

УДК 538.945+537.312.62

## ЕВОЛЮЦІЯ НАМАГНІЧЕННЯ ТЕКСТУРОВАНИХ YBCO-КРИСТАЛІВ ПРИ СЛАБКОМУ ДОПУВАНІ СРІБЛОМ

Д.О. Лотник, Р.В. Вовк, А.А. Завгородній, М.О. Оболенський

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

пл. Свободи 4, 61077, Україна

E-mail: [dmitry.a.lotnik@univer.kharkov.ua](mailto:dmitry.a.lotnik@univer.kharkov.ua)

Поступила в редакцію 6 серпня 2009 г.

У роботі експериментально досліджені криві намагнічення  $M(B)$  в текстурованих зразках  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  і  $YBa_2Cu_{3-x}Ag_xO_{7-\delta}$  (при  $x \approx 0.02$ ). Виявлено максимум намагнічення в проміжних полях (пик-ефект - ПЕ), що спостерігався в достатньо широкому діапазоні температур  $40\text{ K} < T < 75\text{ K}$  при орієнтації магнітного поля  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$ . Показано, що вплив на ПЕ об'ємного піннінгу домінує при більш низьких температурах, а вплив поверхневого піннінгу - при більш високих. Значення  $j_{c,max}$  для кристалів  $YBa_2Cu_{3-x}Ag_xO_{7-\delta}$  зміщується у бік високих магнітних полів, що, можливо, пов'язано з наявністю додаткових центрів піннінгу створених атомами срібла.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ВТНП-кристали  $YBaCuO$ , пик-ефект, піннінг, крип.

## ЕВОЛЮЦІЯ НАМАГНІЧЕННЯ ТЕКСТУРОВАННИХ YBCO-КРИСТАЛЛІВ ПРИ СЛАБОМУ ДОПУВАНІ СЕРЕБРОМ

Д.А. Лотник, Р.В. Вовк, А.А. Завгородній, М.А. Оболенський

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

пл. Свободы 4, 61077, Украина

В работе экспериментально исследованы кривые намагничивания  $M(B)$  в текстурованных образцах  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  и  $YBa_2Cu_{3-x}Ag_xO_{7-\delta}$  (при  $x \approx 0.02$ ). Обнаружен максимум намагничивания в промежуточных полях (пик-эффект - ПЭ), наблюдающийся в достаточно широком диапазоне температур  $40\text{ K} < T < 75\text{ K}$  при ориентации магнитного поля  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$ . Показано, что влияние на ПЭ объемного пиннинга доминирует при более низких температурах, а влияние поверхностного пиннинга - при более высоких. Значение  $j_{c,max}$  для кристаллов  $YBa_2Cu_{3-x}Ag_xO_{7-\delta}$  смещается в сторону высоких магнитных полей, что, возможно, связано с наличием дополнительных центров пиннинга создаваемых атомами серебра.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ВТСП-кристаллы  $YBaCuO$ , пик-эффект, пиннинг, крип.

## EVOLUTION OF MAGNETIZATION IN SLIGHTLY DOPED BY SILVER OF TEXTURE YBCO-CRYSTALS

D.A. Lotnyk, R.V. Vovk, A.A. Zavgorodniy, M.A. Obolenskii

Kharkov national university the name V.N. Karazin

Ukraine, 61077, Kharkov, sq. Svobody 4

In present work magnetizations  $M(B)$ -curves in  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  and  $YBa_2Cu_{3-x}Ag_xO_{7-\delta}$  ( $x \approx 0.02$ ) the texture samples are experimentally investigated. There is exists a maximum of magnetization at an intermediate field ("fishtail effect" (FE) was observed in a wide temperature range  $40\text{ K} < T < 75\text{ K}$  at the magnetic field  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$ . It is shown that bulk pinning dominates at low temperatures, while surface barriers dominate at high temperatures. The value  $j_{c,max}$  for  $YBa_2Cu_{3-x}Ag_xO_{7-\delta}$  crystal shifts to the higher values of magnetic field as compared to the undoped one. This behavior, possibly, the created is related to the presence of additional pinning centers by the silver atoms.

**KEY WORDS:** HTSC-crystals  $YBaCuO$ , peak effect, pinning, creep

Починаючи з моменту відкриття високотемпературних надпровідників (ВТНП) багато уваги надається їх технологічному застосуванню при азотних температурах. Одними з багатообіцяючих сполук є  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (YBCO)-матеріали, що зумовлено їх високою критичною температурою (до 93 K) і відносною простотою отримання. При цьому однією з найважливіших умов підвищення технологічності YBCO-матеріалів є збільшення критичної густини струму  $j_c$ . Для досягнення цієї мети в [1] була розроблена MTG (melt-textured growth) технологія вирощування кристалів з дрібнозернистого порошку. Одним з цікавих явищ в MTG-ВТСП сполуках є пик-ефект (ПЕ) [2-4]. У даний час в літературі обговорюються два основні сценарія природи ПЕ. Згідно з першим поява ПЕ зумовлена переходом виду порядок-безпорядок [5-7]. Другий сценарій припускає значний вплив об'ємного піннінгу [2-4]. Згідно з першою концепцією ПЕ існує як на залежності  $j_c-T$  так і на залежності  $j_c-H$ . Згідно з другою - немонотонна залежність існує на кривих  $M(H)$ , тоді як на залежностях  $M(T)$  зустрічається дуже рідко. Інтенсивні дискусії з цього питання продовжуються дотепер.

Для вивчення залежностей  $M(H)$  звичайно використовується класична модель критичного стану Біна. Проте, у разі ВТНП-сполук істотний вплив на намагніченість зразків чинить крип магнітного потоку, що зумовлено їх високими критичними температурами і малими значенням енергії активації  $U$ . При цьому слід враховувати, що поверхневий бар'єр [8], який перешкоджає входу ( $H_{en}$ ) і виходу ( $H_{ex}$ ) вихорів з об'єму надпровідника, також чинить сильний вплив на гістерезис кривих  $M(H)$ . Мета даної роботи – ґрунтуючись на експериментальних даних по вимірюванню залежностей  $M(H)$ , провести дослідження ПЕ в слабо допованих

сріблом MTG-зразках сполуки YBCO з урахуванням конкурентного впливу об'ємного пінінгу і поверхневих бар'єрів.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА І ЗРАЗКИ

MTG-кристали були вирощені по методиці детально описаній в [1]. У роботі були використані два зразка: недопований -  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (S1) і допований сріблом  $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Ag}_x\text{O}_{7-\delta}$  (S2). Параметри експериментальних зразків представлені у таблиці.

| Зразок | $T_c$ , К | $\Delta T_c$ , К | $a(b) \times b(a) \times c$ , мм <sup>3</sup> | m, мг |
|--------|-----------|------------------|---|-------|
| S1     | 90,2-89,8 | 1,0              | $2 \times 1,8 \times 0,7$                     | 12,2  |
| S2     | 91,3-91,1 | 1,5              | $1,7 \times 1,6 \times 0,8$                   | 17,98 |

Табл. 1. Фізичні характеристики експериментальних зразків

Вимірювання польових залежностей магнітного моменту  $M(H)$  у діапазоні температур  $4,2 \text{ K} < T < 85 \text{ K}$  при орієнтації магнітного поля  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$ -вісі проводили за допомогою вібраційного магнітометра з асиметричними вимірювальними котушками в полях  $-6 \text{ T} < H < 6 \text{ T}$ . Для визначення додаткового параметра  $\Delta T_c$ , необхідного для оцінки ступеня гомогенності використовували додаткову пару зразків, вирізаних з тих же моноблоків, що і S1, S2. Транспортні вимірювання проводили на багатофункціональному вимірювальному PPMS-блоці (physical property measurement system).

Експеримент був проведений в два етапи: безпосередньо після відпалювання зразків в атмосфері кисню (240 годин при температурі  $400^\circ\text{C}$ ), а також після витримки протягом шести місяців при кімнатній температурі, у міру повного завершення всіх релаксаційних процесів. Перше значення для  $T_c$  в табл.1 відповідає значенню, одержаному безпосередньо після відпалювання, друге - після шестимісячної витримки кристалів при кімнатних температурах. Той факт, що  $T_c$  для недопованого кристала змінилася незначно від 90,2 до 89,8 К в процесі 6-місячної витримки, а для допованого сріблом кристала - з 91,3 до 91,1 К свідчить про оптимальний режим відпалювання кристалів в атмосфері кисню.

### МОДЕЛЬ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ

У даній роботі дослідна густина критичного струму  $j_c$ , обчислена згідно з формулою [9]:

$$j_c = 2\Delta M \frac{\rho}{a^2(b-a/3)c} \quad (1)$$

де  $\Delta M = M_1(H) - M_2(H)$  ( $M_1(H) > 0$ ,  $M_2(H) < 0$  - відповідні значення магнітного моменту в полі  $H$ ),  $\rho$  - густина кристала,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  - його геометричні розміри. Температурні залежності густини критичного поля  $j_c(T)$  розраховували для мінімального поля  $H = 10 \text{ E}$ . Залежності  $j_c(H)$ , одержані при  $T = 70 \text{ K}$ , показані на рис.1 і рис.2, відповідно. Для ініціалізації наявності піка на  $j_c(H)$ , були побудовані залежності  $dj_c/dH - H$  для кожної температури (наприклад для  $T = 70 \text{ K}$  див. рис. 2). З рис. 1 видно позиції мінімуму (точка А) і максимуму (точка

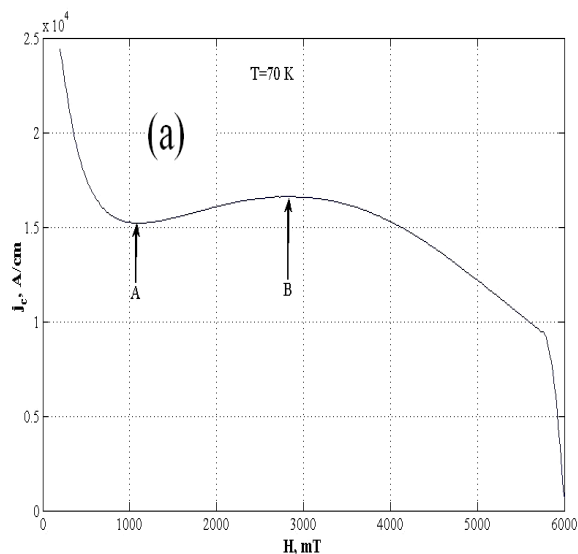


Рис.1. Польові залежності критичної густини струму  $j_c$  для недопованого кристала, виміряні після відпалювання при температурі  $T = 70 \text{ K}$ .

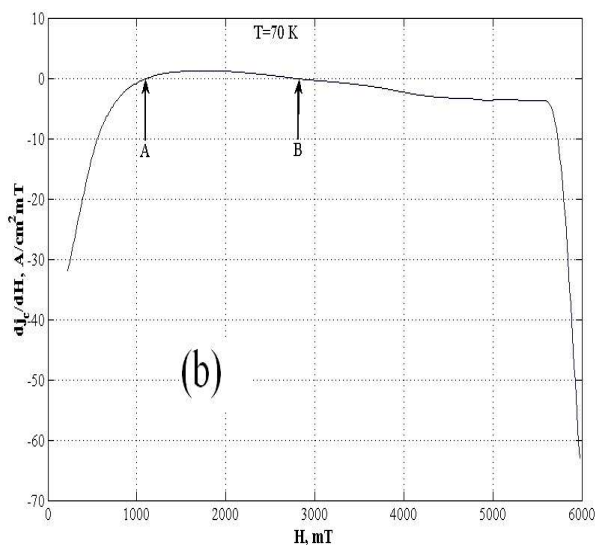


Рис.2. Польові залежності похідної  $dj_c/dH$  (b) для недопованого кристала, виміряні після відпалювання при температурі  $T = 70 \text{ K}$ .

В) на залежності  $j_c(H)$ . Потім було побудована тривимірна поверхня в координатах  $T-H-j_c(H)$ . Проміжні криві визначали методом інтерполяції поліномом 3-го ступеня. На поверхні робили зріз для  $j_c(H)=0$  (рис. 3). На рис. 3 точками А і В показані позиції мінімуму  $j_{c,min}$  і максимуму  $j_{c,max}$  при температурі 70 К. Даний метод дозволяє визначати позицію максимуму  $j_{c,max}$  не тільки для температур, при яких робили вимірювання, але також інтерполувати залежність при проміжних температурах.

**РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ**

Температурні залежності  $j_c(T)$ , розраховані згідно з формулою (1), показані на рис. 4. Видно, що на даних кривих наявність піку не спостерігається, що згідно з [5-7] є достовірним свідченням відсутності в системі фазових переходів виду порядок-безпорядок у вихровій решітці. Таким чином, можна припустити, що поява ПЕ в наших кристалах може бути зумовлена як об'ємним пінінгом, так і поверхневими бар'єрами [10].

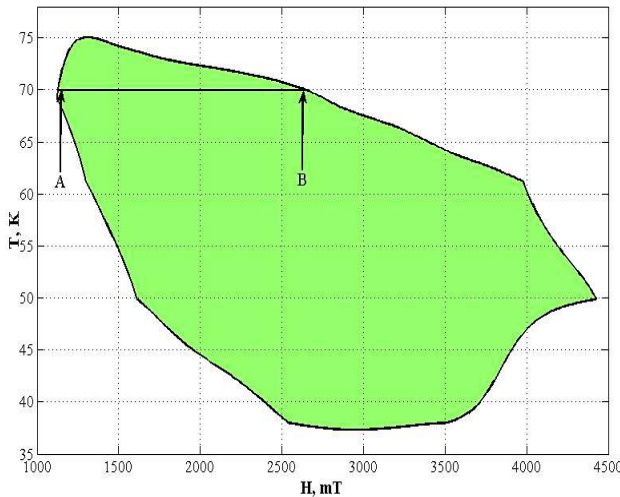


Рис. 3. Зріз поверхні для  $j_c(H)=0$  (точки А і В відповідають точкам А і В на рис. 1).

Ймовірно, пов'язано з наявністю в об'ємі кристала значних механічних напружень, які перешкоджають дифузії, про що свідчить відносно велике значення параметра  $\Delta T_c \approx 1,5$  К (див. табл. 1). Значення максимуму магнітного поля  $H_{max}$  для допованого кристала більше ніж для чистого, що може бути пов'язано з наявністю додаткових центрів пінінгу, сформованих атомами срібла. Зменшення  $H_{max}$  для кривої 3 у порівнянні з кривою 1, ймовірно, може бути пов'язано із зменшенням кількості дислокацій в кристалі, що, у свою чергу, веде до зниження об'ємного потенціалу пінінгу.

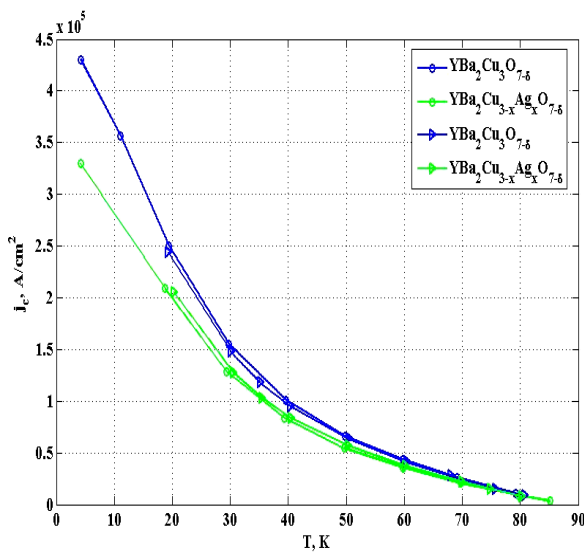


Рис. 4. Температурні залежності густини критичного струму при  $H=0$ . Сині лінії для недопованого кристала, зелені для допованого. Кружками показані результати вимірювань безпосередньо після відпалювання, хрестиками - після шестимісячної витримки.

На основі моделі, описаної вище, були побудовані залежності  $j_{c,max}(H,T)$  (рис. 5). Видно, що в процесі відпалювання для чистого кристала відбувається істотна еволюція як максимального поля (від  $H_{max} \approx 4,2$  Т до 3,8 Т) так і мінімальної температури (від  $T_{min} \approx 38$  К до 47 К) появи ПЕ. Така зміна може бути викликана перерозподілом центрів пінінгу в об'ємі кристала, іншими словами змінюється об'ємний пінінг, тоді як максимальна температура  $T_{max}$  появи ПЕ практично не змінилася, що свідчить про стабільність поверхневих бар'єрів і узгоджується з висновками роботи [10]. При цьому, згідно [10], поверхневі бар'єри чинять найістотніший вплив на ПЕ при більш високих температурах, тоді як об'ємний пінінг - при більш низьких. Для кристала допованого сріблом часової еволюції позиції ПЕ не спостерігається, що,

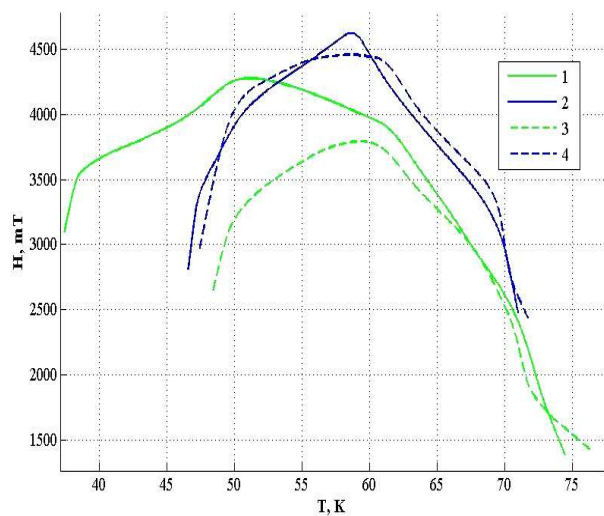


Рис. 5. Температурно-польова залежність  $j_{c,max}$ . Зеленими кривими показані залежності для недопованого кристала, синіми - для допованого. Криві 1 і 2 виміряні безпосередньо після відпалювання; 3,4 - після шестимісячної витримки.

### ВИСНОВКИ

Таким чином, для MTG-YBCO кристалів, досліджених у даній роботі поява ПЕ може бути зумовлена впливом як поверхневих бар'єрів так і об'ємного пінінгу. При цьому для недопованого кристала спостерігається істотне зміщення положення характерної температури  $T_{min}$  в процесі тривалого відпалювання при кімнатній температурі, що може бути пов'язано з перерозподілом лабільних точкових дефектів в об'ємі кристала, тобто зміною об'ємного пінінгу. В той же час температура  $T_{max}$  зміщується незначно, що, ймовірно, пов'язано з незмінністю поверхневих бар'єрів. Для допованого кристала істотних змін  $T_{min}$  і  $T_{max}$  за час витримки при кімнатній температурі не відбулося, що може бути пов'язано з наявністю механічних напружень в зразку, які перешкоджають перерозподілу центрів пінінгу в об'ємі кристала, що також відображається в збільшенні значення параметра  $H_{max}$  у порівнянні з недопованим кристалом.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. S. Jin, T.H. Tiefel, R.C. Sherwood, M.E. Davis, R.B. van Dover, G.W. Kammiott, R.A. Fastnache, H.D. Keith High critical currents in Y-Ba-Cu-O superconductors // Applied Physics Letters. – 1988. - Vol. 52. - P. 2074-2077.
2. M. Muralidhar, N. Sakai, N. Chikumoto, M. Jirsa, T. Machi, M. Nishiyama, Y. Wu, M. Murakami New Type of Vortex Pinning Structure Effective at Very High Magnetic Fields // Physical Review Letters. - 2000. - Vol. 89. - P. 237001 (1-4).
3. M.R. Koblishka and M. Murakami Pinning mechanisms in bulk high- $T_c$  superconductors // Superconductor Science and Technology. - 2000. - Vol. 13. - P. 728-744.
4. M. Muralidhar, M. Jirsa, M. Sakai, M. Murakami Progress in melt-processed (Nd-Sm-Gd)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> superconductors // Superconductor Science and Technology. – 2003. - Vol. - 16. P. R1-R16.
5. W. Henderson, E. Y. Andrei, M. J. Higgins, S. Bhattacharya Metastability and Glassy Behavior of a Driven Flux-Line Lattice// Physical Review Letters. – 1966. - Vol. 77. - P. 2077-2080.
6. Y. Paltiel, E. Zeldov, Y.N. Myasoedov, H. Shtrikman, S.Bhattacharya, M.J. Higgins, Z.L. Xiao, E.Y. Andrei, P.L. Gammel, D.J. Bishop. Dynamic instabilities and memory effects in vortex matter // Nature. - 2000. - Vol. 407. - P. 398-401.
7. Y. Paltiel, E. Zeldov, Y. Myasoedov, M. L. Rappaport, G. Jung, S. Bhattacharya, M. J. Higgins, Z. L. Xiao, E.Y. Andrei, P. L. Gammel, and D. J. Bishop Instabilities and Disorder-Driven First-Order Transition of the Vortex Lattice // Physical Review Letters. - 2000. - Vol. 85. - P. 3712-3715.
8. C. P. Bean and J. D. Livingston. Surface barrier in type-II superconductors // Physical Review Letters. – 1964. - Vol. 12. - P. 14-16.
9. C.P. Bean Magnetization of hard superconductors // Physical Review Letters. – 1962. - Vol. 6. - P. 250-253.
10. L. Zhang, S.Y. Ding, Y.L. Jiao, L. Xiao, X.B. Zhu, Y.P. Sun Influence of inhomogeneity on flux pinning for MTG YBCO bulk // Physica C. – 2006. - Vol. 445-448. - P. 236-239.