

УДК 538.95+945

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ВИХРЕВОЙ СИСТЕМЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ МАГНИТНЫХ ЛАВИН

В. Ф. Русаков, В. В. Чабаненко*, С. В. Васильев*, А. Набьялек**, Е. И. Кучук

*Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины, г. Донецк

**Institute of Physics, PAS, Warsaw, Poland

В работе проанализирована динамика структуры индукции на поверхности ниобиевых дисков в ранее опубликованных магнитооптических исследованиях. Это позволило выделить отдельные этапы лавинного процесса и понять физические причины сложного преобразования магнитного поля на поверхности сверхпроводника. Построены простые модели, отражающие динамику преобразования профиля магнитной индукции при вхождении магнитного потока, в частности, понять причины возникновения «парамагнитных» областей. Наблюдаемые в магнитооптике особенности хорошо коррелируют с нашими исследованиями динамических лавинных явлений в жестких сверхпроводниках с помощью индуктивных методов и датчиков Холла.

Ключевые слова: жесткий сверхпроводник, критическое состояние, критический ток, смешанное состояние, лавина магнитного потока.

Введение. Движение вихревых систем в сверхпроводниках проявляет разнообразное динамическое поведение, в частности, при высоких скоростях фронта магнитного потока, которые реализуются при развитии термомагнитных неустойчивостей [1-4]. Например, в ниобиевых дисках при гелиевых температурах, была получена информация о движении фронта магнитного потока (т.е. границы между диамагнитным и смешанным состоянием) и пространственным распределением магнитного поля, индуцированного лавиной на поверхности сверхпроводника. Осцилляционный характер скорости движения фронта магнитного потока в Nb и NbZr дисках был обнаружен в нашей работе [5].

Обычно магнитодинамика жестких сверхпроводников изучается с помощью контактных, холловских, индуктивных, акустических измерений, а также магнитооптических методов [6]. Регистрируются гигантские осциллирующие импульсы магнитной индукции, затухающие осцилляции и резкие изменения в ультразвуковом поглощении. В работе [7] с помощью датчиков Холла мы наблюдали на поверхности сверхпроводника области, в которых величины индукции магнитного поля (т.е. поля в образце), превышает индукцию внешнего магнитного поля. В дальнейшем будем называть такие области «парамагнитными». Инверсию профиля магнитной индукции и парамагнитные участки поверхности сверхпроводника в результате термомагнитных лавин, мы экспериментально наблюдали в ниобий титановой пластине [7]. В этой работе был также предложен механизм возникновения таких областей, и сделан оценочный расчет. Он показал принципиальную возможность возникновения областей на поверхности сверхпроводника, в которых индукция будет превышать внешнее магнитное поле. Для более глубокого понимания электромагнитных процессов, сопровождающих лавинную динамику магнитного потока и механизмов возникновения парамагнитных областей, нами проанализированы результаты магнитооптической визуализации термомагнитных лавин.

Настоящая работа посвящена детальному анализу распределения магнитного поля на поверхности диска в процессе лавинного проникновения магнитного потока в сверхпроводящий образец. Целью работы является установление физических причин трансформации диамагнитных областей в парамагнитные.

Экспериментальный метод и образцы. В ранних работах периода 1960-70 годов была успешно использована высокоскоростная кинокамера для изучения динамики магнитного потока [3,4], связанного с термомагнитными лавинами в жестких сверхпроводниках II рода. Для съемки быстропротекающих процессов авторы [4] использовали камеру Fastax типа WF – 15 и 16 миллиметровую пленку с небольшой чувствительностью около 50ASA. Фотографии с номерами 1 – 6 процесса проникновения магнитного поля в сверхпроводящий диск на рис.1 были получены киносъемкой с частотой, примерно, 10^4 кадр/сек. Вначале диск был охлажден без магнитного поля (ZFC) до сверхпроводящего состояния. Когда камера выходила на стационарный скоростной режим, к образцу прикладывалось магнитное поле, которое возрастало от нуля со скоростью около 2 килоэрстед в секунду. Ниобиевый диск был толщиной 1,87 мм и диаметром 13 мм. Величина критического тока J_c была оценена авторами из ширины пояса a , в который проникает магнитное поле (фото 1 на рис. 1). Для критического состояния критический ток определяется соотношением: $dV/dx=J_c$. С учетом размагничивающего фактора n , эта связь будет иметь вид [4]: $J_c=H_c/4\pi(1-n)a$. Отсюда была получена оценка величины критического тока для диска $J_c=21$ кАсм⁻².

Результаты. Левая часть рис.1 показывает фотографии поверхности сверхпроводящего диска в последовательные моменты времени. На снимках видно, как последовательно зарождаются и распространяются три лавины магнитного потока. На рис. 1, b представлены распределения магнитного поля в образце в направлениях, указанных стрелками на соответствующих фотографиях левой части этого рисунка. Представляет интерес анализ величины производной индукции dV/dx на фронте лавины в динами-

ческом процессе, Эта величина характеризует критический ток, обтекающий область, занятую лавиной. Установлено, что с точностью 15% производная остается постоянной. Отсюда можно сделать вывод о постоянстве критического тока в рассматриваемом процессе. Относительно большая погрешность связана со слабой четкостью фотографий.

По яркости области, занятой лавиной, можно судить о величине индукции магнитного поля в ней. Нижний ряд рис. 1 представляет фотографию и распределение индукции после входа трех лавин. Выпуклый характер индукции каждой из трех лавин, свидетельствует о парамагнитном направлении круговых токов, ограничивающих лавины. Наличие максимумов индукции, расположенных приблизительно в центре областей, занятых вошедшим потоком, позволяет утверждать, что магнитное поле, в области занятой лавиной, самое большое на поверхности сверхпроводника, т.е. налицо парамагнитные области. Следует в тоже время заметить, что магнитооптика различает только компоненту магнитного поля в направлении перпендикулярном к поверхности диска.

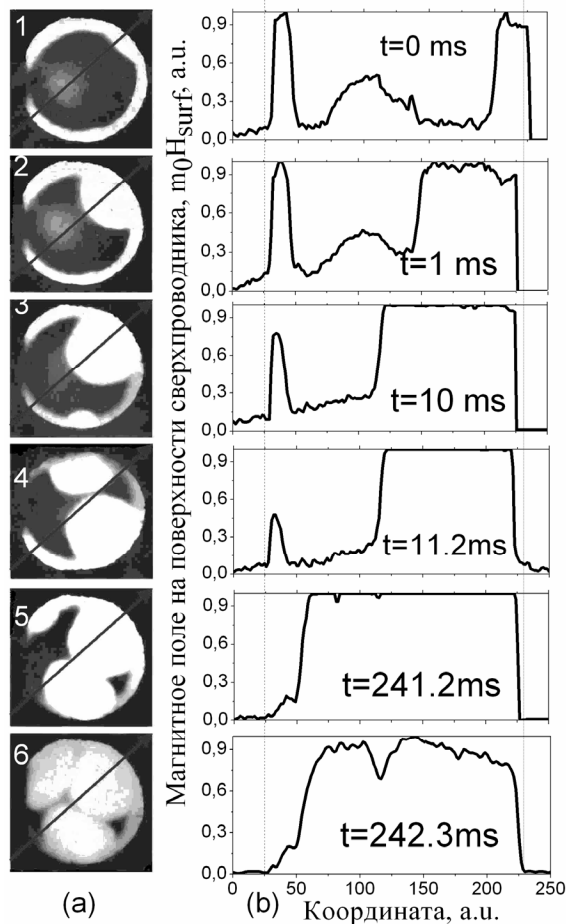


Рис. 1. а) Магнитооптические изображения распределения магнитной индукции в ниобиевом диске при температуре $T=1.86\text{K}$ взятые из работы [4], диаметр диска 13 мм, толщина 0.2 мм. Магнитное поле приложено перпендикулярно поверхности образца и возрастало от 0.08Т (первая фотография) до 0.132Т (шестая фотография). б) – профиль магнитной индукции в направлении, показанном стрелкой на левой части рисунка. t – временной интервал между снимками.

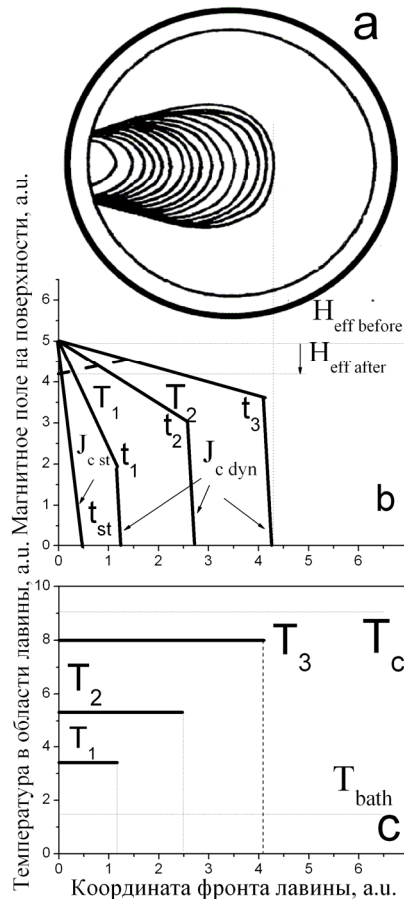


Рис. 2. а) – схема образца с лавиной потока; в) – динамика распределения магнитного поля и с) – температуры в области лавины для разных моментов времени T_1 , T_2 и T_3 ; $H_{\text{eff before}}$ – эффективное магнитное поле у поверхности сверхпроводника перед и $H_{\text{eff after}}$ – после лавины магнитного потока. T_c и T_{bath} – температуры, соответственно, критическая и окружающей среды; J_c – критический ток перед лавиной.

Рассмотрим физические причины, влияющие на формирование профиля индукции на поверхности диска и возможный механизм возникновения парамагнитных областей. Внешнее кольцо вблизи поверхности диска (рис. 2, а) представляет область неоднородного смешанного состояния, в которой перед возникновением лавины течет критический диамагнитный ток J_{cst} . Соответствующее этому току распределение индукции показано на рис. 2б. В центре диска (рис. 2, а) мы видим последовательные положения фронта потока в процессе развития термомагнитной неустойчивости. Как следует из предыдущих рассуждений, рис. 1, в процессе лавины градиент индукции на ее фронте свидетельствует о наличии кольцевого тока парамагнитного направления, ограничивающего расширяющиеся области. Возможное изменение профиля индукции в последовательные моменты времени t_1 , t_2 , t_3 представлены на рис. 2, б. Возникаю-

щий излом профиля связан с локальным увеличением температуры, приводящим к уменьшению в этой области критического тока. Это соответствует уменьшению наклона профиля индукции. Дальнейший вход потока в моменты t_2 , t_3 и соответствующий рост температуры, вследствие дальнейшего разогрева области и трансформация профиля индукции показаны на рис. 2, б и рис. 2, с

Другой механизм, влияющий на преобразование профиля магнитного поля, связан с изменением размагничивающего фактора диска. Эффективное поле на поверхности образца складывается из внешнего поля и поля размагничивания. В процессе вхождения лавины увеличивается область смешанного состояния и при этом уменьшается размагничивающий фактор. Количественную оценку изменения размагничивающего фактора провести достаточно сложно, однако можно утверждать, что уменьшение поля размагничивания приводит к уменьшению эффективного поля на поверхности образца после вхождения лавины. Таким образом, вследствие уменьшения эффективного поля вблизи поверхности, возникает излом индукции, показанный пунктиром на рис. 2, б для последней стадии лавины (момент t_3). Следует заметить, что температура разогрева образца в процессе развития неустойчивости остается ниже критической T_c и пиннинг определяет формирование части профиля помеченного пунктиром. Учитывая вышеприведенные рассуждения можно понять формирование выпуклого профиля индукции, возникающего в результате термомагнитной лавины, как показано на нижней фотографии 6, на рис. 1, а. При этом максимум индукции (парамагнитные области) будет находиться в центральной части вошедшего потока.

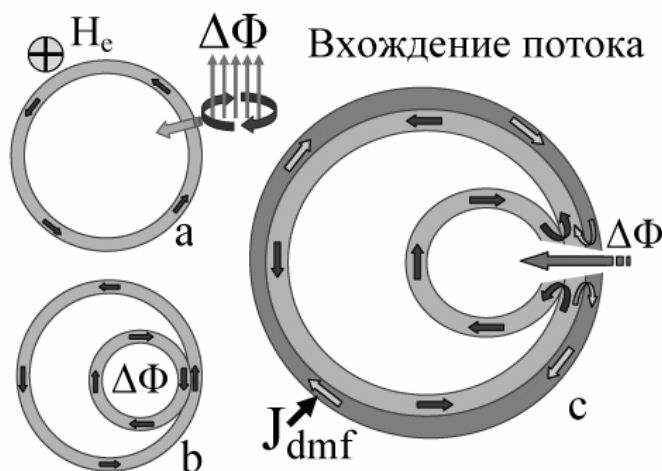


Рис.3. Схема токовых контуров в сверхпроводящем диске а) – перед и б) – после лавины магнитного потока $\Delta\Phi$; в) – результирующая картинка токов при учете уменьшения размагничивающего фактора при вхождении лавины; ΔJ_{dmf} – соответствующая изменению фактора размагничивания добавка к экранирующему току.

Схематически трансформация токов в процессе лавины потока в образце представлена на рис. 3. В исходном сверхпроводящем состоянии, рис. 3а, по периметру образца, в слое толщиной a течет экранирующий диамагнитный ток, величина которого равна критическому току. Направление внешнего магнитного поля показано на рисунке. В результате развития термомагнитной неустойчивости в образец входит магнитный поток $\Delta\Phi$, образуется смешанное состояние, по границе которого (фронт лавины магнитного потока) также течет критический ток, направление этого тока противоположно экранирующему диамагнитному току (рис. 3б). Этот ток можно назвать парамагнитным. Если принять, что в модели критического состояния его величина равна критическому току, то он может создать внутри контура магнитное поле, превышающее на 10-15% эффективное поле у поверхности сверхпроводника [7], определяя тем самым парамагнетизм этой области. На границе образца диамагнитный и парамагнитный токи компенсируются, определяя распределение индукции в этой области близкое к однородному. Выравниванию градиентов индукции способствует также и локальный разогрев, связанный с диссипативными токами, которые генерируются движущимся потоком $\Delta\Phi$. Через эту область легко проникает дополнительный магнитный поток, увеличивая часть образца, занятую смешанным состоянием. Возможные изменения направления токов в такой модели показаны на рис.3, в. На этом же рисунке в темном кольце на границе образца показана добавка к экранирующему току ΔJ_{dmf} , обусловленная уменьшением фактора размагничивания в результате вхождения лавины, что приводит к уменьшению эффективного поля на поверхности диска.

Выводы. Проанализированы динамика фронта лавины потока и наклон профиля индукции магнитного поля на фронте лавины. Показано, что угол наклона индукции магнитного поля, т.е. критический ток на фронте лавины практически не изменяется в процессе ее движения. Обнаружены генерация замкнутых токов и локальное повышение индукции магнитного поля по сравнению с внешним магнитным полем в области движения лавины. Предложен простой механизм, объясняющий возникновение таких областей.

РЕЗЮМЕ

В роботі проаналізовано динаміку структури індукції на поверхні ніобієвих дисків у раніше опублікованих магнітооптичних дослідженнях. Це дозволило виділити окремі етапи лавинного процесу й зрозуміти фізичні причини складного перетворення магнітного поля на поверхні надпровідника. Побудовано прості моделі, що відображають динаміку перетворення профілю магнітної індукції при входженні магнітного потоку, зокрема, зрозуміти причини виникнення «парамагнітних» областей. Спостережувані в магнітооптиці особливості добре корелюють із нашими дослідженнями динамічних лавинних явищ у жорстких надпровідниках виконаних за допомогою індуктивних методів і датчиків Холу.

Ключові слова: жорсткий надпровідник, критичний стан, критичний струм, змішаний стан, лавина магнітного потоку.

SUMMARY

We have analyzed the dynamics of the induction structure on the surface of Nb disks at thermomagnetic avalanches in magneto-optical investigations published earlier. We were allowed to separate the stages of avalanche process and to understand physical reasons for complex transformation of magnetic field on the surface of a superconductor. Simple models have been built that depict the dynamics of transformation of magnetic induction profile at the magnetic flux penetration. In particular, the reasons of the rise of “paramagnetic mountains” were established as well as other peculiarities of avalanche motion of magnetic flux. The observed magneto-optical features agreed with the results of our investigations of dynamic avalanche phenomena in hard superconductors by means of induction methods and Hall’s probe.

Keywords: hard superconductor, critical state, critical current, mixed state, magnetic flux avalanche.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Минц Р. Г. Неустойчивости в сверхпроводниках / Р. Г. Минц, А. Л. Рахманов. – М.: Наука, 1984. – 251 с.
2. Nucleation and growth of a flux instability in superconducting $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ films / P. Leiderer, J. Boneberg, P. Brull, et al. // Phys. Rev. Lett. – 1993. – Vol. 71. – P. 2646-2649.
3. Wertheimer M. R. Flux jumps in type II superconductors / M. R. Wertheimer, J. G. Gilchrist // J. Phys. Chem. Solids. – 1967. – Vol. 28. – P. 2509-2524.
4. Goodman B. B. Un appareil pour l'étude de la cinétique des sauts de flux des supraconducteurs de la deuxième espèce / B. B. Goodman, A. Lacey, M. R. Wertheimer // C. R. Acad. Sc. Paris. – 1966. – Vol. 262. – P. 12-15.
5. Русаков В. Ф. Анализ движения вихревой системы в жестких сверхпроводниках второго рода по результатам магнітооптического изучения лавин магнітного потока / В. Ф. Русаков, В. В. Чабаненко, С. Васильев // Вісник Донецького університету. Сер. А. Природничі науки – 2007. – Вип. 2. – С. 132-135.
6. Magneto-optical studies of current distributions in high- T_c superconductors / Ch. Jooss, J. Albrecht, H. Kuhn et al. // Rep. Prog. Phys. – 2002. – Vol. 65. – P. 651–788.
7. The reversal of the local magnetic field profile at the surface of superconducting sample caused by the thermomagnetic avalanche / A. Nabialek, V. Chabanenko, S. Vasiliev et al. // Journal of Low Temperature Physics. – 2009. – Vol. 154. – P. 55-67.

Поступила в редакцію 25.05.2010 г.