

02

## Влияние структурной воды на критические характеристики высокотекстурированного $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$

© И.Б. Бобылев, Е.Г. Герасимов, Н.А. Зюзева

Институт физики металлов УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия

E-mail: bobylev@imp.uran.ru

(Поступила в Редакцию 26 марта 2014 г.)

Исследовано влияние низкотемпературной обработки ( $200^\circ\text{C}$ ) во влажной атмосфере аргона и последующего отжига ( $930^\circ\text{C}$ ) на критические параметры высокотекстурированного  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$ . В ходе отжига при  $t = 200^\circ\text{C}$  поглощенная вода встраивается в структуру соединения, что сопровождается ухудшением его сверхпроводящих свойств. Однако после восстановительного отжига при  $t = 930^\circ\text{C}$  и последующего окисления сверхпроводящие характеристики ( $j_c$ ,  $B_{1c}$  и  $F_p$ ) улучшаются, что объясняется формированием планарных дефектов типа 124, являющихся эффективными центрами пиннинга, особенно в высоких полях, приложенных перпендикулярно оси  $c$  ( $\perp c$ ). Найдены оптимальные условия двойного отжига, после которого существенно возрастает плотность критического тока ( $j_c \geq 10^4 \text{ A/cm}^2$ ) во внешнем магнитном поле вплоть до 10 Т, а также значения первых критических полей. При этом в полях до  $\sim 3$  Т наблюдается изотропия  $j_c$ , несмотря на сохранение в образцах высокой текстуры.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта Президиума РАН № 12-П-2-1015.

### 1. Введение

Известно [1–3], что создание структурных нанеоднородностей, отличающихся по химическому составу и свойствам от матричной сверхпроводящей фазы, способствует усилению пиннинга магнитных вихрей, что приводит к повышению токонесущей способности ВТСП-материалов, в высоких магнитных полях. В [4–8] было установлено, что в ходе обработки соединений типа  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (123) при  $t \leq 200^\circ\text{C}$  наблюдается фазовый распад с выделением несверхпроводящих частиц (5–10 nm), размеры которых близки к длине когерентности для данного соединения ( $\xi \sim 1.5 \text{ nm}$ ).

С другой стороны, в [9] было показано, что при температурах, близких к комнатной,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  взаимодействует с атмосферной влагой, вследствие чего в нем образуются дефекты упаковки, представляющие собой дополнительные плоскости  $\text{Cu-O}$  длиной  $\sim 20 \text{ nm}$  и толщиной 1.2–2.4 nm. Подобные дефекты также достаточно часто встречаются в высокотекстурированной плавленной керамике, полученной методом МТГ с добавлением  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  (211) [10]. Помимо структурных дефектов в этих материалах, центрами пиннинга являются также границы частиц фазы 211 с матрицей 123 [11].

В [12] при исследовании методом ПЭМ высокотекстурированной керамики было обнаружено, что в ходе обработки при  $t = 200^\circ\text{C}$  во влажной атмосфере аргона в ней также образуются пакеты дефектов упаковки. При длительной обработке в этих условиях нестехиометрический по кислороду  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  переходит в несверхпроводящую псевдокубическую фазу [13,14].

В [15–17] исследованы керамические и плавленные текстурированные образцы после обработки при  $t = 200^\circ\text{C}$  и восстановительного отжига при  $t = 930^\circ\text{C}$  с последу-

ющим окислением при  $t = 400^\circ\text{C}$ . Показано, что после низкотемпературной обработки в атмосфере кислорода, а также двойного отжига ( $200$  и  $930^\circ\text{C}$ ) в них наблюдается заметное улучшение полевой зависимости плотности критического тока ( $j_c$ ) и увеличение значений первого критического поля по сравнению с исходным состоянием.

В настоящей работе исследовано влияние низкотемпературной обработки во влажной атмосфере аргона и восстановительного отжига при  $t = 930^\circ\text{C}$  на критические характеристики высокотекстурированной керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$ . Ранее в [13–16] нами были проведены исследования электрофизических свойств в зависимости от продолжительности низкотемпературного отжига. Однако время отжига не является определяющим фактором, поскольку различные по происхождению образцы по-разному поглощают воду. Целью данного исследования являлось определение влияния содержания структурной воды на критические характеристики и нахождение оптимальных условий двойного отжига, которые бы позволили существенно улучшить токонесущую способность материалов типа 123.

### 2. Методика

Материалом для исследования являлась керамика  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$ , синтезированная методом МТГ (melt-textured growth) [11] в ВНИИМ им. А.А. Бочвара. Согласно данным измерений магнитной восприимчивости, критическая температура образцов равнялась 90 К. По данным рентгенографического анализа от плоскости  $ab$  отражаются только линии 001. Образцы содержали  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  (30 mass.%). Низкотемпературные отжики проводились при  $t = 200^\circ\text{C}$  в проточной атмосфере

аргона, насыщенной парами воды. Восстановительные отжиги проводились при  $t = 930^\circ\text{C}$  (1 h) с последующим окислением при  $t = 400^\circ\text{C}$  в атмосфере кислорода (24 h) с целью достижения исходного кислородного индекса  $\approx 6.9$ . Намагниченность образцов измерялась при  $T = 77\text{ K}$  в импульсных магнитных полях до 11 Т. Более подробно методика измерений описана в [17]. Петли гистерезиса регистрировались как в поле, приложенном параллельно оси  $c$  ( $\parallel c$ ), так и перпендикулярно ей ( $\perp c$ ). Образцы имели размеры  $\approx 2.5 \times 2.5 \times 1.5\text{ mm}$ . Плотность критического тока рассчитывалась по модифицированной формуле Бина [18]

$$j_c = 20\Delta M/a(1 - a/3b),$$

где  $\Delta M$  — ширина петли намагничивания;  $a$  и  $b$  — размеры прямоугольного образца ( $a < b$ ). Значения нижнего критического поля ( $B_{c1}$ ) определялись по отклонению от линейной зависимости первоначального участка кривой  $V = f(B)$ . Сила пиннинга рассчитывалась с использованием уравнения

$$F_p = j_c B.$$

Содержание воды контролировалось методом гравиметрии. Погрешность измерения массы составляла  $\pm 0.005\%$ . Рентгенографическое исследование проводилось на дифрактометре типа ДРОН-3М в медном излучении.

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены зависимости  $j_c$  в собственном поле от концентрации воды в образцах. Из рисунка видно, что по мере увеличения ее содержания наблюдается снижение значений  $j_c$  в обеих ориентациях приложенного поля (кривые 1, 2). Однако на аналогичных зависимостях первого критического поля ( $B_{c1}$ ) имеют место ярко

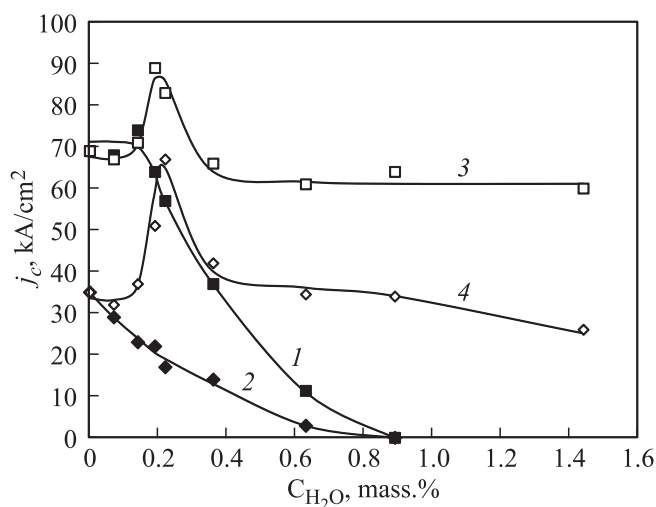


Рис. 1. Зависимости  $j_c$  в нулевом поле от концентрации воды после обработки при  $t = 200^\circ\text{C}$ : 1 —  $\parallel c$ , 2 —  $\perp c$ ; после восстановительного отжига: 3 —  $\parallel c$ , 4 —  $\perp c$ .

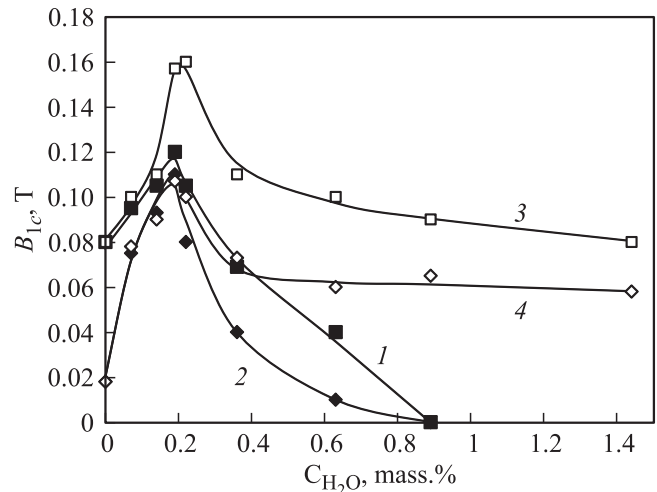
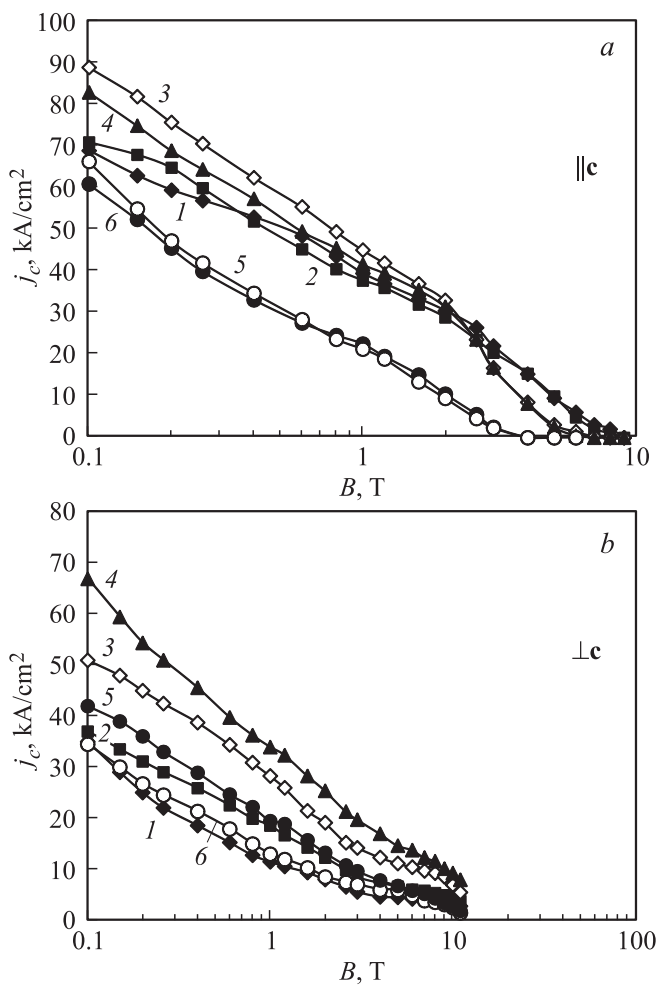


Рис. 2. Зависимости первого критического поля от концентрации воды после обработки при  $t = 200^\circ\text{C}$ : 1 —  $\parallel c$ , 2 —  $\perp c$ ; после восстановительного отжига: 3 —  $\parallel c$ , 4 —  $\perp c$ .

выраженные максимумы после поглощения  $\sim 0.2\text{ mass.}\%$  воды (рис. 2). Значения  $B_{c1}$  приблизительно одинаковы ( $\sim 0.11\text{ T}$ ), что свидетельствует об изотропии материала по этому параметру. При вхождении воды в структуру данного соединения происходят два процесса: заполнение  $\text{OH}^-$ -группами имеющихся вакансий типа  $\text{O}_1$  и, возможно,  $\text{O}_5$  [19–21], а также образование дефектов упаковки типа 124 [22]. Известно [23], что образование структурных дефектов препятствует проникновению магнитного потока, а их оптимальная концентрация может приводить к повышению  $B_{c1}$ .

После восстановительного отжига ( $930^\circ\text{C}$ ) на зависимостях  $j_c = f(C_{\text{H}_2\text{O}})$  для образцов, поглотивших  $\approx 0.2\text{ mass.}\%$   $\text{H}_2\text{O}$ , наблюдаются максимумы  $j_c$ , превышающие исходные значения на 30–100% (рис. 1, кривые 3, 4). Величины  $B_{c1}$  для этих образцов также существенно превышают исходные (рис. 2, кривые 3, 4). Это является положительным фактором для практического применения устройств, работающих в низких внешних магнитных полях. При поглощении большого количества воды плотность критического тока, так же как и величины  $B_{c1}$ , снижается до значений, характерных для исходного состояния (рис. 1, 2).

В ходе восстановительного отжига ( $930^\circ\text{C}$ , 1 h) структурная вода удаляется, расположение атомов в значительной мере упорядочивается, о чем свидетельствует переход в орторомбическую решетку после окислительного отжига [15]. Однако ромбическое искажение решетки понижено, а в [24] методом ПЭМ наблюдалась необычная система двойников (две системы двойников по плоскостям  $(1\bar{1}0)$  и  $(110)$ ) и большое количество скоплений дислокаций. Электронограмма также свидетельствует о пониженном ромбическом искажении. При этом на ней присутствует наложение двух обратных решеток, одна из которых принадлежит орторомбической фазе, а другая кубической фазе, что говорит о неполном



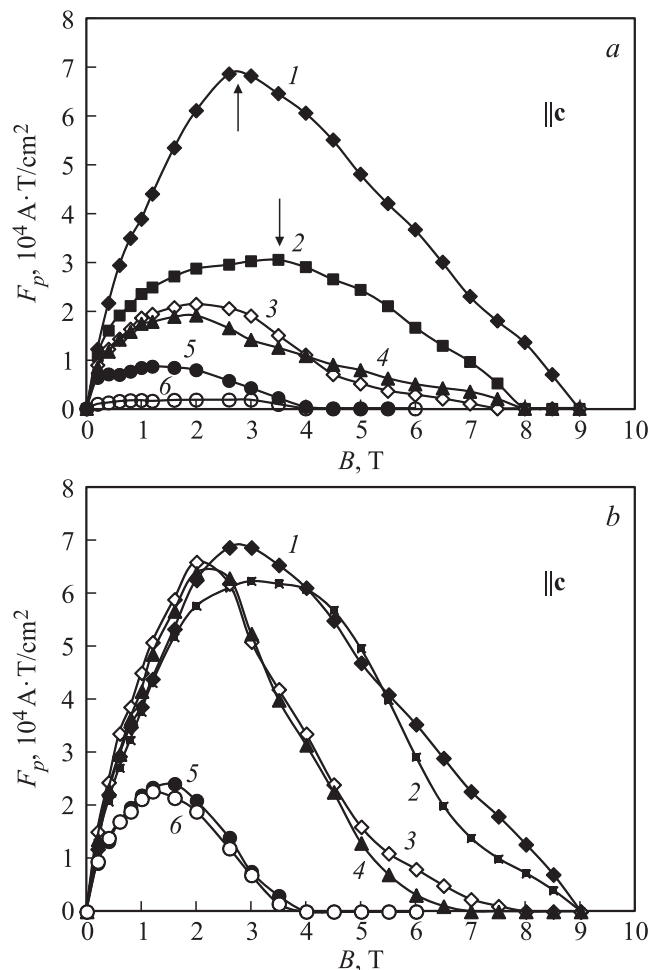
**Рис. 3.** Зависимости  $j_c$  от внешнего поля, приложенного  $\parallel c$  (a) и  $\perp c$  (b) для образцов с различным содержанием воды после двойного отжига ( $t = 200^\circ\text{C}$  и  $930^\circ\text{C}$ ): 1 — исходное состояние; 2 — 0.14; 3 — 0.19; 4 — 0.22; 5 — 0.36; 6 — 0.63 mass.%.

восстановлении первоначальной структуры после непродолжительного отжига при  $t = 930^\circ\text{C}$ . В совокупности все эти дефекты структуры (как гомогенные, так и гетерогенные), по-видимому, приводят к синергическому эффекту [25] и способствуют существенному улучшению токонесущей способности поглотившего оптимальное количество воды при  $t = 200^\circ\text{C}$  материала после двойного отжига.

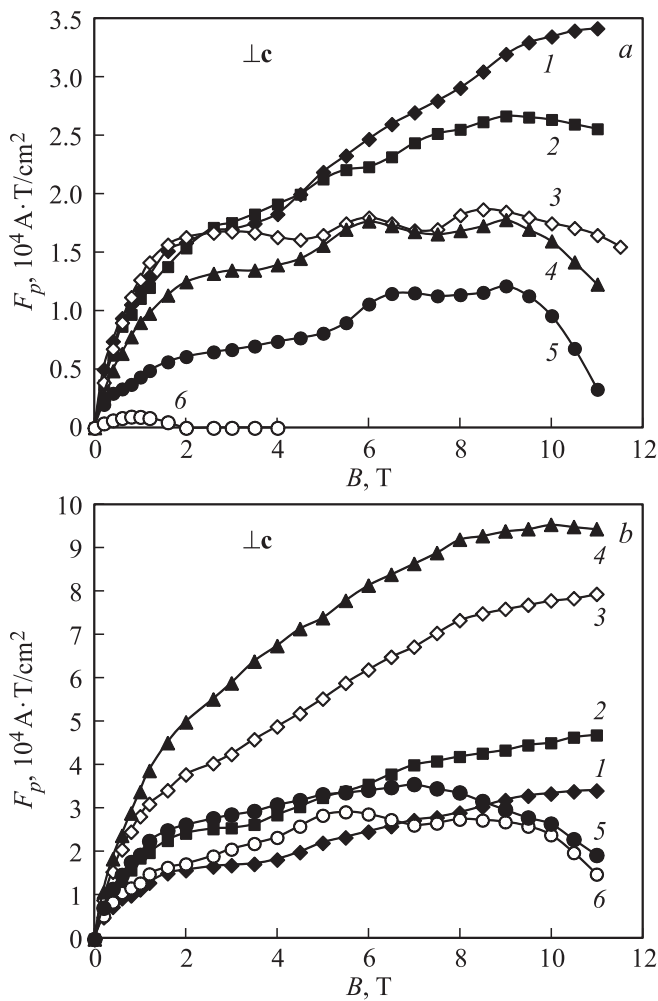
Полевые зависимости  $j_c = f(B)$  также показывают, что по мере поглощения воды при  $t = 200^\circ\text{C}$  плотность критического тока систематически падает во всех магнитных полях. Одновременно уменьшаются и значения полей необратимости ( $B_{\text{irr}}$ ). После восстановительного отжига ( $930^\circ\text{C}$ ) в поле, приложенном  $\parallel c$ , плотность критического тока несколько возрастает по сравнению с исходным состоянием в низких и средних полях для образцов, поглотивших при низкотемпературном отжиге  $\leq 0.2$  mass.% воды (рис. 3, a). В случае большего поглощения воды происходит существенное падение

значений  $j_c$  и  $B_{\text{irr}}$ . Если поле приложено  $\perp c$ , то после восстановительного отжига имеет место резкий рост  $j_c$  для образцов, поглотивших  $\sim 0.2$  mass.% (рис. 3, b). При этом значения  $j_c \geq 10^4 \text{ A/cm}^2$  сохраняются в магнитных полях вплоть до 10 Т, что, по-видимому, является рекордным в настоящее время результатом для массивных текстурованных материалов типа Y-123.

Вхождение воды в структуру образцов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$ , обработанных при  $t = 200^\circ\text{C}$ , также приводит к резкому падению силы пиннинга (рис. 4 a, 5, a). Если поле приложено  $\parallel c$ , то максимум  $F_p$  смещается в сторону больших полей при содержании воды до 0.14 mass.% (рис. 4, a, показано стрелками). Это может свидетельствовать о том, что в процессе фазового распада образуются частицы с подавленной сверхпроводимостью, которые становятся центрами пиннинга при повышении внешнего магнитного поля. Однако дальнейшее увеличение содержания воды приводит к смещению максимума в сторону меньших полей. Это указывает на то, что в качестве центров пиннинга преобладают несверхпроводящие дефекты.



**Рис. 4.** Зависимости силы пиннинга от внешнего поля, приложенного  $\parallel c$  для образцов с различным содержанием воды: a) после отжига при  $t = 200^\circ\text{C}$ , b) после восстановительного отжига: 1 — исходное состояние; 2 — 0.14; 3 — 0.19; 4 — 0.22; 5 — 0.36; 6 — 0.63 mass.%.



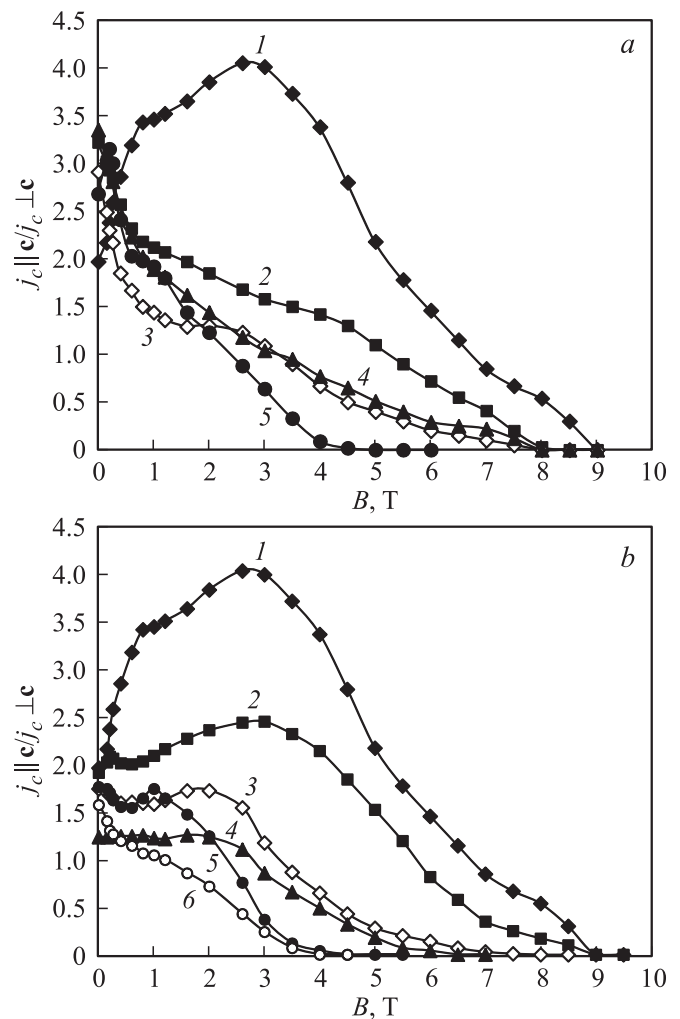
**Рис. 5.** Зависимости силы пиннинга от внешнего поля, приложенного  $\perp c$  для образцов с различным содержанием воды: *a*) после отжига при  $t = 200^\circ C$ , *b*) после восстановительного отжига: 1 — исходное состояние; 2 — 0.14; 3 — 0.19; 4 — 0.22; 5 — 0.36; 6 — 0.63 mass.%.

Если поле приложено  $\perp c$ , то на зависимости  $F_p = f(B)$  помимо основного максимума при  $B \gg 9 T$ , характерного для исходного состояния [17], возникают дополнительные максимумы при  $B \sim 6$  и  $\sim 9 T$  (рис. 5, *a*). Причиной этого является образование новых центров пиннинга иной природы. Помимо частиц зеленой фазы, имеющих в исходном состоянии, при поглощении воды увеличивается количество планарных дефектов упаковки, которые эффективны в полях, приложенных параллельно этим дефектам [26]. Дополнительный максимум при  $B \sim 6 T$  соответствует значению приведенного поля  $h = B/B_{irr} \approx 0.2$ , что, согласно теории [23], характерно для планарных центров пиннинга.

После восстановительного отжига на зависимости  $F_p = f(B)$  в случае поля, приложенного  $\parallel c$ , максимум силы пиннинга по мере увеличения содержания воды смещается в сторону меньших полей (рис. 4, *b*). Напротив, в поле, приложенном  $\perp c$ , по мере поглощения воды

до  $\approx 0.2$  mass.% происходит сильный рост силы пиннинга во всех полях, далее наблюдается резкое снижение (рис. 5, *b*). Увеличение  $F_p$  в основном только в поле, приложенном  $\perp c$ , свидетельствует о том, что имеет место коррелированный пиннинг, который обусловлен появлением множества планарных дефектов [3,26].

На рис. 6 приведены полевые зависимости анизотропии критической плотности тока ( $j_c \parallel c / j_c \perp c$ ), из которых видно, что при увеличении внешнего поля до  $\sim 3 T$  в исходном образце анизотропия  $j_c$  существенно возрастает. Картина принципиально меняется после поглощения воды. Максимальная анизотропия наблюдается в низких полях, постепенно снижаясь вплоть до перехода в состояние с обратной анизотропией в высоких полях ( $j_c \parallel c < j_c \perp c$ ). Кроме того, в малых полях после низкотемпературной обработки анизотропия существенно выше по сравнению с исходным состоянием. Это может быть связано со смещением максимума  $F_p$  из-за понижения  $B_{irr}$  в случае внешнего поля, направленного  $\parallel c$ .



**Рис. 6.** Зависимости анизотропии критической плотности тока ( $j_c \parallel c / j_c \perp c$ ): *a*) после отжига при  $t = 200^\circ C$ ; *b*) после восстановительного отжига: 1 — исходное состояние; 2 — 0.14; 3 — 0.19; 4 — 0.22; 5 — 0.36; 6 — 0.63 mass.%.

После восстановительного отжига максимум на полевых зависимостях анизотропии также исчезает, а для образца, поглотившего при низкотемпературном отжиге  $\approx 0.22 \text{ mass.}\%$  воды, имеет место почти изотропное состояние материала в полях до  $\sim 3 \text{ T}$  ( $j_c \parallel \mathbf{c} \approx j_c \perp \mathbf{c}$ ) (рис. 6, *b*, кривая 4). Это связано с тем, что в поле, приложенном  $\perp \mathbf{c}$ ,  $j_c$  возрастает значительно сильнее, чем в поле, приложенном  $\parallel \mathbf{c}$ .

Согласно рентгенографическим данным, после отжига при  $t = 930^\circ\text{C}$  в образцах, поглотивших  $\leq 0.36 \text{ mass.}\%$  воды, первоначальная высокая текстура сохраняется. Слабые нарушения ее вследствие первичной рекристаллизации имеют место лишь после восстановления образцов, поглотивших  $\geq 0.63 \text{ mass.}\%$  воды. Полученные результаты отличаются от [16], что свидетельствует о том, что степень развития рекристаллизации после двойного отжига существенно зависит от технологии синтеза и микроструктуры исходного материала.

Полученные результаты показывают, что вхождение воды в структуру  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$  в количестве  $\sim 0.2 \text{ mass.}\%$  является оптимальным в плане существенного улучшения его электрофизических свойств. Можно предположить, что поглощение воды до  $\sim 0.2 \text{ mass.}\%$  приводит преимущественно к заполнению  $\text{OH}^-$ -группами имеющихся кислородных вакансий типа  $\text{O}_1$ . Элементарный расчет показывает, что при данном содержании кислорода имеется такое количество этих вакансий, которое способно поглотить только  $\sim 0.2 \text{ mass.}\%$  воды.

Кроме того, вхождение воды в структуру ведет к образованию планарных дефектов, которые до определенной концентрации усиливают пиннинг магнитных вихрей, но слишком большое их количество приводит к ухудшению электрофизических свойств. В частности, избыток этих дефектов может способствовать проникновению магнитного поля и снижению значений  $B_{c1}$  в случае поля, приложенного  $\perp \mathbf{c}$ . Механизм проникновения поля через планарные дефекты может быть связан с тем, что расстояния между ними в плоскости  $ab$  становятся меньше лондонской глубины проникновения ( $\lambda \sim 140 \text{ nm}$ ). В этом случае магнитное поле способно проникать в сверхпроводник через участки с ненарушенной структурой.

В случае обработки при  $t = 200^\circ\text{C}$  в атмосфере кислорода вода почти не поглощается и имеет место только распад с образованием обедненных кислородом частиц, являющихся центрами пиннинга [17]. При термообработке в нейтральной атмосфере в присутствии влаги происходит аналогичный процесс, отличающийся тем, что при вхождении воды в структуру 123 происходит образование оксид-гидроксида  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{y-x}(\text{OH})_{2x}$ , который распадается на обогащенную кислородом матрицу и обедненные кислородом и богатые водой частицы [14]. Снижение значений  $j_c$  по мере поглощения воды связано с развитием полей напряжений, возникающих вокруг образовавшихся несверхпроводящих структурных дефектов в матричной фазе [4,17], а также с разупорядочением вследствие этого атомов, приводящим к переходу ее в псевдокубическую фазу.

В ходе непродолжительного восстановительного отжига вода удаляется, частично остаются планарные дефекты упаковки, образуются неравновесная система двойников и иные структурные дефекты, которые являются центрами пиннинга и улучшают электрофизические свойства, особенно в поле, приложенном  $\perp \mathbf{c}$ . Ухудшение критических характеристик ( $j_c$ ,  $B_{c1}$ ,  $B_{irr}$ ) после восстановительного отжига образцов, поглотивших  $> 0.2 \text{ mass.}\%$  воды, по-видимому, связано со слишком большой плотностью дефектов структуры, которые неспособны в результате отжига достичь оптимальной концентрации в течение 1 h.

#### 4. Заключение

Вхождение воды в структуру  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$  при низкотемпературном отжиге приводит к ухудшению его критических характеристик, однако при определенной ее концентрации ( $\sim 0.1-0.2 \text{ mass.}\%$ ) значения первого критического поля заметно увеличиваются. После непродолжительного восстановительного отжига ( $930^\circ\text{C}$ , 1 h с последующим окислением) плотность критического тока для образцов, поглотивших  $\sim 0.2 \text{ mass.}\%$  воды, а также величины первых критических полей значительно возрастают по сравнению с исходным состоянием, в том числе в высоких внешних магнитных полях. Такое содержание воды в структуре  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$  перед восстановительным отжигом является оптимальным.

Наиболее существенное улучшение электрофизических свойств наблюдается в магнитном поле, приложенном  $\perp \mathbf{c}$ . При этом материал, несмотря на высокую текстуру, становится в плане значений критической плотности тока близким к изотропному в полях до  $\sim 3 \text{ T}$ . Причиной улучшения свойств после двойного отжига является присутствие в материале структурных дефектов различных типов, в том числе обеспечивающих коррелированный пиннинг планарных дефектов, что приводит к синергическому эффекту от вкладов каждого из них в силу пиннинга.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра коллективного пользования ИФМ УрО РАН В.А. Сазоновой и М.В. Чунтоновой за проведение рентгенографических измерений.

#### Список литературы

- [1] M.R. Koblishka, M. Murakami. Supercond. Sci. Technol. **13**, 738 (2000).
- [2] Yu.D. Tretyakov, E.A. Goodilin. Physica B **321**, 249 (2002).
- [3] M. Muralidhar, M. Murakami. Phys. Rev. B **62**, 13 911 (2000).
- [4] S.V. Sudareva, E.I. Kuznetsova, T.P. Krinitsina, I.B. Bobylev, E.P. Romanov. Physica C **331**, 263 (2000).
- [5] Е.И. Кузнецова, Т.П. Криница, С.В. Сударева, И.Б. Бобылев, Е.П. Романов. ФММ **81**, 113 (1996).
- [6] И.Б. Бобылев, Н.А. Зюзева, С.В. Сударева, Т.П. Криница, Л.Н. Кузьминых, Ю.В. Блинова, Е.П. Романов. ФММ **102**, 550 (2006).

- [7] Е.И. Кузнецова, Ю.В. Блинова, С.В. Сударева, Т.П. Криницина, И.Б. Бобылев, Е.П. Романов. *ФММ* **102**, 229 (2006).
- [8] И.Б. Бобылев, С.В. Сударева, Н.А. Зюзева, Т.П. Криницина, А.В. Королев, Ю.В. Блинова, Е.П. Романов. *ФММ* **98**, 59 (2004).
- [9] Zhao Rupeng, M.J. Goringe, S. Myhra, P.S. Turner. *Philosophical Mag. A* **66**, 491 (1992).
- [10] M. Murakami. *Supercond. Sci. Technol.* **5**, 185 (1992).
- [11] Ю.Д. Третьяков, Е.А. Гудилин. *Успехи химии* **69**, 3 (2000).
- [12] С.В. Сударева, Е.П. Романов, Т.П. Криницина, Е.И. Кузнецова, Ю.В. Блинова, И.Б. Бобылев, Н.А. Зюзева, А.М. Бурханов. *ФММ* **106**, 378 (2008).
- [13] И.Б. Бобылев, Н.А. Зюзева, Е.П. Романов. *ФММ* **106**, 388 (2008).
- [14] И.Б. Бобылев, Н.А. Зюзева. *ФММ* **112**, 134 (2011).
- [15] И.Б. Бобылев, Н.А. Зюзева, Е.П. Романов. *ФТТ* **52**, 1253 (2010).
- [16] И.Б. Бобылев, Е.Г. Герасимов, Н.А. Зюзева. *ЖЭТФ* **142**, 535 (2012).
- [17] И.Б. Бобылев, Е.Г. Герасимов, Н.А. Зюзева. *ФТТ* **54**, 9, 1633 (2012).
- [18] G. Kozlowski, I. Maartense, R. Spyker, R. Leese, C.E. Oberly. *Physica C* **173**, 195 (1991).
- [19] A.V. Dooglav, A.V. Egorov, I.R. Mukhamedshin, A.V. Savincov, H. Alloul, J. Bobroff, W.A. Mac Farlane, P. Mendels, G.Collin, N. Blanchard, P.G. Picard, J.C. King, J. Lord. *Phys. Rev. B* **70**, 054 506-1 (2004).
- [20] S.B. Schougaard, M.F. Ali, J.T. McDevitt. *Appl. Phys. Lett.* **84**, 1144 (2004).
- [21] Ю.С. Поносов, И.Б. Бобылев, Н.А. Зюзева. *Письма в ЖЭТФ* **99**, 389 (2014).
- [22] W. Gunther, R. Schollhorn, M. Epple, H. Siegle, Ch. Thomsen, B. Kabius, U. Poppe, J. Schubert, W. Zander. *Philos. Mag. A* **79**, 449 (1999).
- [23] Физико-химические основы получения сверхпроводящих материалов / Под ред. Е.А. Савицкого, О. Хенкеля, Ю.В. Ефимова. *Металлургия*, М. (1961). 373 с.
- [24] И.Б. Бобылев, Е.И. Кузнецова, Т.П. Криницина, Н.А. Зюзева, С.В. Сударева, Е.П. Романов. *ФММ* **112**, 175 (2011).
- [25] B. Maiorov, S.A. Baily, H. Zhou, O. Ugurlu, J.A. Kennison, P.C. Dowden, T.G. Holesinger, S.R. Foltyn, L. Civale. *Nature Mater.* **8**, 398 (2009).
- [26] S.R. Foltyn, L. Civale, J.L. Mac Manus-Driscoll, Q.X. Jia, B. Maiorov, M. Maley, H. Wang. *Nature Mater.* **6**, 631 (2007).