Физика низких температур, 1996, т. 22, № 9, с. 1022–1027

Пространственное распределение плотности критического тока в сверхпроводящих лентах Bi-2212

А. В. Пан *

Институт металлофизики НАН Украины, Украины, 252142, г. Киев, бул. Вернадского, 36

М. Ионеску, Ш. Х. Доу

Centre for Superconducting and Electronic Materials, University of Wollongong, Wollongong, NSW 2522, Australia

Статья поступила в редакцию 30 января 1996 г.

В лентах из высокотемпературного сверхпроводника Bi-2212, прокатанных в серебряной оболочке, исследовано пространственное распределение плотности критического тока J_c в сверхпроводящей сердцевине. На краях поперечного сечения ленты обнаружены значения J_c в 2,5–3 раза более высокие, чем в центральной области. Экспериментально найденное распределение плотности оксидной сердцевины ленты имеет наименьшее значение в тех же краевых областях. При этом в сверхпроводящем коре вблизи серебряной оболочки по всему ее периметру обнаружена область ~ 10 мкм толщиной, в которой включения вторичных фаз практически отсутствуют. Расчет показывает, что эффект, возникающий вследствие увеличенной почти на порядок J_c в приграничном к оболочке слое, не дает возможности полностью объяснить пространственное распределение J_c. Действительно, на краю ленты $J_{c,\mathrm{layer}} \approx 36\,000$ А/см^2, а в центральных областях слоя — в два раза меньше (~18 000 А/см^2). Высказано предположение, что (с учетом пониженной плотности оксидной сердцевины краевых областей) процесс формирования оптимальной структуры при термообработке в присутствии жидкой фазы может стимулироваться геометрией краевой зоны кора.

У стрічках з високотемпературного надпровідника Bi-2212, прокатаних у срібній оболонці, досліджено просторовий розподіл густини критичного струму J_c у надпровідній серцевині. На краях поперечного перерізу стрічки виявлено значення J_c в 2,5–3 рази більше, ніж у центральній області. Експериментально знайдений розподіл густини оксидної серцевини стрічки має найменше значення у тих же крайових областях. При цьому у надпровідному корі поблизу срібної оболонки по усьому її периметру виявлено область ~ 10 мкм завтовшки, у якій включення вторинних фаз практично відсутні. Розрахунок показує, що ефект, який виникає внаслідок збільшеної майже на порядок J_c у примежовому до оболонці шарі, не дає можливості повністю пояснити просторовий розподіл J_c. Дійсно, на краю стрічки $J_{c,\mathrm{layer}} \approx 36\,000$ А/см^2, а в центральних областях шару — в два рази менше (~ 18 000 А/см^2). Висловлено припущення, що (з урахуванням зменшеної густини оксидної серцевини крайових областей) процес формування оптимальної структури при термообробці у присутності рідкої фази може стимулюватися геометрією крайової зони кора.

1. Введение

Техническое применение высокотемпературных сверхпроводников в электротехнике и энергетике чаще всего связывают с лентами со сверхпроводящей сердцевиной из соединений на основе Bi в серебряной оболочке (или в оболочке из сплавов на основе серебра). Хотя уже созданы магниты с применением Bi лент (см., например, [1]), однако на пути к широкому их применению необходимо преодолеть некоторые проблемы, связанные с недостаточно высокой бездиссипативной токонесущей способностью и с их недостаточной механической прочностью. Что касается критических токов, то в последнее время появились работы, посвященные исследованию областей и «каналов», несущих сверхпроводящий ток в BSCCO лентах [2–4]. Было обнаружено, что сверхпроводящая сердцевина (или кор) лент имеет неоднородное распределение сверхпроводящего тока, т.е. существуют зоны, как правило близкие к интерфейсам (кор—серебряная оболочка), которые имеют плотность критическо-

* Основная часть работы выполнена в Centre for Superconducting and Electronic Materials, University of Wollongong, Wollongong, NSW 2522, Australia

© А. В. Пан, М. Ионеску, Ш. Х. Доу, 1996

го тока значительно более высокую, чем внутри кора. Причины такой неравномерности еще недостаточно ясны. Более высокую плотность критического тока вблизи интерфейса связывают с тем, что эти районы имеют более четко сформированную текстуру [5,6], т.е. *ab*-плоскость кристаллов BSCCO совпадает с плоскостью ленты, и более высокую плотность сверхпроводящего оксида [6,7]. Эти два фактора являются причинами а) более сильно связанных контактов между зернами сверхпроводника и б) формирования микроструктуры с более вытянутыми пластинчатыми зернами и практически полным отсутствием вторичных фаз. Были построены две различные модели — «железнодорожные стрелки» (railway switch) [8] и «кирпичная стена» (brick wall) [9] — которые принципиально отличаются характером тех предполагаемых межзеренных границ, через которые протекает сверхпроводящий ток.

В нарастающем потоке результатов по этой важной тематике имеются некоторые противоречия. Например, Ларбалстье и др. [5] и Грассо и др. [3] нашли, что значение плотности критического тока J_c на краях ленты выше, чем в ее центре, а Ямада и др. [6] получили противоположный результат: J_c в центре ленты, согласно их данным, выше, чем по краям. Авторы работы [6] связывают это с найденным ими распределением плотности сверхпроводящего оксида в сердцевине ленты после прокатки и последующей термической обработки.

В настоящей работе сделана попытка разрешить это противоречие и выяснить реальную ситуацию.

2. Эксперимент

Широко известный метод «порошок в трубе» был выбран для изготовления лент Bi-2212, прокатанных в серебряной или серебряно-медной оболочке. В предыдущей нашей работе подробно описаны все детали их изготовления [10].

Для исследования распределения плотности критического тока использовалась методика, сходная с описанной и примененной в работе Грассо и др. [3]. Для разрезания лент на полоски вдоль направления прокатки мы использовали специальный резак. Вследствие более прочной и твердой оболочки из сплава серебра с медью [10] разрезание таких образцов было сопряжено с большими трудностями из-за возникновения механических повреждений сверхпроводящей сердцевины, которые могли исказить результаты измерений. Поэтому результаты по распределению J_c приведены лишь для лент, прокатанных в серебре.

Распределение микротвердости оксида сердцевины по Виккерсу H_V в плоскости, перпендикулярной направлению прокатки, было измерено с помощью вдавливания алмазной пирамиды под нагрузкой 10 г. Микроструктура сердцевины лент изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Критический ток I_c измерялся с применением четырехконтактной методики и критерия по электрическому полю $E_c = 1$ мкВ/см. Все эксперименты проведены при температуре жидкого азота. Плотность критического тока определена как величина I_c, деленная на площадь поперечного сечения сверхпроводящего оксида сердцевины. Площадь определялась с помощью компьютерного анализа изображения поперечного сечения лент под оптическим микроскопом. Соответственно для каждой отрезанной полоски I_c, площадь поперечного сечения и J_c определяли отдельно.

3. Результаты и обсуждение

Как было уже упомянуто, в работах Ларбалстье и др. [5], и Грассо и др. [3] обнаружено, что на краях поперечного сечения сверхпроводящей ленты значение плотности критического тока выше, чем в центральной области ленты. С другой стороны, в работе Ямада и др. [6] содержится противоположный результат: в центре ленты, где плотность оксида сердцевины больше, J_c также больше, а на краях ленты и J_c, и плотность оксида сердцевины меньше. Ниже делается попытка разрешить это противоречие.

3.1. Распределение плотности оксидной сердцевины ленты

Согласно [11], предполагаем, что плотность оксида сердцевины и ее твердость по Виккерсу связаны между собой линейным соотношением. На рис. 1 приведено измеренное нами распределение твердости по Виккерсу в поперечном сечении оксида сердцевины лент. Для так называемых «зеленых» (т.е. термически необработанных) лент, прокатанных в Ag (рис. 1,а) или в сплаве AgCu (рис. 1,б), было обнаружено, что H_V в центральной зоне сердцевины ленты больше, чем на периферии (вблизи интерфейса по всему его периметру). По-видимому, это связано с тем, что в процессе прокатки, оболочка, вытягиваясь, увлекает за собой близлежащие частички порошка и, таким образом, скорость движения частиц порошка вблизи вытягивающейся оболочки больше, чем в центре, и уплотнение порошка вблизи оболочки

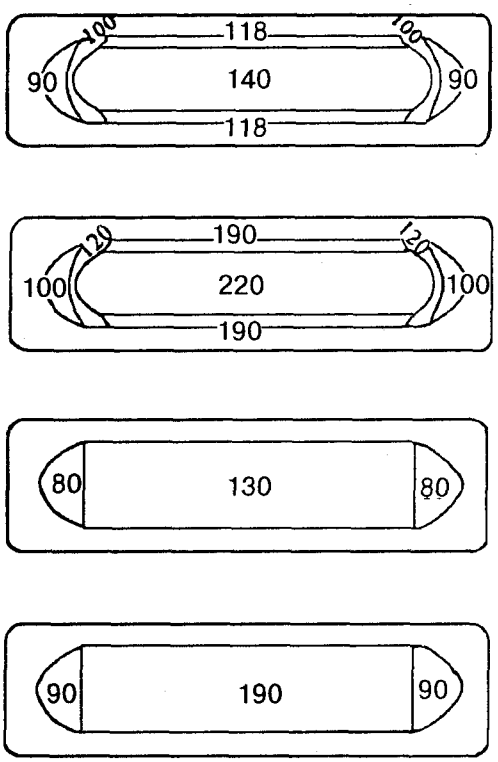

Рис. 1. Распределение твердости по Виккерсу по всему поперечному сечению сердцевины «зеленых» (нетермообработанных) лент (*а*, *б*) и полностью обработанных сверхпроводящих лент (*в*, *г*), прокатанных в чистом серебре (*а*, *в*) и в сплаве AgCu (*б*, *г*).

оказывается меньше, чем в центральных областях [12]. Эта «гидродинамическая» модель «течения» порошка в процессе прокатки и ее экспериментальное подтверждение с помощью измерений распределения H_V противоречит результатам, полученным Ямадой и др. [6,7], которые нашли, что области с наибольшей плотностью оксида сердцевины локализованы в центральной части ленты вблизи интерфейса сердцевина—оболочка.

После окончательной термической обработки исследуемых в данной работе лент самое низкое значение плотности сердцевины сохранялось на ее периферии, т.е. на краях поперечного сечения (см. рис. 1,*в*,*г*).

3.2. Микроструктура сверхпроводящего оксида сердцевины

Исследуя с помощью СЭМ микроструктуру лент, прокатанных как в серебряной оболочке, так и в оболочке из сплава AgCu, мы обнаружили следующие особенности микроструктуры сверхпроводящего кора (изображения центральных областей продольного сечения лент, прокатанных в Ag и AgCu, приведены на рис. 2,*а* и *б* соответственно).

В микроструктуре сердцевины ленты, прокатанной в чистом серебре (рис. 2,*а*), можно видеть слой оксида сердцевины толщиной около 10 мкм в непосредственной близости от интерфейса (оболочка—сердцевина), в котором практически отсутствуют вторичные фазы. Наблюдение поверхностного слоя с отличающейся от остальной сердцевины структурой и его толщина (около 10 мкм) совпадают с результатами, приведенными в [4]. По предположению, высказанному в работе [4], тонкий интерфейсный слой является главной токонесущей областью в BSCCO лентах и в нем достигается J_c до 10^5 А/см^2.

Исследования показали, что текстуры продольного сечения сверхпроводящей сердцевины на самом краю ленты и в ее центре существенно не различаются, что противоречит результатам работы [5], в которой обнаружена более четко сформированная текстура на краях ленты, чем в ее центре.

Сравнивая микроструктуры сердцевин лент, прокатанных в серебряной (рис. 2,*а*) и медно-серебряной (рис. 2,*б*) оболочках, можно видеть существенное различие. Сердцевина ленты, прокатанной в чистом серебре, имеет незначительное количество вторичных фаз и почти ламинарный интерфейс (рис .2,*а*). В случае оболочки из сплава AgCu (рис. 2,*б*) образование вторичных фаз и «языкообразной» (или, возможно, дендритообразной) границы на интерфейсе можно связать с диффузией меди из оболочки, а также с понижением температуры плавления сердцевины.

3.3. Распределение плотности критического тока

Bi-2212 ленты шириной около 4 мм и длиной 20 мм разрезались в направлении прокатки на четыре равные по ширине полоски (около 1 мм каждая). Ленты, разрезанные без снятия оболочки, были около 0,18 мм толщиной, т.е. приблизительно в два раза толще, чем в работе [3]. Несмотря на это, обнаруживалась лишь незначительная деградация I_c, связанная с неизбежными механическими повреждениями сверхпроводящего кора ленты в процессе разрезания. Например, один из образцов с I_c = 8,8 А был специально разрезан на две равные части, в каждой из которых был отдельно измерен критический ток. В результате оказалось, что критический ток одной полосы равнялся 4,4 А, а второй 4,2 А. Таким образом, ошибка измерений может быть оценена в 2,3%.

Полученное распределение плотности критического тока по ширине кора в Bi-2212 ленте, прокатанной в Ag оболочке и имеющей $I_c = 15{,}5$ А, что соответствует конструктивной (на все сечение кора) $J_c = 4\,900$ А/см^2, показано на рис. 3. Легко можно видеть, что на краях ленты плотность критического тока в 2,5-3 раза выше, чем в центре. Максимальное значение J_c для краевой полосы ленты соответствовало 9 400 А/см^2, тогда как для центральных полосок максимальное $J_c = 3\,000$ А/см^2. Для того чтобы избежать возможности любой ошибки, разрезание и соответствующие измерения были сделаны на нескольких образцах. Все результаты по распределению J_c оказались в полном соответствии друг с другом и хорошо согласуются с [3,5], но противоречат результатам [6].

Учитывая полученную зависимость (рис. 3) и результаты [4], согласно которым токонесущая способность слоя толщиной 10 мкм по периферии сердцевины вблизи оболочки намного выше, чем всей остальной сердцевины, а также полученные данные по микроструктуре (рис. 2,*а*) (а именно, образование по всему периметру сердцевины на границе с серебром тонкого слоя толщиной около 10 мкм, в котором практически отсутствуют включения других фаз, а структура, по-видимому, несколько отличается от структуры остальной сердцевины) были проведены элементарные расчеты

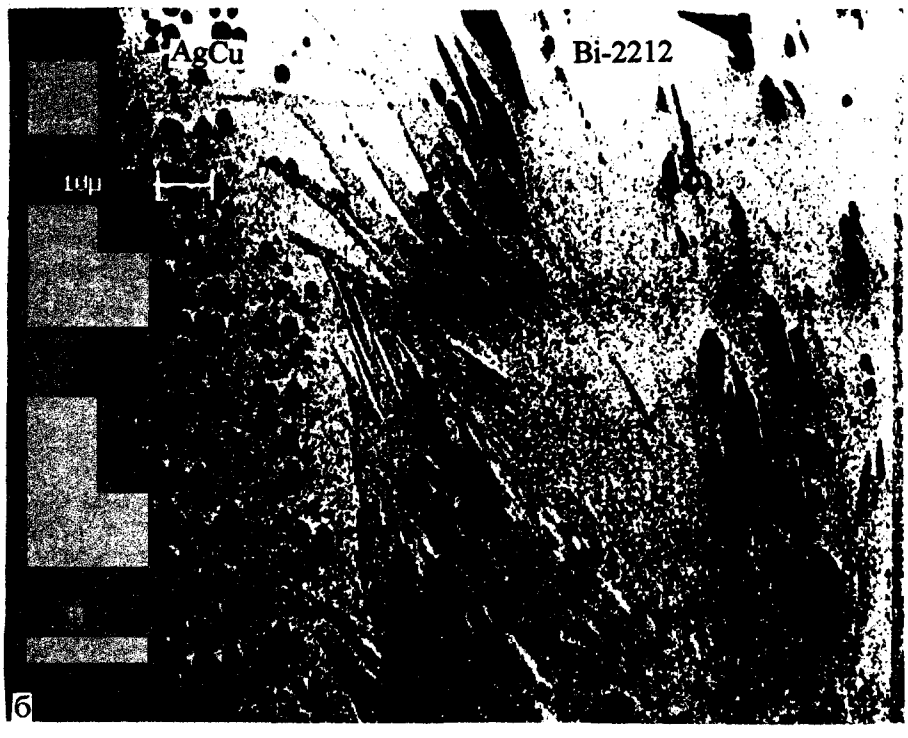

Рис. 2. СЭМ изображение микроструктуры лент, прокатанных в чистом серебре (*а*) и в сплаве AgCu (*б*).

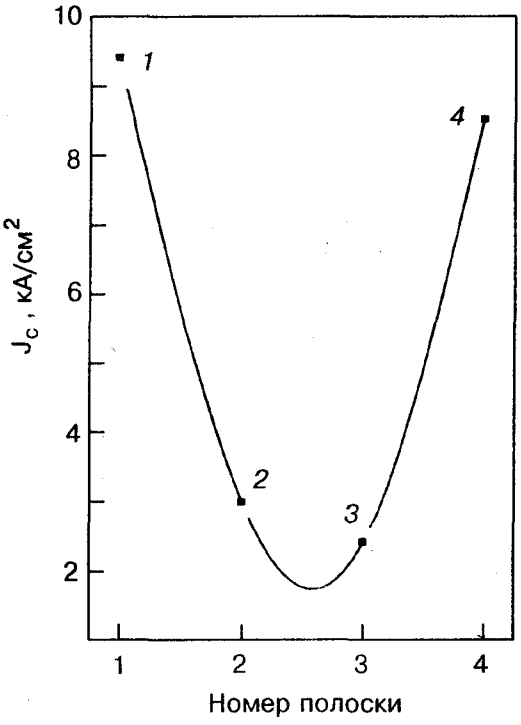

Рис. 3. Распределение плотности критического тока в поперечном сечении (по ширине) ленты Bi-2212, прокатанной в серебре. Максимальное значение J_c, полученное для отдельной полоски, равнялось 9 400 А/см^2 (точка *1*), минимальное 3 000 А/см^2 (точка *3*).

модельного распределения плотности критического тока в предположении, что практически вся токонесущая способность обусловлена интерфейсным слоем. С хорошей степенью точности поперечное сечение (его форма и площадь) ленты аппроксимируется сечением, изображенным на рис. 4. Область, которая не попадает в слой шириной 10 мкм, считалась не несущей сверхтока и поэтому вычиталась из общей площади. Толщина и ширина кора, измеренные с помощью оптического микроскопа, составляли 0,123 и 3,520 мм соответственно. Оказалось, что при таком пересчете J_c на краевых полосках ленты все же остается в два раза выше (около 36 000 А/см^2), чем в центральных

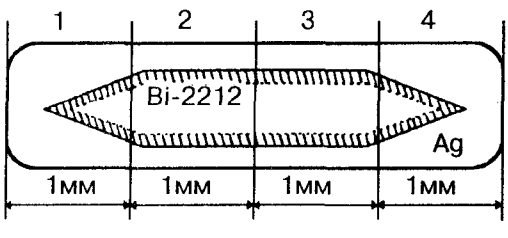

Рис. 4. Модельное поперечное сечение сверхпроводящей ленты Bi-2212, использованное для расчетов J_c в интерфейсном слое (заштрихован) толщиной около 10 мкм.

(около 18 000 А/см^2). Таким образом, если интерфейсный эффект, предложенный в работе [4], существует, то он не может полностью объяснить экспериментальное распределение J_c. По-видимому, это вызвано тем, что в краевых областях сказывается обнаруженное понижение плотности кора, которое сохраняется даже после окончательной термообработки. В сочетании с краевой геометрией это обстоятельство может способствовать улучшению условий и кинетики формирования оптимальной токонесущей структуры в жидко-твердом состоянии. Необходимы дополнительные исследования тонкой структуры краевых (и интерфейсных) областей методом трансмиссионной электронной микроскопии.

4. Заключение

Таким образом, найдено, что области на краях поперечного сечения Bi-2212 ленты, а также по всему периметру сердцевины соответствуют более низкой твердости (а следовательно, плотности). Интерфейсная область толщиной около 10 мкм вблизи Ag оболочки имеет несколько отличающуюся от остальной сердцевины структуру, в которой практически отсутствуют включения вторичных фаз. Измерения распределения плотности критического тока поперек кора показывают, что на обоих краях ленты значение J_c в 2,5–3 раза больше, чем в центральной части ленты.

Расчет показывает, что интерфейсный эффект, возникающий вследствие увеличенной почти на порядок J_c в приграничном к оболочке слое, не дает возможности полностью объяснить пространственное распределение J_c. Поэтому с учетом пониженной плотности краевых областей высказывается предположение, что процесс формирования оптимальной структуры при термообработке в присутствии жидкой фазы может стимулироваться геометрией краевой зоны.

1. R. G. Jenkins, H. Jones, J. Burgoyne, D. Dew-Hughes, M. Yang, and C. R. M. Grovenor, *Europian Conf. on Appl. Supercond., 3–6 July*, Edinburg, Scotland (1995).
2. A. E. Pashitski, A. Polyanskii, A. Gurevich, K. A. Parrell, and D. C. Larbalestier, *Physica* C246, 133 (1995).
3. G. Grasso, B. Hensel, A. Jeremie, and R. Flukiger, *Physica* C (to be publ.)
4. M. Lelovic, P. Krisnaraj, N. G. Eror, and U. Balachandran, *Physica* C242, 246 (1995).
5. D. C. Larbalestier, X. Y. Cai, H. Edelman, M. B. Field, Y. Feng, J. Parrell, A. Pashitski, and A. Polyanskii, JOM, December, 20 (1994).
6. Y. Yamada, M. Satou, T. Masegi, S. Nomura, S. Murase, T. Koizumi, and Y. Kamisada, *Proc. of the 6th Int. Symp. on Supercond. October 26-29*, Hiroshima (1993).

7. Y. Yamada, M. Satou, S. Murase, T. Kitamura, and Y. Kamisada, *Proc. of the 5th Int. Symp. on Supercond. (ISS'92), November 16-19*, Kobe (1992).
8. B. Hensel, J.-C. Grivel, A. Jeremie, A. Perin, A. Pollini, and R. Flukiger, *Physica* **C205**, 329 (1993).
9. L. N. Bulaevskii, J. R. Clem, L. I. Glazman, and A. P. Malozemoff, *Phys. Rev.* **B45**, 2545 (1992).
10. А. В. Пан, М. Ионеску, Ш. Х. Доу, *МФиНТ* (в печати).
11. M. Satou, Y. Yamada, S. Murase, T. Kitamura, and Y. Kamisada, *App. Phys. Lett.* **64** (5), 640 (1994).
12. Z. Han and T. Freltoft, *Appl. Supercond.* 2, 401 (1994).

Spatial distribution of the critical current density in superconducting Bi-2212 strips

A. V. Pan, M. Ionescu, and S. X. Dou

By cutting Bi-2212 tapes along the rolling direction into the strips and by separate measuring each of those strips, it has been obtained the spatial distribution of the critical current density J_c in the superconducting core. It was found that in the strips which were on the edges of the tape J_c values 2.5–3 times as large as that at the central strips. Unexpectedly, the measured distribution of the oxide core density showed the lowest value of the core density at the edge areas. In the superconducting core was also observed a layer of about 10 μm thick almost without secondary phases in the vicinity of the silver sheath. The J_c calculation showed that the effect due to J_c increased by almost order of magnitude at the core layer near the sheath-core interface does not explain completely the spatial distribution of J_c. Indeed on the edge of the layer J_c was of about 36 000 A/см^2, while in the central region of the layer — about 18000 A/см^2. Therefore, it has been assumed that taking into account the lower oxide core density on the edges, the forming process of the optimal structure can be stimulated by the geometry of the core edge area.