

Усредненный эффективный потенциал пиннинга в YBCO-монокристаллах вблизи T_c

В.Ю. Монарха, А.Г. Сиваков, В.П. Тимофеев

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

Статья поступила в редакцию 16 мая 2014 г., опубликована онлайн 21 июля 2014 г.

Впервые проведены экспериментальные исследования динамики магнитных потоков, захваченных в постоянных слабых полях (порядка земного), в монокристаллических YBCO-образцах с однонаправленными границами двойникования в области температур вблизи T_c ($0,8 < T/T_c < 0,99$). Показано присутствие сильного пиннинга на этой системе однонаправленных плоскостных дефектов и установлена существенная немонотонность поведения усредненного эффективного потенциала пиннинга $U_p(T)$ магнитных потоков малой плотности. Для сравнения различных методик оценки плотности критического тока (J_c) получены зависимости ширины петли намагничивания $M(H)$, связанные с эффективным пиннингом и J_c , а также проведены резистивные измерения на микромостиках из тех же монокристаллов.

Вперше проведено експериментальні дослідження динаміки магнітних потоків, захоплених у сталих слабких полях (порядку земного), у монокристалічних YBCO-зразках з односпрямованими межами двійникування в межах температур поблизу T_c ($0,8 < T/T_c < 0,99$). Показано присутність сильного пінінгу у системі цих односпрямованих площинних дефектів та встановлено суттєву немонотонність поведінки усередненого ефективного потенціалу пінінгу $U_p(T)$ магнітних потоків малої густини. Для порівняння різних методик оцінки густини критичного струму (J_c) отримано залежності ширини петлі намагніченості $M(H)$, пов'язані з ефективним пінінгом та J_c , а також проведено резистивні вимірювання на мікромістках з тих самих монокристалів.

PACS: 74.72.-h Купратные сверхпроводники.

Ключевые слова: монокристаллы $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, пиннинг, вихри Абрикосова, релаксация намагниченности, критический ток.

1. Основное число публикаций по исследованию динамики магнитных потоков в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) сконцентрировано на выяснении процессов трансформации вихревой решетки и ее взаимодействий с кристаллической структурой образцов, определяющих предельные токнесущие характеристики сверхпроводников в сильных магнитных полях [1,2]. Область малых постоянных полей порядка земного и диапазон температур, близких к критической (T_c), остаются наименее изученными. При магнитометрических измерениях это обусловлено падением сигналов отклика, которые пропорциональны прикладываемому полю, и возрастанием шумов, вызванных значительными термическими флуктуациями в этом интервале температур. Несмотря на огромное количество теоретических и экспериментальных работ по

изучению структуры и динамики магнитных потоков в ВТСП, до сегодняшнего дня отсутствует полная картина сложных и взаимосвязанных процессов пиннинга и крипа [3].

Движение захваченных магнитных потоков, связанное с крипом и скачками одиночных вихрей и их связей, зависит от пиннинга на структурных дефектах образцов и определяется энергией термоактивации этих метастабильных процессов. Вероятность прыжков магнитных вихрей растет экспоненциально с увеличением температуры и уменьшением силы пиннинга, поэтому микроструктура ВТСП материала, формирующая рельеф потенциала пиннинга, играет решающую роль в динамике магнитных потоков и возникновении диссипативных процессов.

В настоящем сообщении приводятся результаты исследований особенностей поведения пиннинга магнитных потоков малой плотности с помощью измерений изотермической релаксации намагниченности $M(t)$ беспримесных монокристаллических образцов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) вблизи области сверхпроводящего фазового перехода. Используя полученные результаты и применяя известные модельные соотношения, проведена оценка эффективного потенциала пиннинга (U_p), его зависимости от температуры. В области $0,8 < T/T_c < 0,99$ установлена существенная немонотонность падения усредненного эффективного потенциала с ростом T , что может отражать конкурирующее воздействие процессов трансформации глубины потенциала центров пиннинга и возрастание крипа в ВТСП с приближением температуры к T_c .

2. В качестве объекта исследований выбраны ориентированные монокристаллы YBCO оптимального насыщения кислородом с размерами порядка 1×1 мм (по осям a и b) и толщиной (вдоль оси c) $\sim 0,02$ мм, у которых однонаправленные границы двойникования (ГД) ориентированы параллельно оси c кристалла по всей его толщине. Примененный бесконтактный сквид-магнитометрический метод измерения магнитного момента обеспечивает необходимую чувствительность $\approx 8 \cdot 10^{-11}$ А·м². При этом стабильность выбранной в эксперименте температуры исследуемого образца ≈ 5 мК в диапазоне 50–95 К.

Остаточный магнитный момент обусловлен захваченными при охлаждении в режиме FC (field cooling) полями в объеме образца, при этом роль приповерхностных энергетических барьеров в динамике магнитных потоков минимальна [1,2]. Термоактивированный крип отдельных вихрей и их связок приводит к перераспределению и затуханию сверхтоков, усредненная намагниченность M сверхпроводящего образца начинает релаксировать [2].

Данные по исследованию динамики магнитных потоков в сверхпроводниках используются для получения важнейших параметров пиннинга вихрей в ВТСП, а именно усредненной эффективной глубины потенциала пиннинга (U_p). При этом в простейшем случае ее можно оценить из расчета нормированной скорости изотермической релаксации намагниченности S , которая в линейной модели Андерсона–Кима связана с U_p соотношением

$$S = 1/M_0 (dM/d\ln t) = -kT/U_p. \quad (1)$$

Большинство из опубликованных исследований релаксации намагниченности ВТСП проводились в сильных магнитных полях (порядка нескольких кЭ), когда существенную роль играют процессы взаимодействия в жесткой, хорошо сформированной решетке магнитных вихрей, а параметры пиннинга определяются межвихревым взаимодействием.

3. На рис. 1(а) для некоторых температур приведены кривые изотермической релаксации намагниченности исследованного монокристалла, нормированные на начальное значение M_0 , вблизи сверхпроводящего фазового перехода ($T_c^{\text{onset}} = 92,8$ К). При $T \rightarrow T_c$ сильные термические флуктуации вызывают гигантский крип вихрей и их связок, фактически наблюдается состояние вихревой жидкости. В исследованном образце при температуре 91,4 К регистрируется падение остаточной намагниченности до нуля, полный выход захваченных потоков. Магнитное поле соленоида в эксперименте направлено вдоль оси c монокристалла и по величине равно 160 А/м (≈ 2 Э). При такой ориентации поле параллельно плоскостям ГД кристалла и наиболее эффективно осуществляется пиннинг абрикосовских вихрей. На вставке схематично и не в масштабе показана геометрия и особенности кристаллической струк-

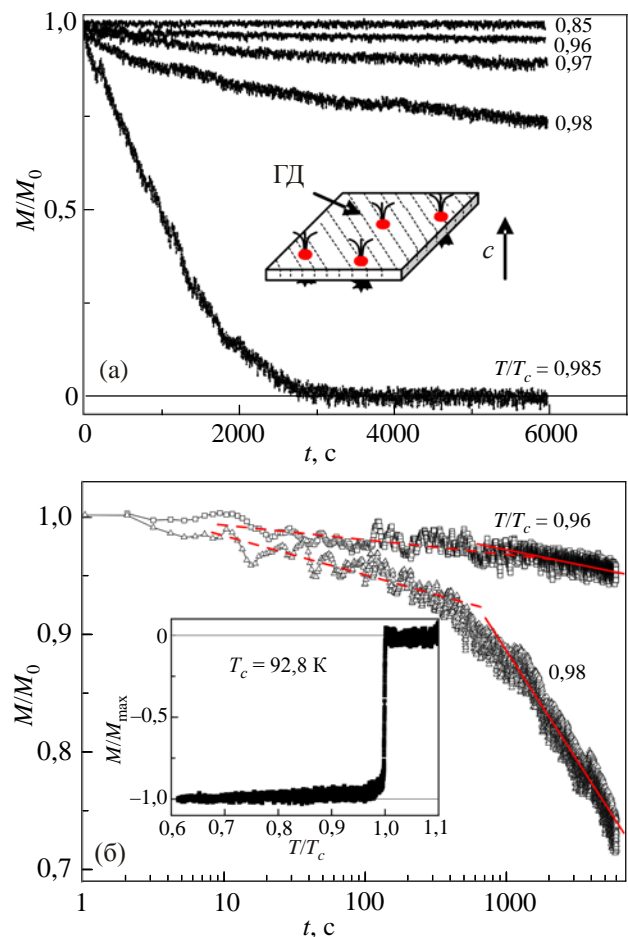


Рис. 1. (а) Типичные кривые изотермической релаксации нормированной намагниченности $M(t)/M_0$ одного из исследованных YBCO-монокристаллов с однонаправленными границами двойникования при нескольких температурах. На вставке схематично показана геометрия образца и захваченные вихри. (б) Экспериментальные данные $M(t)/M_0$, построенные в полупологарифмическом масштабе, и методика оценки U_p с помощью линейной модели. Для иллюстрации на вставке показан сверхпроводящий фазовый переход исследованного образца.

туры типичного исследуемого образца, запиннигованные на ГД абрикосовские вихри. На рис. 1(б) полученные данные для двух экспериментальных температур приведены в полулогарифмических координатах. Штриховыми линиями на кривых показана методика расчета S по соотношению (1) в двух временных интервалах. На вставке приведена нормированная температурная зависимость M/M_{\max} — диамагнитный отклик в области сверхпроводящего фазового перехода монокристаллического образца.

Границы двойников включают слои CuO_x , содержащие вакансии кислорода, и расположенные вдоль их плоскостей дислокации локально подавляют сверхпроводящий параметр порядка, приводя к возникновению эффективных центров пиннинга. По результатам измерений изотермической релаксации намагниченности с помощью соотношения (1) проведена оценка усредненного по объему образца эффективного потенциала пиннинга и его зависимость от температуры (рис. 2(а)). По сравнению с известными ранее данными, опубликованными, например, в работах [2,4], этот диапазон температур впервые исследован так подробно и установлены новые закономерности. Во-первых, наблюдается существенный рост абсолютной величины эффективного потенциала пиннинга, достигающего десятков эВ на начальном участке исследованного диапазона температур. Во-вторых, прослеживается существенная немонотонность зависимости $U_p(T)$, которую уже нельзя связать с перестройкой структуры вихревой решетки [5].

Рост абсолютной величины U_p , который зарегистрирован в наших экспериментах, может быть связан с малоисследованной зависимостью потенциала пиннинга от магнитного поля и наведенных токов в образце [6]. Малые постоянные поля и, следовательно, малая плотность захваченных магнитных потоков позволили исследовать начальный участок зависимости $U_p(H, J)$, где в нелинейной модели предполагается наличие максимума [1,2]. Наблюдаемое немонотонное уменьшение эффективного пиннинга при приближении температуры к T_c может быть связано, с одной стороны, с конкурирующими процессами роста энергии термоактивации крипа и, с другой стороны, с возрастанием глубины потенциала центров пиннинга на кристаллографических дефектах ВТСП и возможным возникновением локальных нормальных фаз на границах двойникования.

Плотность критического тока J_c , которая связана с усредненным значением потенциала пиннинга U_p , является важным параметром ВТСП материала. Оценка величины J_c может быть проведена как с помощью контактных резистивных, так и бесконтактных магнитометрических методов. Для сравнения зависимостей $U_p(T)$, установленных нами по регистрации изотермической релаксации намагниченности, были проведены

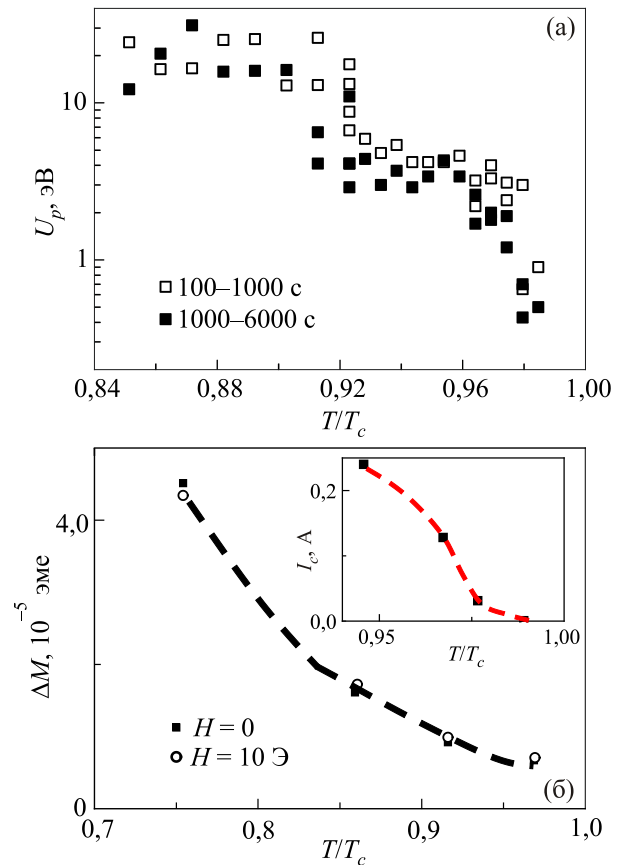


Рис. 2. (а) Поведение усредненного эффективного потенциала пиннинга от температуры (экспериментальные точки, соответствующие различным временным окнам, в пределах которых производилась оценка U_p , указаны на рисунке пустыми и заполненными квадратами). (б) Зависимость ширины петли намагниченности ΔM , пропорциональной усредненной силе пиннинга, от нормированной температуры вблизи области малых полей. На вставке показаны результаты резистивных измерений критического тока для того же YBCO-монокристалла.

измерения ширины петель намагничивания $M(H)$ исследованного образца, которая пропорциональна эффективной силе пиннинга [2]. На рис. 2(б) полученные значения ширины петли $\Delta M(T/T_c)$ сопоставлены с данными резистивных измерений критического тока микромостика, вырезанного из того же монокристалла. Как видно на рис. 2, в исследованном диапазоне температур полученные тремя различными методами оценки поведения критического тока от температуры YBCO-монокристалла качественно совпадают.

Заключение

Впервые проведены исследования динамики магнитных потоков, захваченных в постоянных слабых полях, в монокристаллических YBCO-образцах с однонаправленными границами двойникования в области температур вблизи T_c . Показано присутствие сильного пиннинга на системе однонаправленных плоскостных

дефектов, связанных с наличием границ двойникового-ния, и установлена существенная немонотонность по-ведения усредненного эффективного потенциала пин-нинга $U_p(T)$ магнитных потоков малой плотности.

Авторы благодарят кафедру физики низких темпе-ратур ХНУ им. В.Н. Каразина за предоставленные об-разцы, а Ю.А. Савину за участие в экспериментах.

1. G. Blatter, M.V. Feigel'man, V.B. Geshkenbein, A.I. Larkin, and V.M. Vinokur, *Rev. Mod. Phys.* **66**, 1125 (1994).
2. Y. Yeshurun, A.P. Malozemoff, and A. Shaulov, *Rev. Mod. Phys.* **68**, 911 (1996).
3. P.B. Вовк, М.А. Оболенский, А.А. Завгородний, А.В. Бондаренко, М.Г. Ревякина, *ФНТ* **33**, 546 (2007) [*Low Temp. Phys.* **33**, 408 (2007)]; M. Vanevic, Z. Radovic, and Vladimir G. Kogan, *Phys. Rev. B* **87**, 144501 (2013).
4. D. Miu, L. Miu, G. Jakob, and H. Adrian, *Physica C* **460–462**, 1243 (2007).
5. А.В. Бондаренко, А.А. Продан, М.А. Оболенский, P.B. Вовк, Т.Р. Ароури, *ФНТ* **27**, 463 (2001) [*Low Temp. Phys.* **27**, 339 (2001)]; В.П. Тимофеев, А.А. Шабло, В.Ю. Монарха, *ФНТ* **35**, 1192 (2009) [*Low Temp. Phys.* **35**, 926 (2009)].
6. I.L. Landau and H.R. Ott, *Phys. Rev. B* **63**, 184516 (2001).

Averaged effective pinning potential in YBCO single crystals near T_c

V.Yu. Monarkha, A.G. Sivakov, and V.P. Timofeev

The dynamics of magnetic flux trapped in low magnetic fields (~ 1 Oe) was studied for the first time on YBCO single crystal samples with unidirectional twin boundaries. The temperature range chosen was close to T_c ($0.8 < T/T_c < 0.99$). It is found that there is a strong pinning in the system of unidirectional planar defects, and a significant deviation from the monotone behavior of the averaged effective pinning potential $U_p(T)$ for low density trapped flux. In order to compare different methods of J_c determination, the magnetization loops $M(H)$ were obtained, and the microbridge resistive measurements on the same samples were carried out.

PASC: **74.72.-h** Cuprate superconductors.

Keywords: $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ single crystals, pinning, Abrikosov vortices, magnetization relaxation, critical current.