

ИЗМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ ВТСП ЛЕНТЫ Bi-2223 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ

Я.А. Дорофеев^{1,2}, В.Н. Колокольцев¹, И.В. Боровицкая¹, Л.И. Иванов¹,
Г.Г. Бондаренко³, Б.П. Михайлов¹, А.И. Гайдар³

¹ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; ² Московский государственный институт электроники и математики (технический университет);
³ ФГБНУ «Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий»
E-mail: bondarenko_gg@rambler.ru

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) имеют несомненную перспективу для использования в различных отраслях современной техники – электронике, вычислительной технике, медицине, энергетике, транспорте. Одной из областей применения ВТСП является космическая техника – бортовая измерительная аппаратура, работа которой в условиях космоса возможна без специальных устройств охлаждения. При переходе на ВТСП удастся значительно снизить ее геометрические размеры и массу. Будущее ВТСП материалов в космической технике во многом будет определяться стабильностью их параметров в условиях открытого космоса.

В настоящей работе исследовалась стабильность критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние (T_c) ВТСП ленты $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$ (Bi-2223) при воздействии высокоскоростных плазменных импульсных потоков, генерируемых на установке типа Плазменный фокус ПФ-4 (ФИАН).

Образцы с размерами 0,3x4,0x35,0 мм вырезались из многожильной герметичной ленты Bi-2223 производства EAS-E HTS, Германия.

Схема экспериментальной камеры приведена на рис. 1. Образец 1 крепился к титановой фольге 4 толщиной 0,26 мм при помощи эпоксидной смолы 3. Расстояние между титановой фольгой и анодом 7 установки $X = 60$ мм. При взаимодействии высокоскоростной плазменной струи 5, направленной от катода 6 установки к образцу, с металлом в нем генерируется ударная волна (УВ). Через слой эпоксидной смолы УВ проходит в ВТСП ленту. Такая система позволяет равномерно передать давление, создаваемое УВ, на плоскость образца и защитить его от температурного воздействия плазмы.

Образец подвергался воздействию 25 импульсов длительностью ~ 50 нс. Скорость плазменной струи составляла $(1-4) \cdot 10^7$ см/с [1], плотность потока энергии плазменного импульса $\sim 10^8$ Вт/см², рабочий газ – аргон. Более подробно параметры установки описаны в работе [1].

Измерение сопротивления образцов (R) проводилось по стандартной четырехзондовой методике. Для измерения зависимости $R(T)$ в интервале температур 78 - 300 К использовался газопрокачной криостат, закрепленный между полюсами электромагнита.

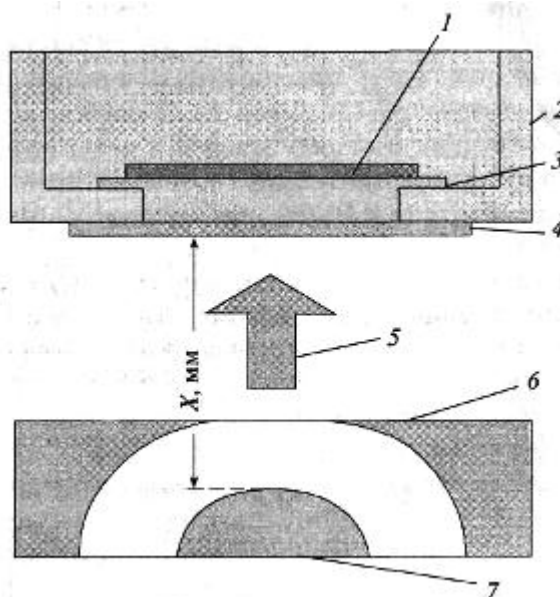


Рис. 1. Схема экспериментальной камеры. 1 – образец ВТСП; 2 – алюминиевая ювета; 3 – эпоксидная смола; 4 – титановая фольга; 5 – струя аргоновой плазмы; 6 – катод; 7 – анод.

Температура образца контролировалась медь-константановой термопарой. Падение напряжения на образце измерялось приборами Ф-116/1 и Ф-136 с записью температурного хода на самописце. Погрешность измерений сопротивления не превышала 10%. Магнитная индукция контролировалась прибором РШ1-10, с погрешностью ~ 5%.

На рис. 2 представлены зависимости $R(T)$ для образца Vi-2223 в интервале температур 80 – 150 К, измеренные при токе 1 А в магнитном поле с индукцией $B = 0,0$ и $B = 0,5$ Тл до и после воздействия УВ. Согласно определению, критическая температура сверхпроводника - это такая температура, ниже которой его электросопротивление равно нулю (на рис. 2 значения T_c помечены стрелками). Видно, что значения T_c уменьшаются при воздействии УВ и при возрастании внешнего магнитного поля. Аналогичное поведение T_c наблюдается на температурных зависимостях $R(T)$ при различных токах.

Совокупность результатов измерений $R(T)$ позволила установить тенденцию снижения T_c при увеличении тока (рис. 3). Наиболее сильная зависимость T_c от тока наблюдается в образце в отсутствие внешнего магнитного поля. При наложении внешнего магнитного поля $B = 0,5$ Тл влияние тока на T_c уменьшается, однако наблюдается общее снижение T_c на 15 – 20 К для исходного и обработанного плазмой образцов. Более слабая зависимость от тока при наложении магнитного поля может быть связана с разогревом образца в результате диссипации энергии за счет срыва флюксоидов с центров пиннига [2].

Снижение критической температуры при воздействии УВ может быть связано с механическими разрушениями в сверхпроводящей фазе образца.

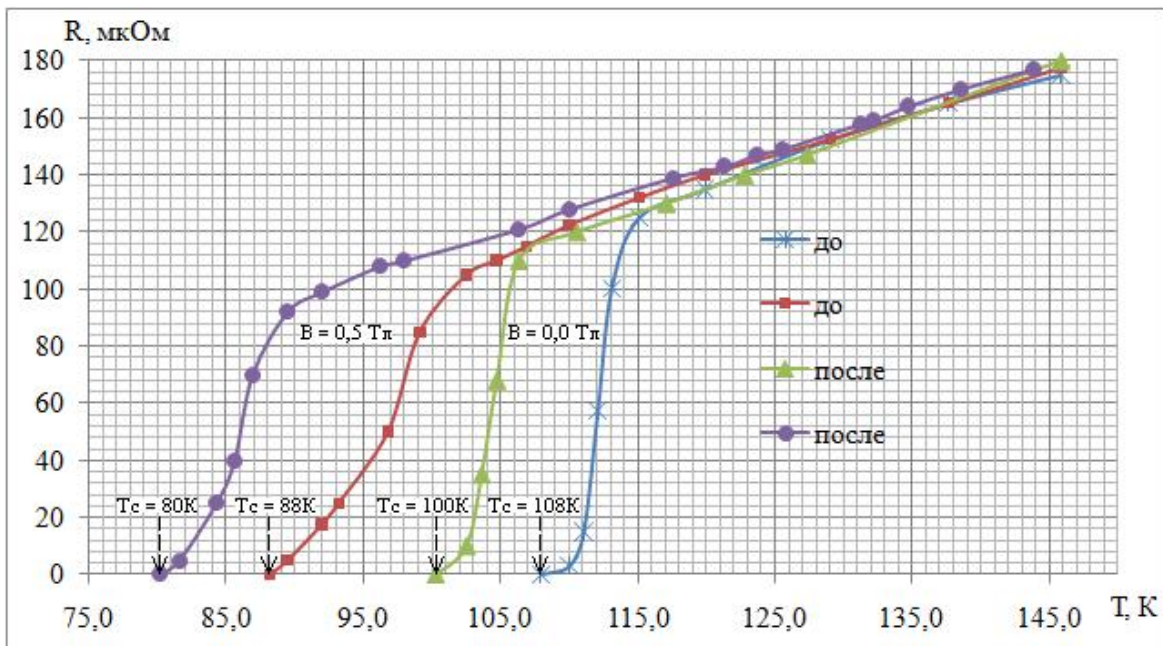


Рис. 2. Зависимости сопротивления образцов от температуры при постоянном токе в цепи $1,0 \text{ A}$ (вектор индукции внешнего магнитного поля \mathbf{B} направлен перпендикулярно плоскости ВТСП ленты).

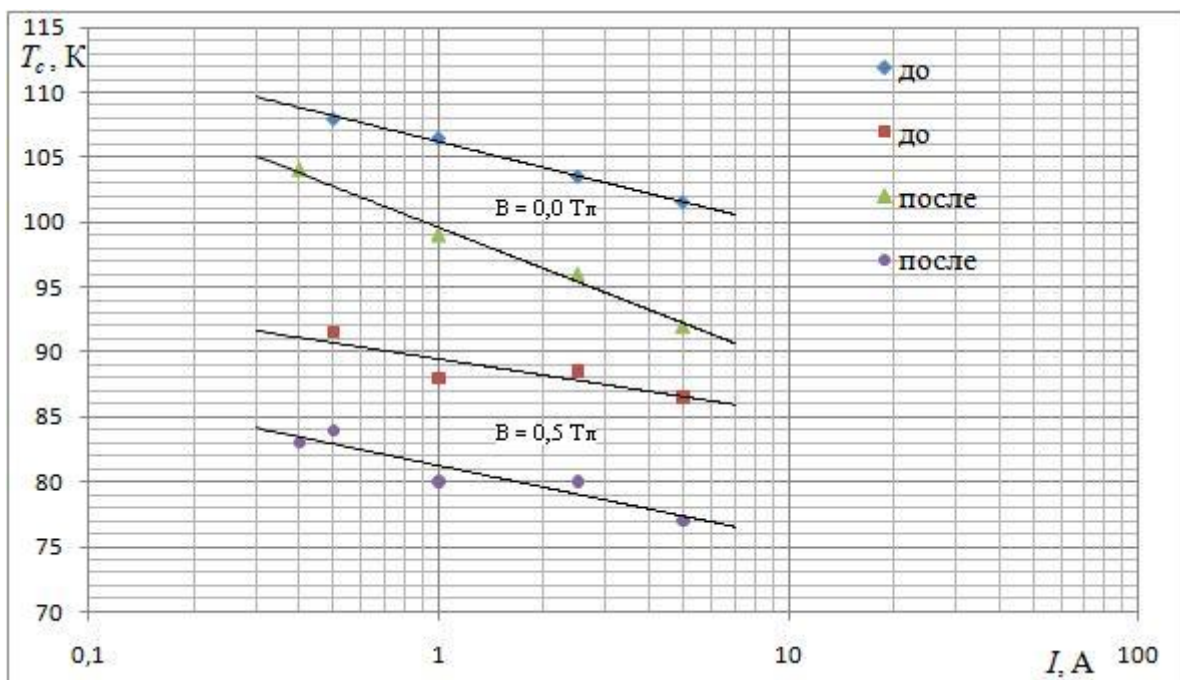


Рис. 3. Зависимости критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние образцов ВТСП от величины протекающего тока (вектор индукции внешнего магнитного поля \mathbf{B} направлен перпендикулярно плоскости ВТСП ленты).

На рис. 4 представлены шлифы поперечного сечения ленты Bi-2223 до и после воздействия УВ, полученные по результатам микроструктурных исследований образцов, проведенных на растровом электронном микроскопе с рентгеновским микроанализатором EVO 40 (ФГБНУ «НИИ ПМТ»).

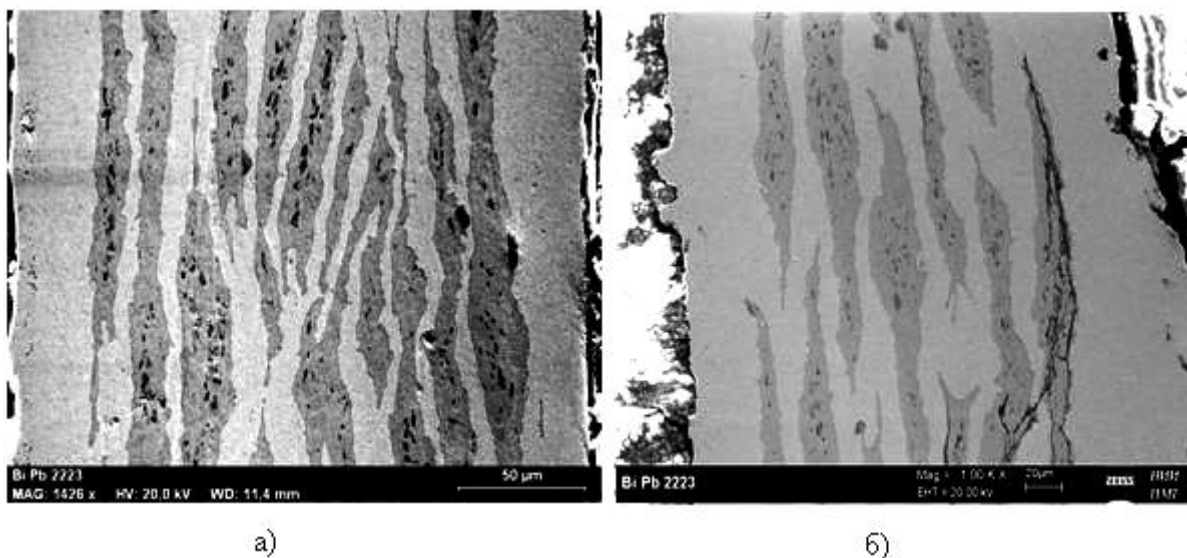


Рис. 4. Поперечное сечение ВТСП ленты Bi-2223: а) контрольного образца; б) обработанного ударными волнами.

Видно, что в исходном состоянии сверхпроводниковые жилы, заключенные в матрицу из серебра не имели каких-либо повреждений (рис. 4а). В то же время обработка образцов плазменными импульсами по указанному режиму приводила к появлению трещины, проходящей вдоль хрупкой фазы ВТСП (рис. 4б).

Учитывая особую чувствительность керамики Bi-2223 к различного рода дефектам, можно полагать, что деградация сверхпроводящих свойств образца при воздействии УВ связана с механическими напряжениями в объеме керамики, приводящими к возникновению микротрещин.

Полученные результаты можно сопоставить с данными работ [3, 4], в которых образцы ВТСП-лент Y-123 и Bi-2223 подвергались ударно-волновому воздействию на этой же установке ПФ-4, но в несколько другом режиме (отличие состояло в числе импульсов, расстоянии до анода и т.д.). В этих исследованиях обнаружено увеличение плотности критического тока образцов, что объясняется, по-видимому, эффектом образования на фронте ударных волн точечных дефектов [5] – центров пиннинга. Можно предположить, что улучшение сверхпроводящих характеристик происходит в том случае, когда нет повреждения (разрушения) сверхпроводящей фазы. Таким образом, режим облучения на установке Плазменный фокус должен быть подобран так, чтобы избежать появления трещин в сверхпроводящей фазе, ведущих к снижению критического тока и T_c .

Выводы

1. При выбранном режиме обработки сверхпроводящей ленты на основе Bi-2223 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$) в отсутствие магнитного поля наблюдается уменьшение T_c на 5 – 10 К.

2. Значения T_c существенно зависят от пропускаемого тока и приложенного внешнего магнитного поля. При токах $\sim 1,0$ А и магнитном поле $\sim 0,5$ Тл

снижение T_c может составлять ≈ 17 К. Воздействие УВ на сверхпроводящие ленты приводит к дополнительному снижению T_c .

3. Причиной уменьшения T_c в образцах при воздействии УВ может являться возникновение механических напряжений в объеме ленты, приводящих к возникновению микротрещин в керамике Bi-2223, обнаруженных методом растровой электронной микроскопии.

1. S.P. Eliseev, V.Ya. Nikulin, A.V. Oginov, A.A. Tikhomirov // Probl. Atom. Sci. and Technol. Ser.: Plasma Phys., 2006 г., V. 12, № 6, P. 47.
2. И.А. Паринов // Микроструктура и свойства высокотемпературных сверхпроводников. Ростов-на-Дону, 2004 г., т. 1, с. 414.
3. Л.Х. Антонова, И.В. Боровицкая, П.В. Горшков, Е.И. Демихов, Л.И. Иванов, О.Н. Крохин, Г.Н. Михайлова, А.П. Менушенков, В.Я. Никулин, А.В. Огинов, А.И. Подливаев, С.В. Покровский, И.А. Руднев, А.В. Троицкий // Воздействие ударных волн на токонесущие свойства ВТСП-ленты YBCO(123). Доклады академии наук (Техническая физика), 2009 г., т. 428, № 4, с. 471 – 473.
4. Б.П. Михайлов, Л.И. Иванов, В.Ф. Шамрай, В.Я. Никулин, Г.Н. Михайлова, В.И. Нижанковский, И.А. Руднев, П.В. Горшков // Влияние импульсной высокоплотной плазмы на сверхпроводящие свойства многожильной Bi-2223 ленты. Перспективные материалы, 2009 г., № 6, с. 57 – 60.
5. З.И. Мезох, В.А. Янушкевич, Л.И. Иванов // Физика и химия обработки материалов, 1971 г., № 4, с. 163.