

УДК 537.6, 538.945  
PACS 74.25.Qt, 74.72.-h

## ОСОБЛИВОСТІ ДИНАМІКИ ЗАХОПЛЕНИХ МАГНІТНИХ ВИХОРІВ У НАДПРОВІДНИХ ЗРАЗКАХ YBCO

В. Монарха, А. Шабло, В. Тимофеев

*Фізико-технічний інститут низьких температур  
ім. Б. І. Веркіна НАН України  
пр. Леніна, 47, 61103 Харків, Україна  
e-mail: timofeev@ilt.kharkov.ua*

Експериментально досліджено фазові переходи та ізотермічна релаксація магнітного моменту, зумовленого захопленими полями, у надпровідних монокристалах  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ . Охолодження зразків відбувалося в однорідному постійному магнітному полі низької напруженості ( $H \approx 1$  Ое). Встановлено вплив природних дефектів кристалічної структури на особливості надпровідних фазових переходів у таких полях. Виявлено суттєву відмінність ходу релаксації намагніченості від класичної (логарифмічної). Оцінено нормовану швидкість ізотермічної релаксації  $S$ , зумовленої термоактивованим рухом магнітних вихорів з центрів пінінгу, розміщених на односпрямованих межах двійників.

**Ключові слова:** високотемпературний надпровідник, монокристали YBCO, дефект кристалічної структури, динаміка магнітних вихорів.

Експериментальні та теоретичні дослідження впливу природних і штучних дефектів кристалічної структури високотемпературних надпровідних (ВТНП) монокристалічних зразків на магнітні властивості та динаміку абрикосівських вихорів важливі й актуальні для вивчення надпровідного стану твердого тіла [1]. Основна увага у більшості публікацій на цю тему спрямована на пошук механізмів, які регулюють максимальні струменеві спроможності ВТНП у сильних магнітних полях. У цьому разі частина фазової  $H - T$  діаграми надпровідників біля ділянки малих постійних магнітних полів ( $H \leq 1$  Ое) та за температур, близьких до критичної  $T_c$ , залишається найменше дослідженою. У купратних ВТНП зразках ця ділянка характеризується значними термічними флуктуаціями в присутності сильної анізотропії кристалічної структури і, як результат, крипом захоплених та наведених магнітних потоків. Конкуренція між процесами термоактивованого крипу та пінінгу магнітних вихорів на природних дефектах надпровідника (дислокації, границі блоків та двійників) визначає їх динаміку і конче суттєва при розробці надчутливої приймальної електроніки азотного рівня

охолодження (СКВДи, болометри, НВЧ резонатори), оскільки досі немає цілкового розуміння природи надлишкових низькочастотних магнітних шумів у ВТНП.

Метою досліджень було вивчення особливостей пінінгу абрикосівських вихорів та їх зв'язок малої густини у монокристалічних  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (далі у тексті — YBCO) зразках з односпрямованими границями двійникування (ГД). За результатами вимірювання релаксації магнітного моменту зразка, зумовленої захопленими магнітними полями, у рамках моделі Андерсона–Кіма зроблено розрахунки нормованої швидкості  $S$  та проведено оцінку ефективного потенціалу пінінга. Метод безконтактної сквід-магнітометрії, запроваджений для дослідження магнітних властивостей монокристалічних YBCO ВТНП, завдяки своїй високій чутливості дає змогу реєструвати малі зміни (близько  $8 \cdot 10^{-11} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ , або  $8 \cdot 10^{-8} \text{ ему}$ ) магнітного моменту зразка розміром, меншим від 1 мм у слабких постійних магнітних полях (від 0,1 до 2 Ое) [2].

Основними об'єктами досліджень обрано бездомішкові орієнтовані монокристали з оптимальним рівнем насичування киснем, за якого типове значення початку надпровідного фазового переходу у разі охолодження ( $T_c^{onset} \approx T_c$ ) дорівнювало приблизно 90–93 К. Серед них відбирали зразки з мінімальними поверхневими дефектами, в яких границі двійникування проходили крізь усю товщину (0,01–0,03 мм) кристала та були односпрямовані і паралельні до головної кристаліграфічної осі  $c$ . Такі монокристали повністю моделюють блочну структуру тонких плівок та полікристалічних керамічних ВТНП, але у цьому разі вони вільні від впливу дефектів підкладки, інтерфейсу з нею, а також додаткових міжзернових границь.

У купратні високотемпературні надпровідники магнітне поле проникає та захоплюється у вигляді абрикосівських вихорів та їх зв'язок, які закріплюються (пінінують) на різних дефектах кристалічної структури зразка. Під впливом транспортного чи наведеного струму виникає аналог лоренцівської сили, який намагається зірвати вихорі з цих центрів пінінгу. Окрім того, додається ще й термічна активація руху (крип) вихорів, що створює дисипацію. Надпровідник переходить у резистивний стан, магнітний момент зразка починає зменшуватись.

У безконтактних вимірюваннях транспортного струму немає, магнітне поле  $H$  та густина захоплених вихорів ( $\approx \sqrt{H}$ ) малі, а основним джерелом динаміки магнітних потоків є термічні флуктуації. Імовірність депінінга пропорційна до  $\exp(-U/kT)$ , де  $U$  — усереднена глибина ефективного потенціалу пінінгу,  $k$  — стала Больцмана,  $T$  — температура зразка. Рух та перерозподіл вихорів призводить до затухання пов'язаних з ними замкнутих струмів екранування. Як результат, сумарний початковий магнітний момент  $M_0$  зразка зменшується у часі  $M(t)$  за законом, близьким до логарифмічного [3].

Вимірюючи нормовану швидкість ізотермічної релаксації намагніченості зразка  $S(t) = (1/M_0) \cdot dM/d(\ln t)$ , можна експериментально дослідити особливості динаміки магнітних потоків у ВТНП та оцінити ефективну енергію активації крипу, яка дорівнює усередненій глибині потенціалу пінінгу за співвідношенням  $U = kT/S$ . Методика проведення експерименту така.

Досліджуваний зразок за допомогою немагнітного кварцового утримувача розмістили у вимірювальній камері сквід-градієнтометра у середині соленоїда,

який створював потрібне однорідне магнітне поле. Здійснили охолодження та перевід монокристалу у надпровідний стан (метод FC — field cooling). Під дією мейснерівських екрануючих струмів  $I_s$  у зразка з'являвся наведений магнітний момент. Провели вертикальне сканування утримувача уздовж осі камери і соленоїду для оцінки амплітуди сигналу та прив'язки нуля. Далі зразок розташували у положенні максимального зв'язку з антеною сквід-градієнтометра. Встановили задану температуру та провели відключення струму соленоїда. Зареєстрували зміну залишкового магнітного моменту зразка, обумовлену крипом захоплених магнітних потоків (одиначних абрикосівських вихорів та їх зв'язок) протягом однієї години та більше. Потім зразок перемістили вгору для прив'язки нульового рівня сигналу, повернули до попереднього положення та провели його відігрів з переведенням у нормальний (не надпровідний) стан. Після цього процедуру вимірювання релаксації намагніченості за методом FC можна було повторювати для інших обраних значень  $H$  чи  $T$ .

Під час проведення експериментів із різноманітними зразками встановлено, що структура кристалу, а саме, присутність об'ємних чи поверхневих дефектів, блочність, різноспрямованість ГД уздовж товщини зразка істотно відображаються на крутизні та монотонності надпровідного фазового переходу. На рис.1 зображено типову криву фазового переходу одного з досліджених монокристалів і картину захоплених магнітних потоків (умовно). Точність стабілізації та вимірювання температури в експерименті приблизно дорівнює 0,05 К.

Під час вимірювання магнітної релаксації встановлено, що у значному діапазоні температур, коли  $T \ll T_c$ , хід  $M(t)$  для досліджуваних зразків близький до логарифмічного і походить з лінійної за струмом  $I_s$  моделі термоактивованого

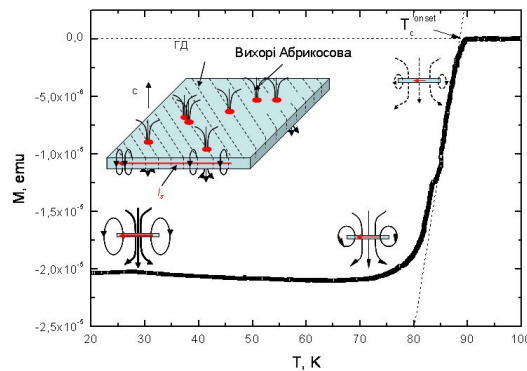


Рис. 1. Типова зміна магнітного моменту, зумовленого захопленими у режимі FC магнітними потоками, дослідженого зразка під час його нагрівання та фазового переходу з надпровідного стану до нормального, не надпровідного. На вставці схематично зображено розподіл наведених та запінкованих на границях двійникування вихорів Абрикосова та орієнтація ГД (горизонтальна пунктирна лінія) відносно головної кристаллографічної осі  $c$ , паралельної до осі соленоїда. Поряд з експериментальною кривою якісно і не в масштабі показана можлива динаміка захоплених та наведених вихорів у зразку

крипу Андерсена–Кіма (рис. 2). Подібні залежності простежували раніше лише у сильних магнітних полях, у добре сформованій вихровій ґратці, коли відштовхувальна взаємодія між вихорами є суттєвою [3].

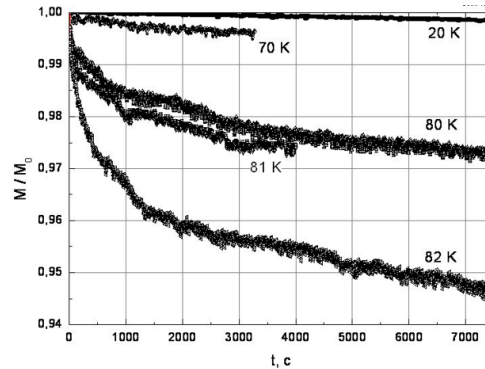


Рис. 2. Релаксація намагніченості ВТНП зразка за різних температур. У цьому діапазоні температур характер зміни  $M(t)$  дуже близький до логарифмічного

Нормована швидкість ізотермічної релаксації намагніченості у цьому діапазоні температур мала ( $0,0005 \leq S \leq 0,006$ ), що свідчить про присутність потужних центрів пінінгу, зумовлених дефектами кристалічної ґратки у ланках ГД зразка. Такі дефекти утворюються за рахунок перерозподілу лабільного кисню, що призводить до порушення оптимального насичення та до локального пригнічування надпровідного параметра порядку. На рис. 3 на прикладі двох значень температури показано методику оцінки  $S$  за експериментальними даними  $M(t)/M_0$ . Нормована швидкість  $S = 0,003$  для  $T = 80$  К і  $S = 0,006$  для  $T = 82$  К.

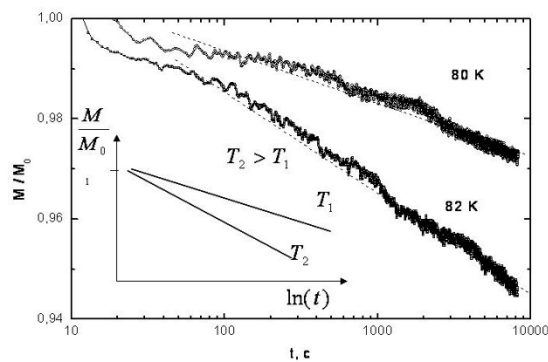


Рис. 3. Методика оцінки  $S$  на прикладі двох вибраних температур за експериментальним вимірюванням зміни намагніченості. Пунктирні прямі проведені через експериментальні данні, на вставці показано очікуваний хід нормованої релаксації згідно з моделлю Андерсона–Кіма

Ділянка сильних термічних флуктуацій поблизу  $T_c$  залишається найменш вивченою у фізиці та техніці ВТНП. За таких відносно високих температур відбувається плавлення вихрової ґратки, вірогідність стрибків окремих вихорів експоненціально зростає, глибина ефективної потенційної ями центрів пінінгу зазнає суттєвих змін. На рис. 4 показано виникнення на кривій магнітної релаксації ділянок з підвищеною швидкістю  $S$ . Квазілогарифмічний хід залежності набуває багатоступінчастого вигляду. Це можна пояснити виникненням випадкових, статистично, за рахунок термічної активації умов переходу від звичайного крипу захоплених магнітних потоків до лавиноподібних перестрибувань у глибші потенційні ями центрів пінінгу, які наявні вздовж ГД. У цьому разі нормована швидкість магнітної релаксації зростає у десятки разів (до  $S = 0,01-0,06$ ). Раніше у монокристалічних зразках з односпрямованими ГД нами при дослідженні локально захоплених магнітних потоків спостерігався перехід від логарифмічного ходу  $M(t)$  до метастабільного режиму з сильними термічними флуктуаціями [4]. Завдяки використанню багатопарового електромагнітного та надпровідного екрану в експериментах повністю вилучений вплив зовнішніх перешкод на процес релаксації намагніченості монокристалів.

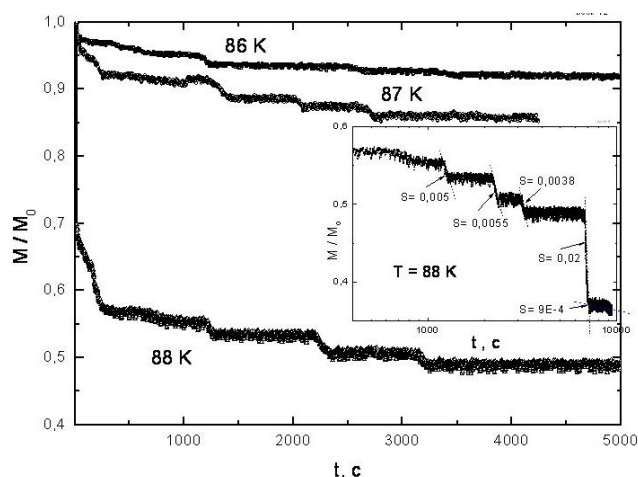


Рис. 4. За температур, близьких до  $T_c$ , хід ізотермічної релаксації помітно різниться від логарифмічного. Для  $T = 88$  К частини  $M(t)$ , де нормована швидкість  $S$  суттєво збільшується, виділені на вставці за допомогою пунктирних прямих

Факт існування виявлених ефектів є важливим як для розуміння механізмів пінінгу одиничних вихорів та їх зв'язок у високотемпературних купратних надпровідниках, так і для пояснення спостережуваних у подібних системах надлишкових низькочастотних шумів, спричинених стрибками захоплених магнітних потоків.

Автори висловлюють подяку доктору фізико-математичних наук А.В. Бондаренко (ННЦ ХФТІ) за надані монокристалічні зразки.

1. *Пан В.М.* Вихревая материя в сверхпроводниках / В.М. Пан, А.В. Пан // Фіз. низьк. темп. – 2001. – Т. 27, № 9–10. – С. 991–1011.
2. *Тимофеев В.П.* О немонотонном температурном ходе намагниченности монокристаллов YBCO в слабых полях / В.П. Тимофеев, А.В. Бондаренко // Фіз. низьк. темп. – 2004. – Т. 30, № 7–8. – С. 810–813.
3. *Yeshurun Y.* Magnetic relaxation in high-temperature superconductors / Y. Yeshurun, A.P. Malozemoff, A. Shaulov // Rev. Mod. Phys. – 1996. – Vol. 68, № 3. – P. 911–949.
4. *Тимофеев В.П.* Динамика захваченных магнитных потоков в монокристаллах YBCO в малых полях / В.П. Тимофеев, А.А. Шабло, В.Ю. Монарха // Фіз. низьк. темп. – 2009. – Т. 35, № 12. – С. 1192–1196.

## FEATURES OF THE TRAPPED MAGNETIC VORTEX DYNAMIC IN SUPERCONDUCTING YBCO SAMPLES

V. Monarkha, A. Shablo, V. Timofeev

*B. Verkin Institute for Low Temperature  
Physics and Engineering of NASU  
Lenin av., 47, 61103 Kharkov, Ukraine  
e-mail: timofeev@ilt.kharkov.ua*

The phase transitions and the isothermal relaxation of magnetic moment due to trapped fields are experimentally investigated for the superconducting  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  single crystals. The samples are cooled in homogeneous low-strength dc magnetic field ( $H \approx 1$  Oe). The influence of natural crystalline-structure defects on the features of superconductive phase transition is revealed for such the fields. An essential difference of the isothermal magnetic relaxation behaviour from the classical (logarithmic) one is found. We estimate the normalized relaxation rate of the isothermal relaxation originated from thermo-activated motion of magnetic vortices out of the pinning centres located at the unidirectional twin boundaries.

**Key words:** high-temperature superconductor, single crystals of YBCO, defect of crystalline structure, magnetic vortex dynamics.

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ЗАХВАЧЕННЫХ МАГНИТНЫХ ВИХРЕЙ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ОБРАЗЦАХ YBCO

В. Монарха, А. Шабло, В. Тимофеев

*Физико-технический институт низких температур  
им. Б. И. Веркина НАН Украины  
пр. Ленина, 47, 61103 Харьков, Украина  
e-mail: timofeev@ilt.kharkov.ua*

Экспериментально исследованы фазовые переходы и изотермическая релаксация магнитного момента, обусловленного захваченными полями, в сверхпроводящих монокристаллах  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . Охлаждение образцов осуществлялось в однородном постоянном магнитном поле низкой напряженности ( $H \approx 1$  Ое). Установлено влияние естественных дефектов кристаллической структуры на особенности сверхпроводящих фазовых переходов в таких полях. Выявлено существенное отличие хода релаксации намагниченности от классического (логарифмического). Оценена нормированная скорость изотермической релаксации  $S$ , обусловленной термоактивированным движением магнитных вихрей из центров пиннинга, размещенных на однонаправленных границах двойников.

**Ключевые слова:** высокотемпературный сверхпроводник, монокристаллы YBCO, дефект кристаллической структуры, динамика магнитных вихрей.

Статтю отримано: 4.07.2011  
Прийнято до друку: 14.07.2011