

8. Можаяев А.П. Фазовая стабильность и диффузия кислорода в $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ ($R=Y, \text{Nd}$) / А.П.Можаяев, Г.Н.Мазо, А.А.Галкин, Н.В. Храмова // Журн. неорганической химии. — 1996. — Т.41, № 6. — С. 916–920.

9. Приседський В.В. Два типи слабо зв'язаного кисню в купраті барію-ітрію, легovanому самарієм / В.В. Приседський, Н.В.Маркова, І.О.Удодов, О.І.Волкова // Вопросы химии и химической технологии. — 2011. — № 5. — С. 396–401.

Надійшла до редколегії 30.01.2012.

© Маркова Н.В., Приседский В.В., 2012

УДК 538.95+945

В.Ф. Русаков¹, В.В. Чабаненко², С.В. Васильев², А. Nabiałek³, Е.И. Кучук²
(¹Донецкий национальный университет, Донецк, Украина, ²Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины, Донецк, Украина, ³Institute of Physics, Polish Academy of Sciences al. Lotników 32/46, 02-668 Warsaw, Poland)

ЭКРАНИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА НИОБИЙ-ТИТАНОВОГО СПЛАВА

В работе изучены свойства экрана для магнитного поля из ниобий-титанового сплава. Показано, что прозрачность стенки начинается гораздо раньше, чем достигается поле полного проникновения, в поле H_{ps} , при этом индукция внутри экрана начинает медленно возрастать. Несмотря на такую прозрачность, наблюдается дополнительно пять лавин магнитного потока в противоречие модельным представлениям. Количество наблюдаемых лавин в возрастающем поле вдвое меньше, чем в убывающем, что, по-видимому, обусловлено меньшей величиной потока, выходящего в процессе каждой лавины в режиме его захвата.

Ключевые слова: ниобий-титановый сплав, сверхпроводник второго рода, сверхпроводящий экран, намагниченность, термомагнитная неустойчивость, лавина магнитного потока.

В роботі вивчено властивості екрана для магнітного поля з ніобій-титанового сплаву. Показано, що прозорість його стінки починається значно раніше, ніж досягається поле повного проникнення, у полі H_{ps} , при цьому індукція всередині екрану починає повільно зростати. Не зважаючи на таку прозорість, додатково спостерігається п'ять лавин магнітного потоку, у протиріччі з модельними уявленнями. Кількість лавин, що спостерігаються у наростаючому полі вдвічі менша, ніж в убываючому, що, можливо, обумовлено меншою величиною потоку, що виходить у процесі кожної лавини в режимі його захвату.

Ключові слова: ніобій-титановий сплав, надпровідник другого роду, надпровідний екран, намагніченість, термомагнітна нестійкість, лавина магнітного потоку.

Введение

Экранирование внешнего магнитного поля — одно из основных свойств сверхпроводника, наряду с бездиссипативным транспортом электрической энергии. Исследование возможностей экранирования имеет богатую историю, начиная с 60 годов прошлого столетия [1] вплоть до нашего времени [2]. В тоже время ряд важнейших вопросов остался открытым. Например, обнаруженные в 1964 г. неустойчивости потока в сверхпроводящих экранах [1], связанные с термомагнитными лавинами, продолжают в области полей,

где с точки зрения модельных представлений [3] их быть не должно. Это связано со сложностью происходящих процессов, их быстротечностью (тысячные доли секунды), сложностью постановки эксперимента (сильные магнитные поля, высокоразрешающая аппаратура). Мы реализовали комплексный подход к изучению явления проникновения поля в сверхпроводящий экран. Он включает как квазистатические исследования магнитных свойств, так и изучение динамики потока при термомагнитных лавинах. При этом использованы разнообразные датчики с различной

их локализацией на сверхпроводящем объекте. В результате были установлены новые особенности этого явления, позволяющие продвигнуться дальше в понимании сложного явления экранирования магнитного поля.

Экспериментальные результаты

В работе использована методика индукционных исследований экстремальной динамики вихревой структуры и датчики Холла для исследований петель перемагничивания экрана. Индукционными датчиками исследованы явления, связанные с вхождением магнитного потока в полый цилиндр (экран), вследствие термомагнитных неустойчивостей [4]. Во всем диапазоне магнитных полей, где возникают лавины (0–9 Тесла) нами проанализирована структура лавин магнитного потока, зависимость величины вошедшего магнитного потока $\Phi(t)$ от поля и температуры, выяснена роль магнитной предыстории, включая роль переменного по направлению магнитного поля. Геометрия эксперимента представлена на вставке в рисунок. Две наружные катушки индуктивности регистрируют магнитный поток, вошедший в образец, в различных его сечениях. Внутренние катушки регистрируют магнитный поток, вошедший в экранирующую полость. Сигналы с соответствующих катушек, представленные на рисунке 1, показывают, что величина магнитного потока, входящего в стенки экрана в результате развития лавины, значительно превышает величину потока вошедшего в отверстие. Вхождение потока во внутреннюю полость обозначает, что лавинные процессы разрушают экранирующие свойства сверхпроводника. Также видно, что длительность термомагнитных лавин в объеме образца, значительно превышает длительность аналогичных процессов в его полости. Измерения проводились с помощью скоростного осциллогра-

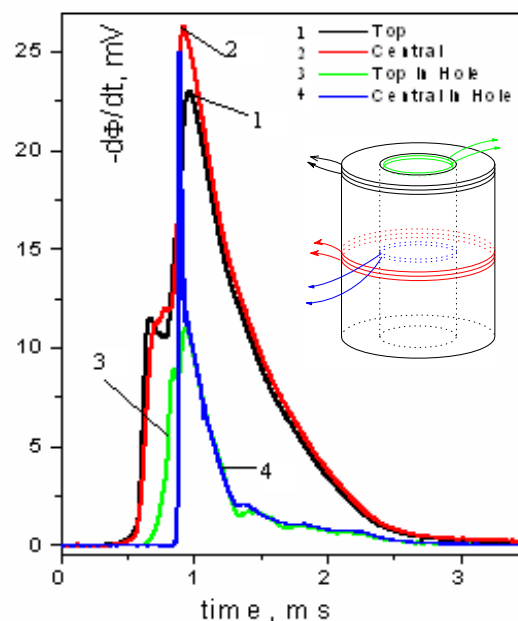


Рис. 1. Вхождение магнитного потока в цилиндрический экран

фа с памятью и самописца неустановившихся процессов. Предложенная геометрия эксперимента позволяет проводить одновременную регистрацию распространения лавин по боковой поверхности экрана и в различных его сечениях. Полученные временные зависимости напряжения на индуктивных датчиках позволяют рассчитать скорости распространения лавин в различных направлениях. Исследовано влияние захваченного в процессе перемагничивания магнитного потока на лавинную динамику в экране.

1 Структура скачков магнитного потока в экране

Рассмотрим пространственные и временные характеристики проникновения магнитного потока в полые цилиндры (экраны) из жестких сверхпроводников второго рода в процессе развития термомагнитных лавин [5]. В эксперименте внешнее магнитное поле прикладывалось вдоль оси трубки, поле в ее центре измерялось с помощью датчика Холла [6,7]. Магнитный момент образца, определялся индуцированным в стенке трубки критическим током. Различные катушки, расположенные на цилиндре и внутри

него, как указано выше, измеряли поле в стенках цилиндра и в его полости (интегральный метод) [8].

Типичная петля гистерезиса намагниченности, полученная этим методом при температуре 4,2 К представлена на рис. 2. Изменения полного магнитного потока в экране из NbTi ($D=14\text{mm}$, $d=5\text{mm}$) в процессе разви-

тия скачков потока, показаны на рис. 2, вокруг петли гистерезиса. На рисунке хорошо видно, что наиболее сложную структуру имеют лавины, возникающие в области перемагничивания, когда поле меняет знак, что обусловлено магнитной предысторией.

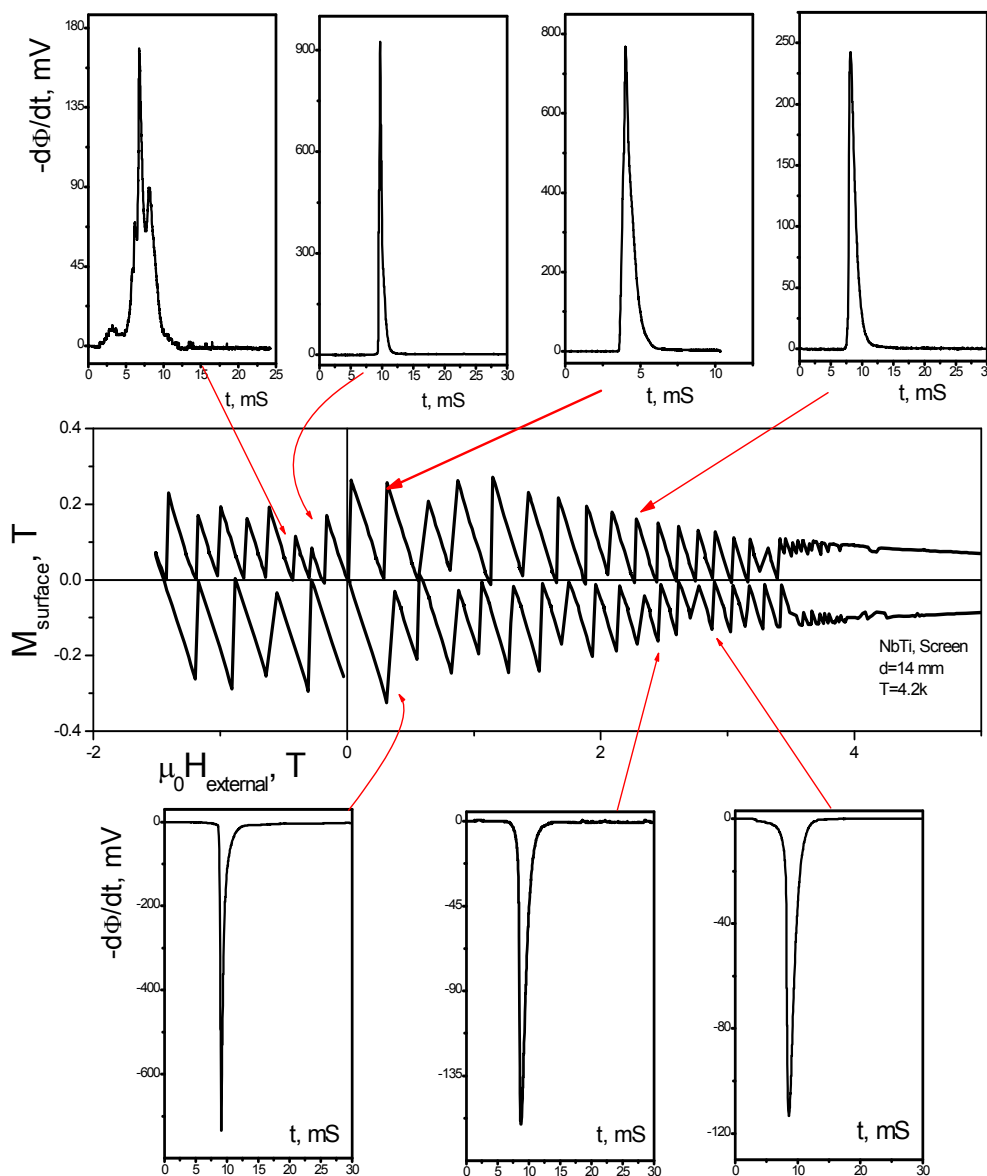


Рис. 2. Петля гистерезиса намагниченности и сигналы с измерительной катушки на образце в процессе последовательных скачков потока при $T=4,2\text{ K}$

Зависимость магнитного потока, пересекающего внешнюю и внутреннюю стенки экрана от времени, измеренного катушками, расположенными на внешней поверхности и в

полости экрана, отнормированного в области насыщения — основной рис. 3 и с реальными значениями потока — на вставке.

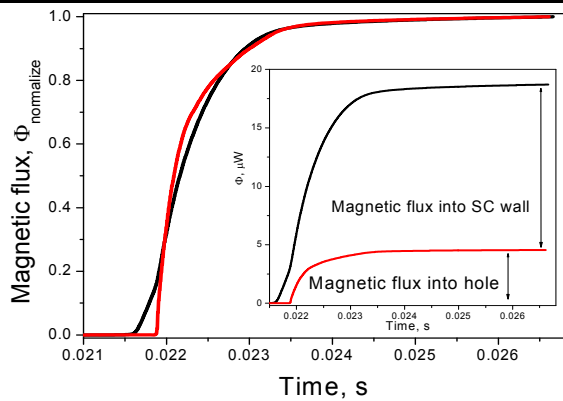


Рис.3. Зависимость магнитного потока, пересекающего внешнюю и внутреннюю стенку экрана от времени

Из рисунка хорошо видно, что величина потока, вошедшего в экранируемую полость, значительно меньше (более чем в 4 раза), чем величина потока вошедшего в стенки экрана.

2 Экранирующие свойства полых цилиндров

В соответствии с рис. 4, при температуре 2 К по мере увеличения от нуля внешнего магнитного поля сверхпроводящий экран идеально экранирует вплоть до первого скачка магнитного поля (лавины).

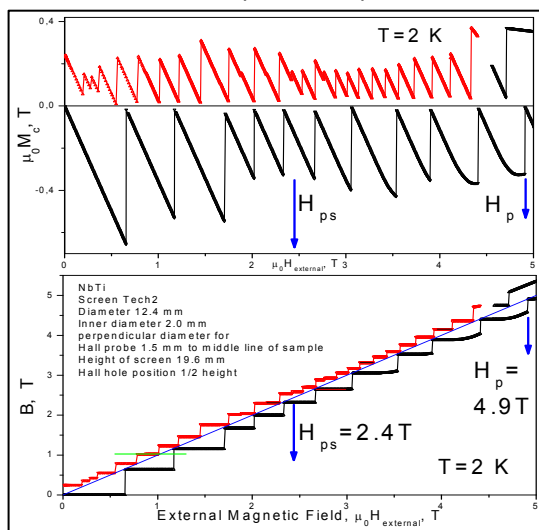


Рис. 4. а) петля гистерезиса намагниченности, б) поле в центре цилиндрической полости как функция внешнего магнитного поля $T=2$ К

Т.е. в пределах чувствительности используемой аппаратуры имеем горизонтальную прямую линию на зависимости индукции от внешнего магнитного поля.

Затем, в результате лавины, наступает термомагнитный пробой стенки экрана, и поток входит внутрь. При этом индукция внутри экрана сравнивается со значением внешнего поля, при котором произошел скачок потока. Локальный нагрев стенки в результате лавинной динамики потока быстро исчезает, и сверхпроводящее экранирование восстанавливается и сохраняется при дальнейшем увеличении поля вплоть до возникновения второй лавины потока. После второго скачка идеальное экранирование восстанавливается. Такое поведение сверхпроводящего экрана с толстыми стенками соответствует теоретическим представлениям Випфа и должно наблюдаться вплоть до поля полного проникновения H_p , при котором стенка становится прозрачной для внешнего магнитного поля. В то же время, как показывает эксперимент, прозрачность стенки начинается гораздо раньше, в поле H_{ps} , при этом индукция внутри экрана начинает медленно возрастать. Несмотря на такую прозрачность, дополнительно наблюдается пять лавин магнитного потока в противоречие модельным представлениям. Причем, на четвертой лавине уже отчетливо видно макроскопическое протекание стенок экрана.

Подобное же поведение свойств сверхпроводящего экрана наблюдается и в случае захвата магнитного потока стенками трубки при уменьшении внешнего магнитного поля. Выход потока (вытекание) наблюдается гораздо раньше, чем реально стенки становятся прозрачными.

При увеличении температуры до 4,2 К отмеченные выше особенности экранирующих свойств сохраняются. Результаты представлены на рис. 5.

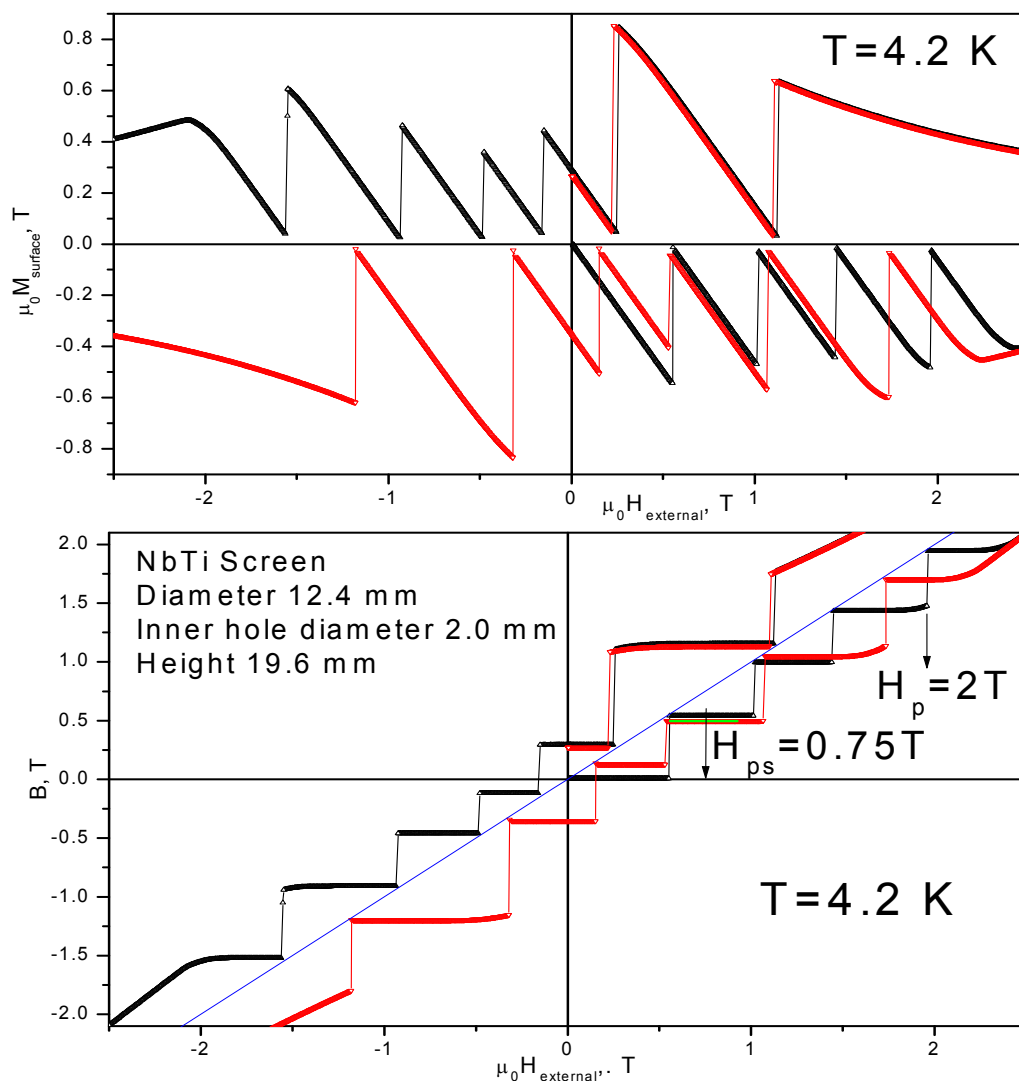


Рис. 5. а) петля гистерезиса намагненности, б) поле в центре цилиндрической полости как функция внешнего магнитного поля, $T=4,2 \text{ K}$

Вторым удивительным фактом эксперимента при температуре 2 K является соотношение количества лавин при увеличении поля (режим экранирования) и при его уменьшении (режим захвата потока). Количество наблюдаемых лавин в возрастающем поле вдвое меньше, чем в убывающем, что, по-видимому, обусловлено меньшей величиной потока, выходящего в режиме его захвата. Для сплошного цилиндра количество лавин при входе и выходе магнитного потока сохраняется.

К числу возможных причин, приводящих к преждевременной прозрачности стенок экрана, может быть отнесено возникновение локальных

областей с пониженными токопроводящими (а, следовательно, и экранирующими) свойствами в результате лавин магнитного потока.

Анализ магнитооптических данных [Wertheimer] показал, что лавины потока могут занимать значительные по размеру области бывшего мейснеровского состояния. В этих областях фактически реализуется смешанное состояние с индукцией магнитного поля, практически совпадающей с магнитным полем, в котором происходила неустойчивость. Как видно из рисунка 5 — это величины масштаба $0,5 \text{ тесла}$. Эти поля могут локально понижать критический ток. Поскольку индукция в отверстии

сравнивается с внешним магнитным полем, то области возникшего смешанного состояния накрывают внутреннее отверстие экрана (рис. 4, 5). Следовательно, эти области могут являться теми слабоэкранирующими (протекающими) мостиками, обеспечивающими преждевременное нарастание индукции внутри экрана. Высказанные предположения требуют дополнительного анализа и численных оценок.

Выводы

По результатам исследования экрана из NbTi можно сделать следующие выводы.

Эксперимент показывает, прозрачность стенки начинается гораздо раньше, чем достигается поле полно-

го проникновения, в поле H_{ps} , при этом индукция внутри экрана начинает медленно возрастать. Несмотря на такую прозрачность, наблюдается дополнительно пять лавин магнитного потока в противоречие модельным представлениям. Причем, на четвертой лавине уже отчетливо видно макроскопическое протекание стенок экрана. Объяснение этого факта требует дополнительного исследования.

Количество наблюдаемых лавин в возрастающем поле вдвое меньше, чем в убывающем, что, по видимому, обусловлено меньшей величиной потока, выходящего в процессе каждой лавины в режиме его захвата.

Список использованной литературы

1. Hecht R. Study of properties of High Fields Superconductors at Elevated Temperatures / R. Hecht, C.M. Harper // Report N NASA-CR-67157. — 1965. — № 65. — С. 34464.
2. Olsen A.A.F. Flux dendrites of opposite polarity in superconducting MgB2 rings observed with magneto-optical imaging / A.A.F. Olsen, T.H. Johansen, D. Shantsev // Phys. Rev. B. — 2006. — Vol. 74. — P. 064506-1–064506-6.
3. Wipf S.L. Magnetic instabilities in type-II superconductors / S.L. Wipf // Phys.Rev. — 1967. — Vol. 161. — P. 404–416.
4. Русаков В.Ф. Экранирующие свойства полых сверхпроводящих цилиндров / В.Ф. Русаков, В.В. Чабаненко, С.В. Васильев // Матеріали наукової конференції професорсько-викладацького складу, наукових співробітників і аспірантів Донецького національного університету за підсумками науко-дослідної роботи за період 2009-2010 рр. — 2011. — Т. 1. — С. 118–119.
5. Altshuler E. Colloquium: Experiments in vortex avalanches / E. Altshuler, T.H. Johansen // Rev. Mod. Phys. — 2004. — Vol. 76. — P. 471–487.
6. Kim Y.B. Magnetization and critical supercurrents / Y.B. Kim, C.F. Hempsted, A.R. Strnad // Phys. Rev. — 1963. — Vol. 129. — P. 528–535.
7. Gandolfo D.A. Steady-state flux jumping in superconducting niobium titanium tubes in superimposed A.C. and D.C. magnetic fields / D.A. Gandolfo, L. Dubeck, F. Rothwarf // Journ. Appl. Phys. — 1969. — Vol. 40. — P. 2066–2070.
8. Wischmeyer C.R. Spatial variation of flux motion in hard superconductors / C.R. Wischmeyer // Phys. Lett. — 1965. — Vol. 19. — P. 543–545.

Надійшла до редколегії 23.01.2012.

© Русаков В.Ф., Чабаненко В.В.,
Васильев С.В., Набіатек А., Кучук Е.И., 2012