

## Сверхпроводящие материалы из Bi-ВТСП для использования в сильных магнитных полях при гелиевых температурах

В.Ф. Шамрай, Э.М. Лазарев, А.Б. Михайлова

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН, 119991 Москва, Россия*

В.И. Нижанковский

*Международная лаборатория сильных магнитных полей и низких температур, 53-421 Вроцлав, ПР*

И.И. Акимов

*ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов*

*г.Москва, Россия*

А.О. Комаров

*Московский институт стали и сплавов, г.Москва, Россия*

Bi-ВТСП принадлежат к анизотропным квазидвумерным системам, в которых сильны термические флуктуации. Как следствие, у них отчетливо выражены характерные для ВТСП аномалии физических свойств, в том числе резкая температурная зависимость критического тока  $J_c(T)$  и наличие линии необратимости.

Исследование зависимости  $J_c(T)$  различных материалов из Bi-2212 (толстые покрытия, монокристаллы) и Bi-2223 (многожильные композиты, текстурированные поликристаллы) выполнены при  $4,2 < T < 77$  К в магнитных полях до 18 Т. Показано, что Bi-2223-материалы обладают заметно более плавной зависимостью  $J_c(T)$  и, соответственно, величина  $J_c(77)$  у них выше, чем у Bi-2212. В тоже время практически значимые критические токи в магнитных полях свыше 10 Т и в случае Bi-2223 могут быть получены только при гелиевых температурах, когда резко ослаблены термические флуктуации. В связи с этим возможности соединения Bi-2212 рассматриваются как сравнимые с Bi-2223. Оптимизация структурного состояния материала за счет повышения совершенства базисной текстуры и введения дисперсных включений позволяет несколько повысить плотность критического тока в относительно слабых магнитных полях ( $H < 1$  Т), однако это не оказывает существенного влияния на общий характер зависимости  $J_c(T, H)$ .

Зависимость критического тока от напряженности магнитного поля  $H$  при температуре жидкого гелия, как Bi-2223 многожильных композитов, так и Bi-2212 ионно-плазменных и шликерных покрытий характеризуется наличием области слабой зависимости  $J_c(H)$  при  $H > 14$  Т. Это позволяет рассчитывать на возможность использования указанных материалов в магнитных полях свыше 20 Т. При измерениях транспортного тока получены значения плотности критического тока в магнитных полях 14-18 Т для Bi-2223 многожильного композита  $j_c \sim 1 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup> и  $j_c \sim 0,5 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup> для толстых покрытий на основе Bi-2212.

Повышение критического тока в сильных магнитных полях исследованных композитов может быть достигнуто за счет оптимизации их технологии. Ее ключевым моментом является программируемый отжиг, при котором образуются сверхпро-

водящие слои в композите. Во время этого отжига порошки готовых соединений или смеси оксидов, из которых ведется синтез сверхпроводящей фазы (прекурсоры), переводятся в твердожидкофазное состояние. Формирование сверхпроводящих слоев во время отжига протекает, по механизму зарождения и роста. Кинетика этого процесса и структурное состояние растущих слоев определяются химическим составом расплава, находящихся в равновесии с ним соединений и совместимостью их кристаллических структур.

Изменение режимов отжига и выбор прекурсоров предоставляют возможности варьировать химический состав и дефектность структуры сверхпроводящей фазы. В этом отношении Bi-2212 предоставляет большие возможности, поскольку ему в отличие от Bi-2223 соответствует на диаграмме состояния CuO-CaO-SrO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> протяженная область твердых растворов. Процесс формирования сверхпроводящих слоев в композите зависит также от состояния структуры и субструктуры прекурсоров. Показано, что в случае Bi-2212 он заметно облегчается, если в качестве прекурсора использовать аморфизированные стержни этого соединения или механоактивированные порошки.

Для оценки совершенства структуры сверхпроводящих слоев в композите помимо традиционных методов использован анализ зависимости электросопротивления от величины измерительного тока и приложенного магнитного поля  $R(T, I, H)$  в области сверхпроводящего перехода. В композитах с хорошо сформированными сверхпроводящими слоями зависимость  $R(T, I, H)$  согласуется с КТ теорией, в то время как слабые межзеренные контакты, макроненодности, разброс ориентировок и другие несовершенства проявляются в значительно более резком размытии сверхпроводящего перехода. При исследовании транспорта в сверхпроводящем композите необходима также корректная оценка проводящих характеристик подложки. В сильных магнитных полях магнетосопротивление, как оказалось, вносит заметный вклад в сопротивление серебряной подложки, и может привести к перераспределению токов в композите Bi-ВТСП – Ag.