

Разработка 600-А токоввода с использованием высокотемпературного сверхпроводника

И.В.Богданов, Л.М.Васильев, В.В.Зубко, С.С.Козуб, К.П.Мызников,
П.И.Слабодчиков, В.В.Сытник
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Введение

Интенсивные исследования технологии изготовления высокотемпературных сверхпроводников (ИТСП) и их электрофизических свойств, проводимые в последнее десятилетие многочисленными научными центрами, позволили вплотную подойти к практическому использованию ВТСП-изделий. Согласно анализу ситуации и прогнозам по рынку ВТСП-изделий, выполненным ASC (Американской Сверхпроводящей Корпорацией), из изделий на основе ВТСП наибольшее значение приобретают токовводы.

Создаваемый в ЦЕРНе Большой Адронный Колайдер (LHC) будет иметь 8000 сверхпроводящих (СП) магнитов, которые запитываются током от 25 до 12500 А через 2600 токовводов, причем 1000 из них будет иметь номинальный ток 600 А [1]. Для уменьшения тепловой нагрузки на жидкий гелий планируется изготовить эти токовводы из высокотемпературного сверхпроводника. Это позволит примерно на порядок величины снизить теплоприток по токовводам к жидкому гелию и в три раза уменьшить энергозатраты на охлаждение токовводов. Данная работа посвящена разработке конструкции 600-А токоввода, низкотемпературная часть которого выполнена из ВТСП.

Выбор ВТСП для 600-А токоввода

При разработке 600-А токоввода были выдвинуты следующие требования: теплоприток по токовводу к жидкому гелию менее 0,06 Вт; расход гелия на охлаждение резистивной части менее 0,04 г/с; падение давления этого потока гелия в токовводе менее 0,05 бар, длина и диаметр токоввода не более 1 м и 30 мм; 100 термических и 3000 электрических циклов в течение 15 лет.

В настоящее время в наибольшей степени таким требованиям отвечают ВТСП на основе металлокерамики BSCCO. Создан токоввод на основе труб из керамики Bi-2212 [2]. Испытания этого токоввода показали, что при быстром изменении температуры на стенках труб появляются трещины. Устойчивы к тепловым ударам токовводы, изготовленные на основе многожильной Bi-2223 ленты в матрице из сплава $Ag + 1 \text{ ат.}\% Au$ [3]. Однако этот сплав имеет достаточно высокую теплопроводность [4], и при ограниченной длине токоввода возникает проблема обеспечения теплопритока менее 0,06 Вт [5].

В НИИ НМ им. Бочвара разработана многожильная ВТСП-лента из керамики Bi-2223 в матрице из сплава $Ag + 10 \text{ ат.}\% Au$ и совместно с ИФВЭ исследованы ее электрические, механические и тепловые свойства [6]. Критический ток короткого образца этой ленты при 77 К равен 19 А, критическая плотность тока на сечение керамики составляет 6700 А/см^2 , что в 2,5 раза выше, чем на близком по составу материале [7]. С увеличением длины образца от 20 до 350 мм критический ток упал 1,6 раза, а при понижении температуры до 50 К — увеличился в 2,5 раза. Измерения тепловых характеристик ВТСП-ленты показали, что увеличение содержания Au в матрице с 1 до 10 ат. % понизило теплопроводность в 4,5 раза. Относительная термическая деформация этой ленты в интервале температур 300–77 К составила 60,29%, т.е. примерно такая же, как у нержавеющей стали X18H10T, — 0,28%.

Разработка конструкции токовода

На рис.1 представлена схема токовода, резистивная часть которого состоит из медных проволок длиной 500 мм, расположенных в нержавеющей трубе и охлаждаемых гелием с температурой на входе 20 К. ВТСП-часть токовода состоит из 11 токовых элементов длиной 350 мм, расположенных на внутренней нержавеющей трубе и охлаждаемых парами гелия, которые проходят в кольцевом зазоре между ВТСП-лентами и наружной нержавеющей трубой и выходят через отверстия в верхней части трубы. Каждый токовый элемент состоит из трех ВТСП-лент. 33 ВТСП-ленты взяты, чтобы обеспечить ток 600 А при температуре 60 К на верхнем конце ВТСП-части. Нижние концы ВТСП-лент спаяны с $NbTi$ проводом диаметром 1,35 мм и находятся в жидком гелии.

Для расчета температурного поля токовода использовалась система уравнений, описывающих теплообмен в каждой его части

$$(c\rho S)_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left((\lambda S)_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) - \sum_j (\alpha\Pi)_i^j (T_i - U_j) - \sum_k (k\Pi)_k (T_i - T_k) + q_l(\tau),$$

$$(c_p G)_j \left(\frac{1}{w_j} \frac{\partial U_j}{\partial \tau} + \frac{\partial U_j}{\partial x} \right) = \sum_i (\alpha\Pi)_i^j (T_i - U_j),$$

где T_i — температура элемента; U_j — температура гелия; $(c\rho)_i$ — теплоемкость и плотность элемента; λ — теплопроводность элемента; S — сечение элемента; $(k\Pi)_k$ характеризует теплопередачу между элементами, $(\alpha\Pi)_i^j$ — теплопередачу к гелию; q_l — плотность энергии, выделяющейся в элементе; C_p — теплоемкость гелия; G_j и w_j — расход и скорость гелия.

Для определения перепада давлений в резистивной части использовалось уравнение

$$\frac{G}{w} \frac{\partial w}{\partial \tau} + G \frac{\partial w}{\partial x} = S\rho(U)g - S(x) \frac{\partial p}{\partial x} - \xi \frac{\rho(U)w^2}{2d_e} S,$$

где S — поперечное сечение; ρ — плотность гелия; d_e — эквивалентный диаметр; ξ — местный коэффициент гидравлического сопротивления; p — давление.

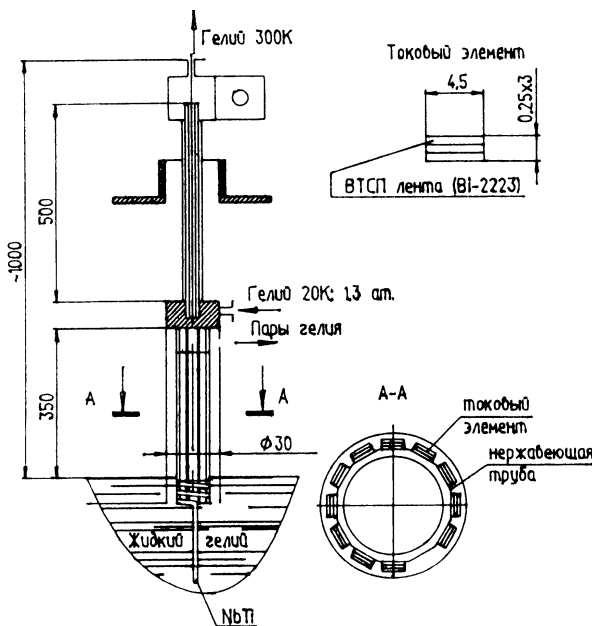


Рис. 1: Схема 600-А токовода и поперечное сечение его ВТСП-части.

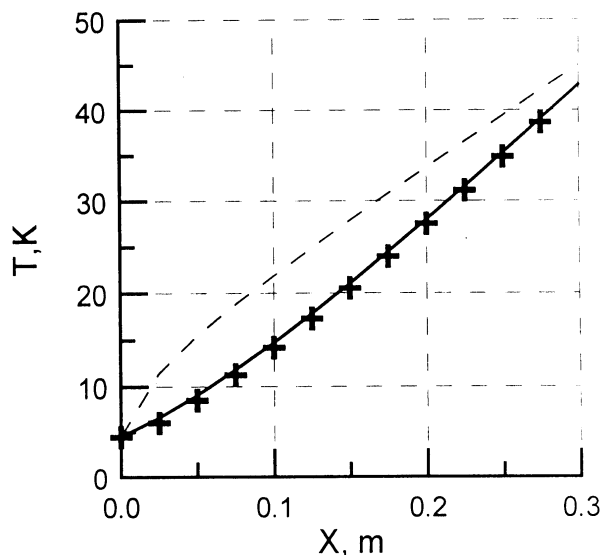


Рис. 2: Температурный профиль ВТСП-части при токе 600 А. Сплошная линия — охлаждение парами гелия, штриховая — без охлаждения, + — пары гелия.

На основе проведенных расчетов определена конструкция резистивной части токоввода. Она состоит из 2500 медных проволок диаметром 0,13 мм ($\rho_{300}/\rho_{10} = 80$), помещенных в нержавеющую трубу диаметром 14,1 мм, что соответствует плотности упаковки 29%. Оптимальный расход гелия для охлаждения проволок составляет 0,03 г/с, и его давление падает в резистивной части на 0,025 бар. Расход гелия определялся из условия минимизации теплопритока по медным проволокам к ВТСП-части и обеспечения температуры 300 К на верхнем конце токоввода при токе 600 А.

На рис.2 показан расчетный профиль температур ВТСП-части токоввода при токе 600 А. Видно, что теплообмен между ВТСП-лентами и парами гелия имеет удовлетворительный характер. Количество паров определяется теплопритоком по токовводу к жидкому гелию. Верхняя кривая соответствует случаю, когда ВТСП не охлаждаются парами гелия. В этом случае увеличиваются температура верхнего конца ВТСП-лент и теплоприток к жидкому гелию.

Результаты расчета профиля температур по длине всего токоввода показаны на рис.3. Плато в средней части кривой соответствует переходу от ВТСП к резистивной части, выполненному из меди. Температура верхнего конца токоввода поддерживается 300 К с помощью нагревателя, установленного на этом конце.

Основные результаты расчета токоввода приведены в таблице, где I — рабочий ток; T_v , T_n — температура верхних концов токоввода и ВТСП-лент; Q_v — мощность нагревателя верхнего конца токоввода; G_{20} , $G_{4,5}$ — расход гелия через резистивную и ВТСП-части токоввода; $Q_{4,5}$, $Q_{\text{втсп}}$ — теплоприток к жидкому гелию то токовводу, только по ВТСП-лентам.

Анализируя представленные в таблице результаты, следует отметить, что величина теплопритока по токовводу к жидкому гелию при токе 600 А составляет 0,03 Вт при охлаждении ВТСП-лент парами гелия, количество которых составляет 0,001 г/с. Это соответствует удельному теплопритоку 0,05 Вт/кА, что в 20 раз ниже теоретического предела традиционных токовводов из меди. Без охлаждения ВТСП парами гелия теплоприток по токовводу, увеличивается до 0,1 Вт, из которых 20% обусловлено нержавеющей трубой, на которой закреплены ВТСП. При нулевом токе температура верхнего конца ВТСП части падает на 10 К и теплоприток по токовводу уменьшается. В этом случае нагреватель должен выделять 45 Вт на верхнем конце токоввода для поддержания температуры верхнего конца 300 К.

Таблица 1: Основные характеристики 600-А токоввода на основе ВТСП

I	T_v	Q_v	T_n	G_{20}	$Q_{4,5}$	$Q_{\text{втсп}}$	$G_{4,5}$
А	К	Вт	К	г/с	Вт	Вт	г/с
600	300	-	43	0,03	0,03	0,02	0,0011
0	300	45	32	0,03	0,02	0,01	0,0006
600	300	-	45	0,03	0,10	0,08	-
0	300	45	34	0,03	0,08	0,05	-

Проведен расчет процесса перехода ВТСП-части токоввода при токе 600 А в нормальное состояние вследствие прекращения подачи гелия, охлаждающего резистивную часть. На рис.4 показан рост температуры наиболее нагретых точек нижней и верхней частей токоввода, а также рост падения напряжения на ВТСП и резистивной части во времени. Верхний конец ВТСП-лент нагревается до температуры перехода в нормальное состояние через 120 с после отключения потока гелия, и через 125 с потенциала на ВТСП-части достигает 10 мВ, что классифицируется как ее переход в нормальное состояние. На рис.3 показан профиль температур на токовводе через 170 с после отключения потока гелия, на котором видны наиболее нагретые точки ВТСП и резистивной частей токоввода, температура которых следует рассматривать как максимально допустимую. Результаты расчета

показывают, что промежуток времени от начала перехода ВТСП в нормальное состояние до достижения максимально допустимой температуры при токе 600 А составляет 50 с и является достаточным для регистрации перехода и вывода тока.

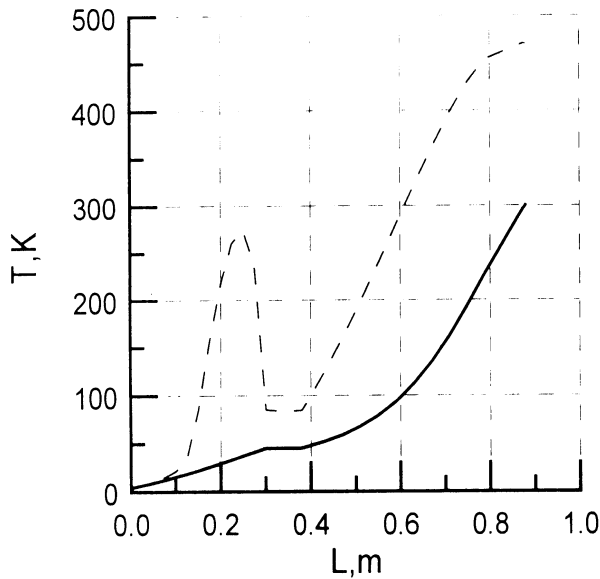


Рис. 3: Температурный профиль токоввода при токе 600 А. Сплошная линия — при рабочих условиях, штриховая — через 170 с после перехода ВТСП в нормальное состояние.

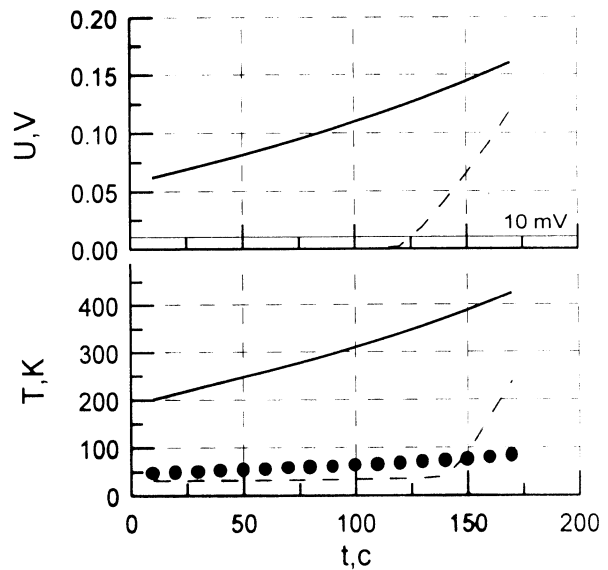


Рис. 4: Рост температуры наиболее нагретых точек и потенциала ВТСП (штриховая линия) и резистивной (сплошная линия) частей токоввода. ● — верхний конец ВТСП.

Закключение

Проведенные исследования и расчеты показали, что токоввод, разработанный на основе ВТСП-ленты $Bi - 2223/Ag+10\%Au$, отвечает всем заданным исходным параметрам. При рабочих условиях он должен иметь критический ток 900 А, что обеспечивает запас по току в 1,5 раза. Теплоприток по токовводу к жидкому гелию составляет 0,03 Вт или 0,04 Вт/кА, что в 20 раз меньше, чем для традиционных медных токовводов.

Список литературы

- [1] Ballarino A. et al. Design of 12,5 kA Current Leads for the LHC Using High Temperature Superconductor Material. Proc. of 16th ICEC/ICMC, pp.1143-1146, Japan, 1996.
- [2] Bock J. et al. Large Shaped Parts of Melt Cast BSCCO for Applications in Electrical Engineering. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 1993, 3.
- [3] Ando T. et al. Design and Testing of 10 kA Current Leads Using High Temperature Siperconductors for Fusion Magnets (to be published).
- [4] Fujishiro H. et al. Thermal and Electrical Properties of $Ag - Au$ and $Ag - Cu$ Alloy Tapes for Metal Stabilizers of Oxide Superconductors. Cryogenics, 1993, v.33, N11, p.1086.
- [5] Gavrilin A.V., Keilin V.E. et al. Optimized HTS Current Leads. Proc. of ASC-98, USA, 1998.
- [6] Шиков А.К. и др. Характеристики провода $2223/(Ag + Au)$ для 600-А токовводов. 16-е Совещание по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1998.
- [7] Sasaoka T. et al. Characteristics of $Ag - Au$ Alloy Sheathed $BiPbSrCaCuO$ Superconducting Tapes for Current Leads. Appl. Phys. Lett. 64 (10), 7 March, 1994.