

ниобия с титаном или соединения типа A-15: Nb₃Sn, V₃Gd), заключённых в матрице из несверхпроводящего металла. Обмотку С. м. помещают в криостат, поддерживающий темп-ру ниже темп-ры перехода проводов обмотки в сверхпроводящее состояние. Ведутся работы над созданием С. м. с использованием высокотемпературных сверхпроводников, открытых в 1986 (см. Оксидные высокотемпературные сверхпроводники).

Параметры С. м. принципиально ограничены свойствами сверхпроводящего провода: значением его критич. темп-ры, критическим магнитным полем и токонесущей способностью (критическим током). Ниобий-титановые С. м. позволяют получать при 4,2 К магн. индукцию $B \lesssim 10$ Тл, а ниобий-оловянные С. м. — $B \lesssim 20$ Тл. Первонач. попытки применить в С. м. сверхпроводники 1-го рода [X. Камерлинг-Оннес (H. Kamerlingh-Onnes), 1911] оказались неудачными из-за низких значений критич. магн. полей этих материалов. Первые С. м. из совр. материалов (из т. н. жёстких сверхпроводников 2-го рода) были созданы в 1961.

Достоинством С. м. по сравнению с обычными резистивными электромагнитами является малое потребление энергии, в осн. на компенсацию теплоты, поступающей через теплоизоляцию криостата, по несверхпроводящим тоководам, а также на тепловыделение в омических контактах между отрезками сверхпроводящих проводов. В С. м. с пост. индукцией расход энергии по крайней мере в тысячу раз меньше, чем омические потери в резистивных обмотках обычных электромагнитов такого же назначения. Капитальные затраты на создание крупных С. м. сопоставимы с затратами на создание резистивных электромагнитов — относительно высокая стоимость сверхпроводящей обмотки компенсируется отсутствием необходимости в мощных источниках питания и громоздких системах её водяного охлаждения. Макс. размеры С. м. ограничиваются не энергетич. соображениями, а прочностью материалов, из к-рых изготавливают бандаж С. м. Существуют проекты С. м. с характерными размерами до неск. сотен метров.

Рабочая темп-ра совр. С. м. лежит в диапазоне 1,8—10 К, хладагентом служит жидкий или газообразный гелий. Большинство С. м. работает в криостатах, заполненных жидким гелием, кипящим при атмосферном или пониженном давлении. Иногда применяют косвенное охлаждение обмотки, при к-ром теплопроводность вещества (компаунда), пропитывающего обмотку, позволяет отвести от неё теплоту к конструктивным элементам, омываемым жидким гелием. В С. м. с заметным тепловыделением, обусловленным либо гистерезисными и кооперативными потерями в сверхпроводящем проводе в переменном магн. поле, либо радиац. потерями, применяют проточное охлаждение, создавая принудит. движение хладагента через обмотку. В особо крупных С. м. и в С. м. сложной конфигурации нередко используют циркуляц. охлаждение, направляя поток хладагента по герметичному каналу, совмещённому с обмоточным проводом.

Специфич. недостатком С. м. является возможность его выхода из рабочего режима вследствие потери обмоткой сверхпроводимости, причём это может произойти при значениях тока, существенно меньших токонесущей способности провода (даже при значениях индукции и темп-ры, соответствующих расчётным рабочим параметрам С. м.). Это явление наз. деградацией сверхпроводящего провода в обмотке С. м. Переход обмотки С. м. в нормальное (несверхпроводящее) состояние сопровождается диссипацией запасённой эл.-магн. энергии, разогревом обмотки и возникновением внутри неё значит. электрич. напряжений, что может повести к повреждению С. м. Физ. природа деградации связана с тем, что в напряжённой поперечно-торсионными силами обмотке С. м. происходят микрособытия (возмущения), сопровождающиеся тепловыделением

(движение витков, растрескивание компаунда, проскальзывание обмотки относительно каркаса), к-рые могут привести к превышению критич. темп-ры в захваченном этим возмущением объёме провода. Величина и вероятность таких возмущений пока не поддаются расчёту, но их естественно связать с уровнем достигаемых в обмотке механич. напряжений, что позволяет объяснить тот эмпирич. факт, что деградации в большей степени подвержены крупные С. м. и С. м. некруглой формы. Механич. возмущения, амплитуда к-рых недостаточна для перевода сверхпроводника в норм. состояние непосредственно, могут спровоцировать т. н. термомангн. неустойчивость и привести к деградации. В процессе развития неустойчивости выделяется дополнит. энергия, запасённая в токах, акрирующих сверхпроводящий провод, когда он находится во внеш. магн. поле. Эта энергия тем больше, чем больше диаметр сверхпроводящих волокон и их критич. ток, поэтому обмотки из проводов с толстыми волокнами и из проводов с высокой токонесущей способностью более подвержены деградации. В С. м. с медленно изменяющимся магн. полем, таким, что возникающее электрич. поле нигде в проводе не превышает «электрич. поля срыва» (0,1—10 мкВ/см), термомангн. неустойчивость не развивается самопроизвольно и для перевода провода в норм. состояние необходимо внеш. возмущение конечной величины. В обмотках с быстро меняющимся полем возможно спонтанное развитие термомангн. неустойчивостей.

Увеличение или уменьшение норм. зоны, возникшей в обмотке под влиянием возмущения, зависит от баланса выделения в этой зоне тепла и теплообмена в обмотке. Несверхпроводящая зона может исчезнуть, и при этом режим С. м. не нарушится, а может и распространиться по обмотке. Защита С. м. в этом случае заключается в уменьшении тока в обмотке со скоростью, позволяющей не допустить чрезмерного перегрева обмоточного провода и слишком быстрого испарения жидкого гелия, но и не столь большой, чтобы растущие в обмотке электрич. напряжения могли повредить изоляцию провода.

Выбор способа защиты обмотки при переходе её в норм. состояние зависит от скорости распространения в ней норм. зоны. В С. м., в к-рых эта скорость мала, применяют активную защиту: отключив источник питания, представляют току возможность затухнуть на сопротивлении, расположенном вне криостата. При невозможности применения активной защиты стараются искусственно увеличить скорость распространения норм. зоны, чтобы запасённая энергия выделилась в обмотке возможно равномернее и не привела к локальным перегревам.

Меры борьбы с деградацией заключаются в уменьшении частоты и амплитуды механич. возмущений (для этого закрепляют провод по всей длине обмотки). Саму обмотку делают возможно более жёсткой и ограничивают возможности развития термомангн. неустойчивости, используя обмоточные провода с весьма тонкими сверхпроводящими волокнами (0,1—30 мкм), скрученными вокруг продольной оси. Повышают также устойчивость к возмущениям и обеспечивают условия для исчезновения в проводе норм. зоны, если она возникла (для этого в сечении провода увеличивают долю норм. металла с высокой электропроводностью, повышают эфф. теплоёмкость провода и улучшают его теплообмен с жидким гелием). При обеспечении отвода к хладагенту практически всего тепла, генерируемого при рабочем токе в проводе, нагретом до критич. темп-ры, возникшая норм. зона неизбежно исчезает. Такие стационарно стабилизиров. обмотки наиб. надёжны, но этот метод используют лишь в особо крупных С. м., поскольку требуются кол-во норм. металла и значит. сечение необходимых для хладагента каналов резко снижают ср. плотность тока в обмотке (до $3-10 \cdot 10^7$ А/м²), делая её весьма громоздкой. Не-