

УДК 621.3.15

## СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ КАБЕЛИ И ПРОВОДА

Лукашевич И.А.

Научный руководитель – КЛИМЕНТИОНОК А.К.

Сверхпроводимость – свойство некоторых материалов обладать строго нулевым электрическим сопротивлением при достижении ими температуры ниже определённого значения (критическая температура). Известны несколько сотен соединений, чистых элементов, сплавов и керамик, переходящих в сверхпроводящее состояние.

Сверхпроводимость – квантовое явление, оно характеризуется также эффектом Мейнсера, заключающемся в полном вытеснении магнитного поля из объёма сверхпроводника. Существование этого эффекта показывает, что сверхпроводимость не может быть описана просто как идеальная проводимость в классическом понимании.

Открытие в 1986–1993 годах, ряда высокотемпературных сверхпроводников далеко отодвинуло температурную границу сверхпроводимости и позволило практически использовать сверхпроводящие материалы не только при температуре жидкого гелия (4,2 К), но и при температуре кипения жидкого азота (77 К), гораздо более дешевой криогенной жидкости.

В настоящее время известны различные конструкции сверхпроводящих проводов. Низкотемпературные сверхпроводники выпускаются с очень большим разнообразием конфигураций, основой которых является единичный провод. Это, как правило, круглая проволока диаметром около 1 мм. Из нее делается, в основном, путем скрутки между собой этих единичных проволок большое многообразие конфигураций, которое называют сверхпроводящий провод или кабель. Известны сверхпроводящие провода с каналами для прокачки хладагента. Такие конструкции обеспечивают увеличение эффективного периметра теплопередачи провода к хладагенту, улучшение условий теплообмена, а также уменьшение заливного объема хладагента. Токопроводящие провода с каналами для прокачки хладагента могут работать в рефрижераторном режиме и замкнутом цикле.

Известна конструкция с несколькими каналами для циркуляции хладагента. Проводники выполнены в виде коаксиальных медных трубок, пространство между которыми заполнено стабилизированными медью сверхпроводящими поволоками из сплавов ниобия и титана, или ниобия, титана и тантала. Недостатком этих конструкций является большой расход хладагента на единицу плотности транспортируемого тока.

Указанный недостаток устранен в известном проводе типа «кабель-в-оболочке». Из него изготавливают магниты для токамаков (Токамак (тороидальная камера с магнитными катушками) – тороидальная установка для магнитного удержания плазмы с целью достижения условий, необходимых для протекания управляемого термоядерного синтеза):

- китайского (EAST);
- корейского (KSTAR);
- индийского (SST-1);
- международного термоядерного реактора по проекту ITER.

Этот провод содержит сверхпроводящий сердечник в виде нескольких (обычно шести) стренг. Каждая из стренг представляет собой скрутку из элементарных, стабилизированных медью сверхпроводящих проволок. Стренга может быть уплотнена, а также обвита тонкой узкой лентой предпочтительно с шагом не меньше ширины ленты, предохраняющей стренгу от разрыхления. Стренги скручены вокруг трубы или полого гибкого элемента, представляющего собой спираль, свитую из металлической ленты (нержавеющей стали). Сердечник может быть уплотнен и обмотан тонкой лентой. Во всех сверхпроводящих сердечниках соблюден принцип полной транспозиции, повторяемости рисунка скрутки с определенным периодом, что необходимо для снижения потерь и повышения стабильности магнитов. Этот сверхпроводящий сердечник размещен в

несверхпроводящей трубе из нержавеющей стали или титана, являющейся оболочкой провода. Хотя эта конструкция провода является работоспособной и обеспечивает требуемые электрофизические характеристики, сверхпроводящие свойства и параметры транспортировки тока для создания магнитного поля требуемой конфигурации и напряженности, однако у нее имеется существенный недостаток. Этот недостаток заключается в том, что при изготовлении длиномерного провода этой конструкции требуются специально разработанные режимы поперечной сварки оболочки для соединения между собой труб, каждая из которых длиной шесть метров. Кроме того, требуются специальные трудоемкие, ответственные и дорогие методы контроля каждого сварочного шва в отдельности и всей сваренной оболочки в целом, определяющие возможные места утечки гелия. Существенным недостатком этой конструкции является также то, что при ее изготовлении операция установки сверхпроводящего сердечника в оболочке вызывает необходимость использования производственного участка большой протяженности, необходимой для размещения на нем всей длиной исходной трубы.

Эффект сверхпроводимости известен уже почти 100 лет. Однако удивительная способность сверхпроводников проводить ток без сопротивления встречается с одним серьезным ограничением – она проявляется только при экстремально низких температурах, близких к абсолютному нулю. Если использование подобных силовых кабелей станет массовым, города смогут экономить на высоковольтных линиях – освободится занимаемое ими место, упростится силовая сеть, станут ненужными гигантские трансформаторные станции.

#### Литература

1 Калимов, А. Г. Физические основы сверхпроводимости / А. Г. Калимов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 259 с.

2 Нейман, А. А. Оценка эффективности применения устройства сверхпроводимости в энергосистемах / А. А. Нейман. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 498 с.