

УДК 537.312.62

## Технические сверхпроводники

ГУСАРОВ М. С., КУТНИЙ В. Е., НИКУЛИН А. Д., ЧЕРНОПЛЕКОВ Н. А.

Большое внимание, проявляемое в настоящее время к сверхпроводимости, объясняется не только научным, но и практическим интересом к этому явлению, особенно там, где технические возможности и экономические показатели при использовании традиционных технических путей достигли предельных значений.

Именно поэтому современные проекты крупнейших ускорителей, термоядерных установок, мощных накопителей энергии и других электро-энергетических систем предусматривают широкое применение сверхпроводников.

Уникальное физическое явление — сверхпроводимость — долгое время не находило практического применения. Разработка теории сверхпроводимости, достижения в создании технических сверхпроводящих материалов и техники получения низких температур начали давать ощутимые результаты в экспериментальных исследованиях и в решении технических задач.

Теперь уже общепризнано, что затраты на сооружение крупной сверхпроводящей магнитной системы (СМС) с напряженностью поля несколько тесла сопоставимы с затратами на сооружение аналогичной водоохлаждаемой системы с медной обмоткой или ниже их, а эксплуатационные расходы (затраты на электропитание сверхпроводящей обмотки и на производство жидкого гелия для ее охлаждения) в сотни раз меньше.

Техническое использование сверхпроводимости не только снижает стоимость крупных магнитных систем, но и позволяет создавать системы, вообще неосуществимые без использования сверхпроводимости, например соленоиды так называемого «замороженного поля» (со сверхпроводящим ключом), сверхпроводящие индуктивные накопители энергии с неограниченным сроком ее хранения и другие системы.

Успехи в создании СМС различного назначения стали возможными в первую очередь благодаря тому, что создатели систем имеют в своем распоряжении высококачественные технические сверхпроводящие материалы.

Практическая ценность сверхпроводящих материалов определяется главным образом их способностью сохранять состояние сверхпроводимости при прохождении больших токов в сильных магнитных полях. Поэтому техническое применение при создании сверхпрово-

дующих магнитных систем нашли сверхпроводники второго рода.

В 1973 г. сообщалось [1] о выпускаемых отечественной промышленностью технических сверхпроводящих материалах. За прошедшее с тех пор время конструкции и качество технических сверхпроводящих материалов были значительно улучшены. В материалах на основе деформируемого ниобий-титанового сплава уменьшены диаметры токонесущих жил (в некоторых материалах — до 10 мкм), увеличена критическая плотность тока, ассортимент материалов стал больше отражать потребности создаваемых СМС. Кроме того, созданы многожильные и ленточные технические сверхпроводящие материалы на основе интерметаллических соединений  $Nb_3Sn$  и  $V_3Ga$  с критическими параметрами, близкими к предельным для этих материалов.

Испытания разнообразных СМС, созданных при использовании новых технических сверхпроводящих материалов, подтвердили их высокие эксплуатационные характеристики.

Ниже приведены технические данные некоторых сверхпроводящих обмоточных проводов, выпускаемых в нашей стране.

**Провода обмоточные сверхпроводящие композиционные круглые на основе ниобий-титанового сплава НТ-50 (табл. 1) выпускаются как**

**Провода обмоточные сверхпроводящие Таблица 1 композиционные круглые на основе ниобий-титанового сплава НТ-50**

Коэффициент заполнения	Число сверхпроводящих жил в проводнике	Диаметр провода без изоляции, мм													
		0,33	0,38	0,5	0,7	0,85	1,0	1,2	1,5	1,75	2	2,9			
		Диаметр провода с изоляцией, мм													
		0,39	0,43	0,58	0,79	0,95	1,11	1,32	1,62						
Диаметр сверхпроводящей жилы, мкм															
—	1	280	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	1	—	270	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	1	—	220	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,30	36	—	—	45	63	76	90	—	—	—	—	—	—	—	—
	132	—	—	24	34	41	48	58	72	84	96	—	—	—	—
0,40	48	—	—	45	63	76	90	—	—	—	—	—	—	—	—
	168	—	—	24	34	41	48	58	72	84	96	—	—	—	—
0,42	1045	—	—	10	14	17	20	24	30	35	40	—	—	—	—
0,50	60	—	—	45	63	76	90	—	—	—	—	—	—	—	—
	210	—	—	24	34	41	48	58	72	84	96	—	—	—	—
0,50	1010	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	58



без изоляции, так и в эмалированной изоляции, выдерживающей пробивное напряжение более 2000 В. Характеризуются высоким коэффициентом заполнения сверхпроводником: содержание стабилизирующей меди в отношении к сверхпроводнику в пределах от 1 : 1 до 2 : 1; используются, как правило, для создания малых СМС с запасенной энергией до 200—300 кДж или как исходные изделия для создания транспонированных проводов; критическая плотность тока в поле 5 Т в среднем  $1,5 \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup>; многожильные провода скручены, шаг скрутки составляет 25 мм; отношение сопротивлений стабилизирующей меди при комнатной температуре и температуре жидкого гелия, как правило, больше 100; в сверхпроводниках со стабилизирующей медью, полученной гальваническим способом, это отношение более 200.

**Провода обмоточные сверхпроводящие композиционные прямоугольного сечения на основе сплава НТ-50.** Характеризуются более высоким содержанием стабилизирующей меди: отношение медь — сверхпроводник в проводе от 2,1 : 1 до 10 : 1 и более; многожильные провода скручены, шаг скрутки зависит от сечения провода; используются для создания СМС с запасенной энергией более 300 кДж и как исходные модули для создания токонесущих элементов на большие токи в зависимости от требований СМС. В табл. 2 приведены данные для одного из типовых сверхпроводящих композиционных проводов прямоугольного сечения.

Описанные выше технические сверхпроводящие материалы предназначены для создания СМС, в которых охлаждение осуществляется погружением системы в ванну с жидким гелием — так называемых погружных СМС.

Провода обмоточные сверхпроводящие композиционные прямоугольного сечения из сплава НТ-50 Таблица 2

Размеры сечения провода, мм		Коэффициент заполнения	Число сверхпроводящих жил в проводе	Диаметр сверхпроводящей жилы, мкм	Критический ток в поле 5Т, А
Ширина	Толщина				
3,5	2,0	0,25	300	80	2 300
		0,35	390	80	2 500
		0,35	3 630	30	2 500
		0,42	1 045	60	2 800
50	3	0,1	7 460	60	20 кА

Провода обмоточные сверхпроводящие композиционные канального типа Таблица 3

Размеры сечения, мм		Сечение трубок, мм		Отношение медь — сверхпроводник	Критический ток в поле 5 Т, А
Ширина	Толщина	Диаметр	Толщина стенки		
10,2	4,4	3	0,5	9 : 1	4 500
13,2	5,4	4	0,5	7 : 1	7 000

**Провода обмоточные сверхпроводящие композиционные канального типа.** Предназначены для циркуляционных СМС с принудительным охлаждением гелием. В них возможно обеспечение более высокой электрической и механической прочности, упрощение конструкции криостата, уменьшение потребного количества гелия. Это особенно существенно в крупных СМС, для которых были специально созданы сверхпроводящие обмоточные провода с каналами для циркуляции гелия. В табл. 3 приведены технические данные двух типов обмоточных сверхпроводящих двухканальных композиционных проводов на основе сплава НТ-50.

**Сверхпроводящие провода для систем с переменным магнитным полем.** Занимают особое место среди технических сверхпроводников СМС. Диаметр сверхпроводящих жил — не более 10 мкм; стабилизирующая матрица комбинированная из чистой меди и плохо проводящего металла для минимизации потерь на вихревые токи; например, в 126 жильном сверхпроводящем проводе диаметром 0,5 мм с коэффициентом заполнения 0,4 в качестве стабилизирующей матрицы используются медь и медно-никелевый сплав.

**Многожильные сверхпроводящие обмоточные провода на основе интерметаллических соединений.** До недавнего времени основным техническим сверхпроводящим материалом на основе интерметаллического соединения Nb<sub>3</sub>Sn была стабилизированная медью лента с токонесущей способностью около 50 А на 1 мм ширины в поле 5 Т. Такой сверхпроводник малоприменен для создания средних, а тем более крупных СМС, главным образом, из-за диамагнетизма ленты. Основным препятствием для создания многожильных сверхпроводящих материалов на основе интерметаллических соединений была их высокая хрупкость, чрезвычайно осложнявшая методы получения обмоточных проводов. Однако более высокие критические температу-



Провода обмоточные сверхпроводящие многожильные на основе интерметаллических соединений Таблица 4

Вид провода	Диаметр (или сечение) провода, мм	Число жил	Стабилизация медью	Критический ток (А) в поле, Т			
				7	8,5	12	15
Круглый	∅ 1	7 225	Нет	550	500	240	100
Плоский	27 × 2	151 725	Есть	12кА	—	6кА	—

ры и поля материалов на основе интерметаллических соединений, позволяющие расширить диапазон рабочих полей СМС и создать, что не менее важно, более надежные СМС, заставили исследователей разработать методы производства этих материалов. В настоящее время начат их выпуск, созданы первые СМС, продемонстрировавшие существенные преимущества интерметаллических материалов перед материалами на основе деформируемых сплавов при создании СМС с высокой напряженностью поля. Интерметаллические материалы выпускаются

как термообработанные, так и нетермообработанные, стабилизированные и не стабилизированные медью. В табл. 4 представлены характеристики двух видов сверхпроводящих проводов на основе интерметаллического соединения  $Nb_3Sn$ .

В данном сообщении приведены характеристики некоторых сверхпроводящих обмоточных проводников из широкой номенклатуры, выпускаемых промышленностью, с указанием типовых величин критических токов. Существующие способы получения таких проводов позволяют достигать и более высоких значений критических токов, а также создавать модифицированные конструкции сверхпроводящих токонесущих элементов в соответствии с требованиями СМС.

Поступила в Редакцию 8/VI 1977 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рекламный проспект «Сверхпроводящие материалы». М., изд. ОВЦ ГКАЭ СССР, 1973.
2. Никулин А. Д. и др. Сверхпроводящие материалы для технического использования. — В кн.: Труды конф. «Техническая сверхпроводимость». М., Атомиздат, 1977.