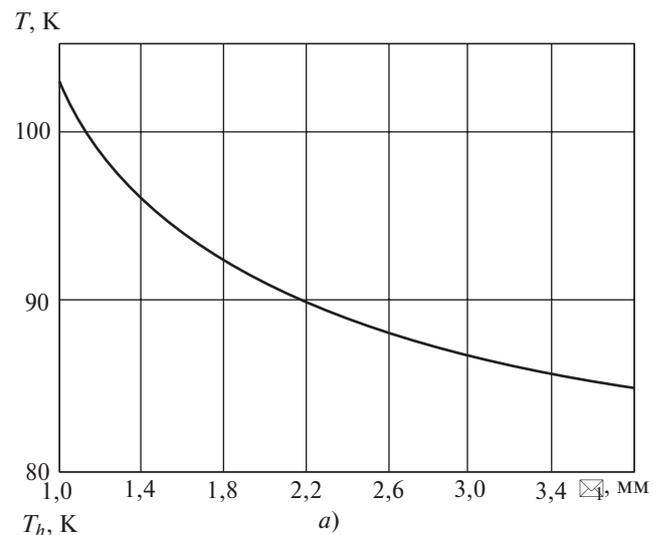


Рис. 8. Зависимость максимальной температуры  $T_h$  контактного соединения от толщины медной ленты  $\delta_1$  (а) и притока тепла к контакту  $Q_h$  при разной температуре охлаждения контакта  $T_c$  криокулером (б)

условиям его охлаждения и притоку тепла к контакту, отмеченным при анализе рис. 6.

Охлаждение контактного соединения может осуществляться криокулером, как показано на рис. 1,в. В этом случае вместо фиксированной температуры нижнего конца контакта, соответствующей температуре кипения жидкого криоагента при существующем давлении, распределение температуры вдоль длины контакта будет определяться температурой нижнего конца  $T_{x=0}=T_c$ . Эта температура зависит от холодильной мощности криокулера и условий теплообмена между криокулером и охлаждаемым контактом. На рис. 8,б показано изменение максимальной температуры в контактном соединении  $T_{x=L}=T_h$ , вычисленное по уравнению (10) при разных температурах нижнего конца контакта, в зависимости от теплового потока  $Q_h$ , поступающего в контакт. Этот приток тепла оказывает сильное влияние на значение величины  $T_h$ .

**Выводы.** Получены удобные для расчетов соотношения, позволяющие определить температуру контактного соединения токоввода и ВТСП проводника в зависимости от геометрических параметров контакта, а также теплофизических и электрических свойств его материалов. Кроме того, полученные аналитические зависимости позволяют выявить распределение температуры и теплового потока в соединении при различных условиях охлаждения — криогенной жидкостью или ее паром, а также при использовании криокулеров. Рассмотренный метод исследования тепловой характеристики места соединения токоввода с ВТСП проводом может быть использован при конструировании сверхпроводниковых устройств с целью определения значения температуры в контактном соединении, не допускающего переход сверхпроводника в нормальное состояние или даже нарушения его электрической связи с токовводом.

На основе анализа распределения температуры в паяном соединении медных токовводов с ВТСП проводником, стабилизированным медным сплавом или нержавеющей сталью, установлено, что наибольшее влияние на максимальную температуру

соединения оказывает при прочих равных условиях удельное сопротивление меди токоввода, а также уровень теплового потока, который поступает в контактное соединение по токовводу. Для рассмотренной геометрии контактного соединения при охлаждении контакта парами азота и при одном и том же материале токоввода влияние типа припоя и материала стабилизатора сверхпроводника имеет второстепенное значение.

Автор выражает благодарность проф. Л.К. Ковалеву за полезное обсуждение работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Duckworth R.C., Zhang Y., Gouge M.J. et al. Voltage distribution and mechanical strength in splice joints made from asmanufactured YBCO coated conductors. — Advances in Cryogenic Engineering Materials, 2010, vol. 56.
2. Lucas E., Steckly Z.J.J., Laverick C., Pewitt G. Проводимость контактов со сверхпроводниками. — В кн.: Сверхпроводящие соленоиды. — М.: Мир, 1965.
3. Уилсон М. Сверхпроводящие магниты. — М.: Мир, 1985.
4. Masur L.J., Kellers J., Kalsi S. et al. Industrial HTS conductors: status and application. — Proc. EUCAS 2003, Sorrento (Italy), 15–18 Sept.
5. Guidelines for Handling and Soldering Amperium TM wire. — Service Note SN002, AMSC, 2010.
6. Гладков А.С., Подвигина О.П., Чернов О.В. Пайка деталей электровакуумных приборов. — М.: Энергия, 1967.
7. Bardeen J. Electrical conductivity of metals. — J. Appl. Phys., 1940, vol. 11, iss. 2.
8. Справочник по физико-техническим основам криогеники. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
9. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. — М.: ГИФМЛ, 1959.
10. Новицкий Л.А., Кожевников И.Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. — М.: Машиностроение, 1975.
11. Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы. — М.: Мир, 1976.

[10.05.11]

*Автор: Буянов Юрий Леонидович окончил в 1966 г. Московский энергетический институт (МЭИ). В 1982 г. защитил в МЭИ кандидатскую диссертацию по исследованию криотокковводов в сверхпроводящие магнитные устройства. Заведующий сектором Объединенного института высоких температур РАН.*