

УДК 538.945

**АНАЛИЗ ДОПУСТИМЫХ ТОКОВЫХ НАГРУЗОК РЕЗИСТИВНЫХ ТОКОВОДОВ
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ***М.Н. Макаренко, В.Р. Романовский**НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

Обсуждается проблема выбора материала для резистивных тоководов сверхпроводящих магнитов. Исследован широкий диапазон их рабочих режимов. Показано, что медь является далеко не лучшим металлом для изготовления тоководов, особенно работающих при токах выше оптимальных. При этих режимах они склонны к быстрому перегреву, тогда как тоководы из сплавов могут выдерживать токовые нагрузки, в несколько раз превышающие оптимальный ток. Более того, в отсутствие тока теплопритоки от тоководов, изготовленных из сплавов, на 50% ниже, чем у меди, что является их безусловным преимуществом. Физическая причина этого эффекта — сильная температурная зависимость удельного сопротивления меди, что приводит к положительной обратной связи в процессе повышения температуры тоководов. Наряду с этим тоководы, изготовленные из сплавов, имеют и другие преимущества: существенно большее время их перегрева, а также более широкие возможности для увеличения охлаждающей поверхности.

Ключевые слова: токовод, токовая нагрузка, температура, теплопритоки, электрическое сопротивление, теплопроводность, медь, латунь, нержавеющая сталь.

**ANALYSIS OF PERMISSIBLE CURRENT LOADS OF RESISTIVE CURRENT LEADS
OF SUPERCONDUCTING MAGNET SYSTEMS***M.N. Makarenko, V.R. Romanovskii**NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

The problem of material selection for resistive current leads of superconducting magnets is discussed. A wide range of their operating modes is investigated. It is shown that copper is by no means the best metal for making current leads, especially for currents above the optimum. At these modes they are prone to rapid overheating, whereas alloy current leads can withstand current loads several times higher than the optimum current. Moreover, in the absence of current, heat fluxes from conductors made of alloys are 50% lower than those made of copper, which is their undoubted advantage. The physical reason for this effect is the strong temperature dependence of the resistivity of copper, which results in a positive feedback in the temperature rise of current leads. Alongside this, current leads made of alloys also have other advantages: their overheating time is significantly longer, and there is also more scope for increasing the cooling surface.

Key words: current lead, current load, temperature, heat fluxes, electrical resistance, thermal conductivity, copper, brass, stainless steel.

DOI: 10.21517/0202-3822-2021-44-4-117-122

ВВЕДЕНИЕ

Все сверхпроводящие устройства, работающие при криогенной температуре, как правило, соединены с источниками питания с помощью тоководов. Теплоприток от холодного конца токовода в криогенную область может составлять значительную часть общих потерь тепла. Поэтому его необходимо свести к минимуму. Хорошо известно, что эти потери определяются джоулевым нагревом и теплопроводностью вдоль токовода. Оба компонента связаны между собой законом Видемана—Франца. Поэтому для любой заданной геометрии тоководов и условий их охлаждения существует минимальное отношение теплового потока Q к оптимальному значению тока I_{opt} , которое может быть рассчитано численно или даже аналитически [1—7].

Как было показано ранее [1], значения Q/I_{opt} являются одинаковыми для всех металлов, которые подчиняются закону Видемана—Франца. Этот закон по крайней мере с 20%-ной точностью верен для большинства резистивных материалов (медь, латунь, нержавеющая сталь) [7] в широком диапазоне температуры хладагента (от комнатной температуры до температуры жидкого гелия). Как правило, тоководы изготавливаются из меди [5]. Однако медные тоководы склонны к перегреву даже при незначительном (менее чем на 20%) превышении оптимального тока. Низкая перегрузочная способность медных тоководов является результатом сильной температурной зависимости их удельного сопротивления (особенно для чистой меди при низкой температуре). Это приводит к положительной обратной связи в процессе повышения температуры токовода: рост температуры приводит к увеличению удельного электрического сопротивления и, следовательно, джоулева тепловыделения, что, в свою очередь, вызы-

вает дополнительное увеличение температуры токоввода. В результате, как было показано в [7], токовводы, изготовленные из сплавов (например, латуни или даже нержавеющей стали) могут выдержать существенно большую токовую перегрузку. Более того, для сверхпроводящих устройств с прерывистым циклом ввода-вывода тока некоторый выигрыш в усреднённых по времени теплопритоках может быть получен в результате использования перегруженных токовых режимов. В статье анализируются преимущества и ограничения токовводов, изготовленных из различных резистивных материалов.

МОДЕЛЬ

Рассмотрим токоввод, который имеет постоянное сечение S и длину L . Численное моделирование его теплового состояния проведём для случаев, когда токоввод либо охлаждается, либо нет испаряющимся хладагентом. Согласно [1, 5] для описания теплового состояния токоввода используем следующее стационарное одномерное уравнение теплопроводности

$$\frac{d}{dx} \left[k(T) \frac{dT}{dx} \right] - \beta \frac{mC_p}{S} \frac{dT}{dx} + \frac{I^2}{S^2} \rho(T) = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями

$$T(0) = T_0, \quad T(L) = T_L \quad (2)$$

на холодном и тёплом концах токоввода соответственно.

Здесь T — температура в произвольной точке токоввода ($0 < x < L$); I — рабочий ток; T_0 — температура холодного конца; T_L — температура тёплого конца; m — скорость испарения газа; β — коэффициент эффективности охлаждения токоввода [1], позволяющий описать его тепловое состояние как без охлаждения ($\beta = 0$), так и при идеальном охлаждении ($\beta = 1$), когда температура токоввода равна температуре охлаждающего газа; C_p — теплоёмкость газообразного хладагента при нормальном давлении; k и ρ — теплопроводность и удельное электрическое сопротивление токоввода соответственно. Как и в [2, 3, 5], будем предполагать, что их значения удовлетворяют закону Видемана—Франца, т.е. имеет место соотношение

$$k(T)\rho(T) = 2,45 \cdot 10^{-8} T. \quad (3)$$

Расчёты проводились для токовводов, изготовленных из меди с $RRR = 52$ (медь марки М1), латуни и нержавеющей стали, при различных значениях $I/I_{\text{опт}}$. При этом удельное электрическое сопротивление меди будем вычислять согласно [8], т.е. используя формулу

$$\rho(T) = 3,4 \cdot 10^{-10} + \begin{cases} 0,3792 \cdot 10^{-14} T^3, & 4,2 \text{ K} < T < 78 \text{ K} \\ 0,18 \cdot 10^{-8} + 0,7059 \cdot 10^{-10} (T - 78), & T \geq 78 \text{ K} \end{cases} \quad [\text{Ом} \cdot \text{м}].$$

Для латуни и нержавеющей стали температурные зависимости $\rho(T)$ опишем соотношениями

$$\rho(T) = \frac{1073,881 + T}{251,5024 - 0,2080677T} 10^{-8} [\text{Ом} \cdot \text{м}]; \quad \rho(T) = 1,6 \cdot 10^{-12} T^2 + 2,57 \cdot 10^{-10} T + 4,89 \cdot 10^{-7} [\text{Ом} \cdot \text{м}]$$

соответственно, аппроксимируя табличные данные, приведённые в [9].

Исследуем два предельных режима охлаждения токоввода: без охлаждения и при идеальном охлаждении газообразным гелием для двух значений температуры на холодном конце. Последнюю примем равной либо $T_0 = 4,2 \text{ K}$, т.е. рассмотрим токоввод, предназначенный для ввода тока в низкотемпературные сверхпроводящие устройства, либо равной $T_0 = 65 \text{ K}$, т.е. для токоввода, изготовленного для высокотемпературных сверхпроводящих устройств. Массовый расход газообразного гелия m определим из условия $mr = Q_c$, где r — скрытая теплота парообразования охлаждающей жидкости и $Q_c = Sk(T)dT/dx|_{x=0}$ — тепловой поток на холодном конце токоввода. Физически это означает, что при $T_0 = 4,2 \text{ K}$ испарение гелия определяется только тепловым потоком от холодного конца токоввода,

т.е. используется так называемая концепция «свой газ». Температуру тёплого конца токовода во всех случаях примем равной $T_L = 300$ К, а для описания физических свойств гелия воспользуемся общепринятыми значениями $r = 20,6$ кДж·кг⁻¹, $C_p = 5,22$ кДж·кг⁻¹·К⁻¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение температуры вдоль тоководов, изготовленных из меди или латуни, при различных значениях I/I_{opt} и T_0 показано на рис. 1. При этом рис. 1, а соответствует $T_0 = 4,2$ К при идеальном охлаждении, рис. 1, б — при $T_0 = 4,2$ К и без охлаждения, рис. 1, в — при $T_0 = 65$ К и идеальном охлаждении, рис. 1, г — при $T_0 = 65$ К и без охлаждения.

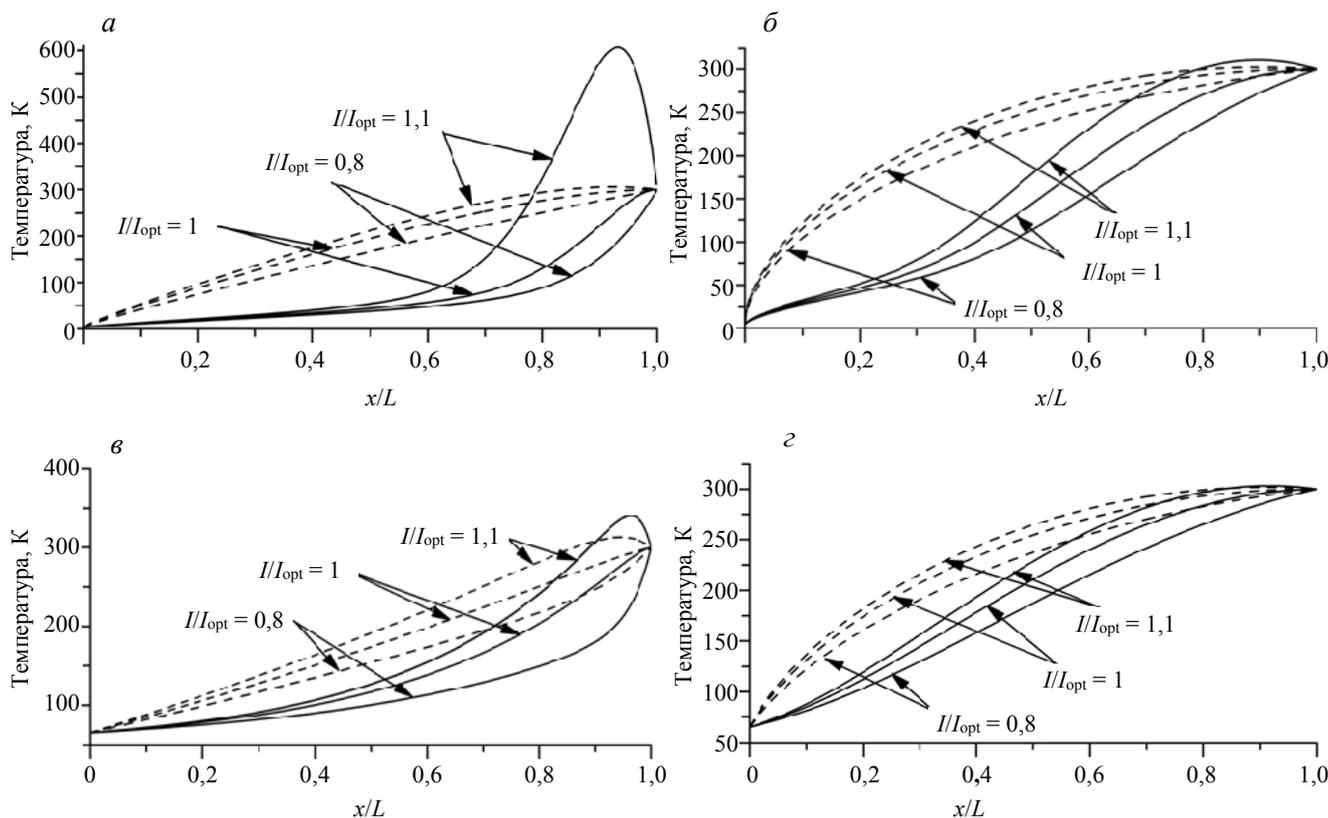


Рис. 1. Распределение температуры вдоль тоководов при различных значениях температуры холодного конца, рабочих токов и условиях охлаждения: а — идеальное охлаждение ($\rho = 1$), $T_0 = 4,2$ К; б — без охлаждения ($\rho = 0$); $T_0 = 4,2$ К; в — идеальное охлаждение ($\rho = 1$), $T_0 = 65$ К; г — без охлаждения ($\rho = 0$); $T_0 = 65$ К; — — медь; - - - латунь

В табл. 1 приведены:

— электрическое сопротивление токовода, усреднённое по его длине ($\langle \rho \rangle = \int_0^L \rho(T) d(x/L)$);

— среднее значение температуры токовода ($\langle T \rangle = \int_0^L T(x) d(x/L)$);

— отношение оптимальных значений геометрических факторов $g = (S/L)_{opt}$, определённых для латуни (g_a) и меди (g_{cu}).

Т а б л и ц а 1. Сравнение оптимальных тоководов при $T_0 = 4,2$ К и идеальном охлаждении

Материал	$\langle \rho \rangle$, ρm	$\langle T \rangle$, К	g_{alloy}/g_{Cu}
Медь	$7,9 \cdot 10^{-9}$	160	1
Латунь	$4,3 \cdot 10^{-8}$	10	5,4

Максимальная температура T_{\max} в зависимости от величины токовой нагрузки I/I_{opt} для токовводов из различных материалов при $T_0 = 4,2$ и $T_0 = 65$ К показана на рис. 2.

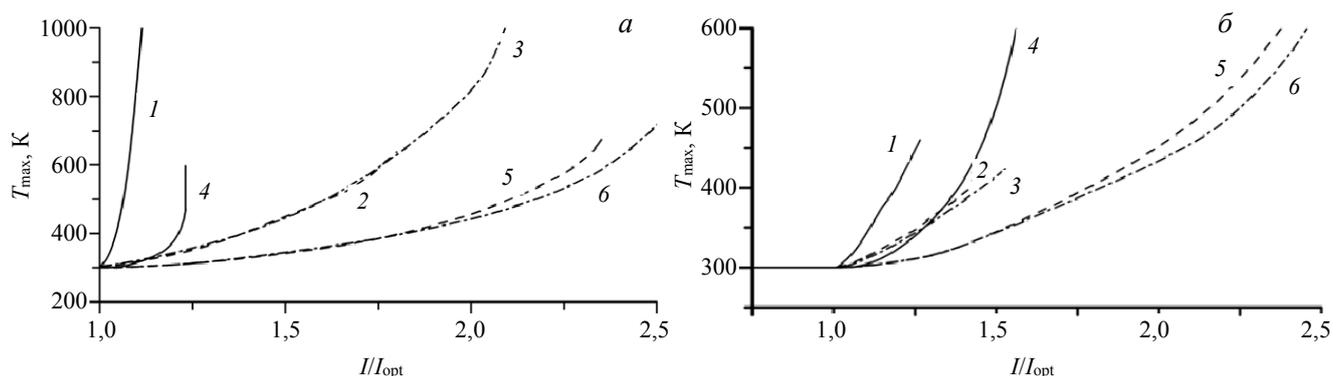


Рис. 2. Максимальная температура токовводов, изготовленных из различных резистивных материалов, в зависимости от токовой нагрузки при различных условиях охлаждения: *a* — 1, 2, 3 — идеальное охлаждение, 4, 5, 6 — без охлаждения, 1, 4 — медь, 2, 5 — латунь, 3, 6 — нержавеющая сталь ($T_0 = 4,2$ К, $T_L = 300$ К); *б* — 1, 2, 3 — идеальное охлаждение, 4, 5, 6 — без охлаждения, 1, 4 — медь, 2, 5 — латунь, 3, 6 — нержавеющая сталь ($T_0 = 65$ К, $T_L = 300$ К)

Относительные величины теплопритоков на холодном конце токоввода для различных условий охлаждения в зависимости от нормированного тока показаны на рис. 3 для всех трёх рассматриваемых резистивных материалов.

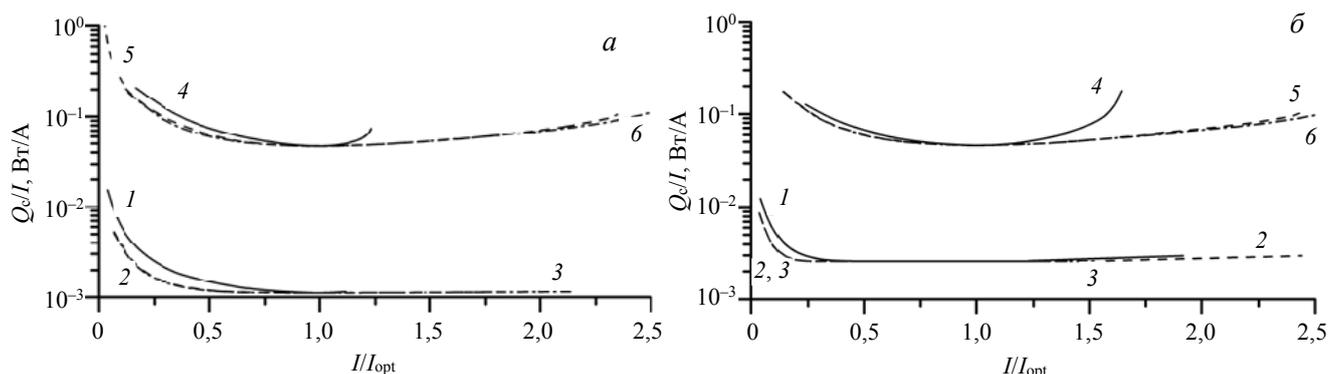


Рис. 3. Теплопритоки в зависимости от токовой нагрузки для различных условий охлаждения. Обозначения, как на рис. 2

Отношение теплопритока на холодном конце токоввода в отсутствие тока ($I = 0$) к теплопритоку при $I = I_{\text{opt}}$ приведено в табл. 2 и 3 для $T_0 = 4,2$ и $T_0 = 65$ К соответственно.

Т а б л и ц а 2. Значения $Q_{I=0}/Q_{\text{opt}}$ при 4,2 К

Материал	Идеальное охлаждение	Без охлаждения
Медь	0,55	0,73
Латунь	0,34	0,53
Нержавеющая сталь	0,33	0,55

Т а б л и ц а 3. Значения $Q_{I=0}/Q_{\text{opt}}$ при 65 К

Материал	Идеальное охлаждение	Без охлаждения
Медь	0,20	0,65
Латунь	0,12	0,53
Нержавеющая сталь	0,12	0,52

Как следовало ожидать и наглядно демонстрирует рис. 1, при оптимальной токовой нагрузке ($I/I_{\text{opt}} = 1$) теплообмен между его тёплым концом и окружающей средой отсутствует ($Q = dT/dx|_{x=L} = 0$). При токах $I/I_{\text{opt}} < 1$ существует некоторый теплоприток в токоввод ($Q = dT/dx|_{x=L} > 0$), в то время как при $I/I_{\text{opt}} > 1$ существует конечный теплоприток из токоввода ($Q = dT/dx|_{x=L} < 0$). В последнем случае возникающий перегрев токоввода приводит к тому, что вблизи его тёплого конца возникает максимальная температура. Во всех случаях для медных токовводов градиенты температуры намного больше и T_{\max} ближе к тёплому концу токоввода, чем для токовводов, изготовленных из сплавов.

Основное отличие в поведении перегруженных тоководов, изготовленных из разных материалов, показано на рис. 2. Видно, что тоководы, изготовленные из сплавов, могут выдержать даже двойную токовую нагрузку с температурой нагрева до $T_{\max} \leq 450$ К, в то время как токовая нагрузка медных тоководов более чем на 20% приводит к их сильному перегреву. Такая низкая перегрузочная способность медных тоководов (особенно из чистой меди при низкой температуре) обусловлена положительной обратной связью между температурой токовода и его сопротивлением, когда в результате джоулева тепловыделения повышение температуры токовода сопровождается соответствующим увеличением сопротивления меди.

В некоторых случаях необходимость использования тоководов с большим сечением может ограничить их применение, если они изготовлены из сплавов. Это можно рассматривать как их недостаток. Однако следует обратить внимание, что в случае тоководов, изготовленных из сплавов, их поверхность охлаждения может быть без особого труда сделана в несколько раз больше, чем у медных тоководов. Действительно, в первом приближении площадь теплообмена обратно пропорциональна сечению, т.е. для тоководов из латуни или нержавеющей стали она может быть во много раз больше по сравнению с тоководами из меди.

Другим важным преимуществом тоководов, изготовленных из сплавов, являются их большие времена перегрева τ , т.е. время их нагрева до максимально допустимой температуры в экстремальных случаях (скажем, при потере охлаждающей жидкости). Оценим τ в рамках простейшей модели, рассматривая токовод как адиабатически изолированный стержень, подвергающийся джоулеву нагреву. В этом случае соответствующее уравнение теплового баланса можно записать в виде $\langle \rho \rangle J^2 S L \tau = C S \Delta T$.

Здесь ΔT — допустимое повышение средней температуры; $\langle \rho \rangle$ — среднее значение удельного электрического сопротивления токовода; J — плотность тока; C — средняя объёмная теплоёмкость. Это уравнение можно переписать в виде

$$\tau = C \langle \rho \rangle \Delta T L^2 U^{-2}, \quad (4)$$

где U — падение напряжения вдоль токовода при его нагреве.

Для медных тоководов значение ρ_{Cu} приблизительно равно 20 с при $L = 1$ м и $U = 1$ В. Согласно формуле (4) соотношение между характерными временами для тоководов, изготовленных из латуни и меди, определяется как $\rho_{\text{лат}}/\rho_{\text{Cu}} \sim \rho_{\text{лат}}/\rho_{\text{Cu}}$, т.е. $\rho_{\text{лат}}/\rho_{\text{Cu}} \gg 1$ (около 4,4). Данная проблема особенно важна для обеспечения работоспособности сверхпроводящей части гибридных тоководов, т.е. тоководов, содержащих сверхпроводящую часть.

Высокие значения постоянных времени перегрева делают тоководы из сплавов предпочтительнее и в импульсных режимах ввода тока. В частности, были проанализированы импульсные рабочие режимы сильно перегруженных тоководов из латуни, которые являлись прототипом тоководов для обмоток (как тороидальной, так и полоидальных) установки типа KSTAR (корейский токамак со сверхпроводящими магнитами). При оптимальном токе, равном 13 кА, эти тоководы, как показали расчёты, могут устойчиво выдержать токовую нагрузку более, чем 26 кА, т.е. могут оставаться работоспособными при $I/I_{\text{opt}} > 2$.

В отдельных случаях при изготовлении тоководов может быть использована медь с очень низкими значениями RRR (около 5). Этот подход был успешно использован при проектировании и создании тоководов для магнитов детектора ATLAS в ЦЕРНе [10] с рабочим током, равным 20 кА.

Как следует из рис. 3, для всех рассматриваемых металлов минимальные теплопритоки на холодном конце $(Q_c/I)_{\text{мин}}$ практически одинаковы для рассмотренных предельных режимов охлаждения. Отметим, что этот результат ранее был получен аналитически в [1]. На рис. 3 также показано, что для тоководов из сплавов значения Q_c/I_{opt} в относительно широком диапазоне изменения тока остаются практически постоянными. Это означает в том числе, что тоководы из сплавов менее чувствительны к точности расчётов. Сравнивая рис. 3, а и б, видно, что в целом значения Q_c/I для $T_0 = 4,2$ и $T_0 = 65$ К одного порядка.

Ещё одно и весьма важное преимущество тоководов, изготовленных из сплавов, иллюстрируют табл. 2 и 3. Для $T_0 = 4,2$ и $T_0 = 65$ К теплопритоки на холодном конце в отсутствие тока значительно ниже (практически на 50%), чем у медных тоководов как при идеальном охлаждении, так и без охлаждения.

Обсуждённые закономерности справедливы для тоководов на постоянном токе. В случае ввода переменного тока необходимо учитывать дополнительные потери. В первом приближении потери на токах

промышленной частоты не зависят от материала токовводов, так как более высокая плотность потерь на переменном токе в медных токовводах компенсируется их меньшим объёмом.

Отметим, что наш анализ не учитывал потери из-за сопротивлений контактов в рабочей области сверхпроводящих устройств.

ВЫВОДЫ

Исследованный широкий диапазон рабочих режимов для традиционных резистивных токовводов, охлаждаемых жидким гелием, показывает, что медь по сравнению со сплавами (латунь или нержавеющая сталь) является далеко не лучшим материалом для изготовления токовводов, особенно работающих при токах, которые выше, чем оптимальный ток. Некоторым недостатком токовводов, изготовленных из латуни или нержавеющей стали, являются их более высокие оптимальные значения S/L . При той же длине их сечение должно быть в несколько раз больше. Тем не менее список преимуществ токовводов, изготовленных из сплавов, намного больше. Они заключаются в следующем:

- значительно выше устойчивость к токовым перегрузкам;
- нечувствительность теплопритоков на холодном конце, нормированных на транспортный ток Q_c/I_{opt} , в широком диапазоне изменения токов;
- значительно более низкие теплопритоки на холодном конце в отсутствие тока;
- значительно большие времена перегрева;
- широкие возможности для увеличения площади теплоотдачи.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» и ГК «Росатом» в рамках федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Keilin V.E., Klimenko E.Yu. Investigation into high current leads in liquid helium applications. — Cryogenics, 1966, vol. 6, № 8, p. 222—228.
2. Inai N. Temperature distribution along a gas cooled cryogenic lead wire. — Ibid., 1969, vol. 11, № 4, p. 115—118.
3. Lock J.M. Optimization of current leads into a cryostat. — Ibid., 1969, vol. 11, № 12, p. 438—442.
4. Tsao C.K. Power loss and temperature distribution of a gas-cooled cryogenic current lead. — Ibid., 1974, vol. 14, № 11, p. 601—606.
5. Wilson M.N. Superconducting Magnets. — Oxford: Clarendon, 1983, ch. 11.
6. Kofler H., Ramsauer F. Influence of copper quality on overload performance of current leads. — Cryogenics, (ICEC-14 Proceedings), 1992, vol. 32, № 10, p. 410—413.
7. Gavrilin A.V., Keilin V.E. Overloaded Current Leads. — In: MT-15 Proceedings. Beijing, China. Science Press, 1998, p. 1254—1257.
8. Сенин В.В. Теплопроводность и электрическое сопротивление гиперпроводников. — ИФЖ, 1975, т. XXIX, № 6, с. 1108—1109.
9. Кожевников И.Г., Новицкий Л.А. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. — М.: Машиностроение, 1982.
10. Dudarev A.V., ten Kate H.H.J., Boxman E.W., Keilin V.E. et al. 20,5 kA current leads for Atlas barrel toroid superconducting magnets. — IEEE Appl. Supercon., 2002, vol. 12, № 1, p. 1289—1292.



Марина Николаевна Макаренко, заместитель начальника лаборатории сверхпроводниковых и криогенных устройств; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
e-mail: panina-marina@yandex.ru



Владимир Романович Романовский, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
e-mail: mosrem@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2021 г.
После доработки 24 сентября 2021 г.
Принята к публикации 28 сентября 2021 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 4, с. 117—122.