

УДК 538.95+945

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СВЕРХПРОВОДНИКЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕРМОМАГНИТНЫХ ЛАВИН В РЕЖИМЕ ЗАХВАТА МАГНИТНОГО ПОТОКА**

В. Ф. Русаков, В. В. Чабаненко\*, С. В. Васильев\*, I. S. Abalyosheva\*\*, A. Nabialek\*\*, E. И. Кучук\*

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

\*\*Institute of Physics, Polish Academy of Sciences al. Lotników 32/46, 02-668 Warsaw, Poland

На основе результатов магнитооптического исследования термомангнитных неустойчивостей в жестких сверхпроводниках второго рода проведено изучение распределения индукции магнитного поля на поверхности сверхпроводящего диска, возникающее в результате последовательного выхода лавин магнитного потока. Показано, что при уменьшении внешнего магнитного поля до нуля в образце возникают, так называемые, мейснеровские полости. Величина локального тока (обусловленная  $z$  – компонентой магнитного поля), протекающего на границе области вышедшего потока, практически одинакова для всех исследованных лавин.

*Ключевые слова:* жесткий сверхпроводник второго рода, критический ток, магнитная визуализация, мейснеровская полость, лавина магнитного потока.

**Введение.** В работах [1 – 2] рассмотрено преобразование индукции магнитного поля на поверхности однородных и неоднородных жестких сверхпроводников второго рода в результате термомангнитных лавин. Лавинное проникновение магнитного потока происходило в режиме экранирования внешнего магнитного поля, т.е. в случае, когда после охлаждения сверхпроводника в нулевом магнитном поле (ZFC режим) оно нарастало от нуля вплоть до критического значения – поля первого скачка потока. Экспериментальные данные были получены с использованием магнитооптической техники, описанной в работах [3, 4].

Анализ магнитооптических изображений позволил охарактеризовать особенности процесса динамики потока на поверхности сверхпроводников. Лавинная динамика магнитного потока приводит к возникновению сильных локальных пространственных неоднородностей в распределении магнитного поля и температуры в объеме сверхпроводника. Неоднородность распределения магнитного поля на поверхности образца, характеризуется на фотографиях неравномерностью освещенности соответствующих областей. Результатом лавинного вхождения потока в образец, стало возникновение пальцеобразной структуры (объемные сверхпроводники), либо дендритной структуры (сверхпроводящие диски и пленки). Условия формирования и особенности структуры возникших полей индукции в пальцеобразных структурах исследованы в работе [5]. Образование выпуклых поверхностей индукции в результате лавин, выявленных на магнитооптических фотографиях, находится в хорошем соответствии, например, с обнаруженной нами инверсией профиля распределения индукции в объемных сверхпроводниках с помощью линейки датчиков Холла [6].

Другим важным фактом нашего анализа динамики процесса, выявленным из результатов скоростной киносъемки, было выделение двух этапов в процессе лавинообразного проникновения потока [1]. При вхождении магнитного потока в образец лавины зарождаются на границе мейснеровского состояния. На первом этапе происходит формирование области проникновения магнитного поля с фиксацией ее границы (замораживание фронта лавины). На втором этапе происходит заполнение этой области магнитным потоком и его перераспределение. В результате внутри возникшего магнитного «пятна» может наблюдаться как однородное, так и неоднородное перераспределение магнитной индукции. Неоднородное проникновение потока в сформированную лавинную область возникает в результате того, что абрикосовские вихри могут проникать в образец по ослабленной (с точки зрения пиннинга), разогретой в результате диссипативных процессов области лавинного пятна. Эти разогретые области формируют «русло», по которому и втекает магнитный поток. Исследование показало, что это «русло» располагается, как правило, по границе области мейснеровского состояния, а магнитное давление внешнего поля обуславливает его повышенную концентрацию и выпуклый профиль [1]. И наконец, установлено, что магнитный поток, входящий в образец в результате последующих лавин, не пересекает границы области, сформированной предыдущей лавиной.

В представленной работе исследовано преобразование индукции магнитного поля, захваченного в сверхпроводнике магнитного потока (*режим захвата*) в результате процесса лавинного его выхода при термомангнитных лавинах. Проанализированные нами магнитооптические данные получены в работе [7].

**Эксперимент.** Эксперимент проводился следующим образом. Образец, имеющий критическую температуру  $T_c=9\text{K}$ , переводился в сверхпроводящее состояние и охлаждался до  $1.83\text{K}$ . При этой температуре вводилось магнитное поле до величины, превышающей значение второго критического поля. Это поле переводило образец в нормальное состояние, обеспечивая однородное распределение магнитной ин-

дукции по материалу. Затем поле выключалось, т.е. падало до нуля. При этом магнитный поток в образце захватывался сверхпроводящими токами. Конфигурация профиля индукции при такой последовательности действий имеет максимальное значение магнитной индукции в центре образца, которая затем спадает до нуля вблизи границы диска. Если воспользоваться классическим механическим аналогом термомагнитной лавины, то можно сказать, что профиль магнитной индукции в образце аналогичен профилю песчаной горки. Когда наклон горки песка достигает критического, она разрушается (рассыпается) лавинным образом в виде потока скатывающихся песчинок. Аналогично, при определенном значении градиента индукции магнитного поля в образце, возникают термомагнитные лавины выхода магнитного потока.

Магнитооптические исследования результатов лавинной динамики выполнены на ниобиевых дисках различной толщины – 0.03 мм и 1 мм и одинакового диаметра 13 мм [7]. Использованная в этой работе экспериментальная техника позволяла изучать распределение магнитного поля в образце одновременно на обеих поверхностях дисков. Картина полей индукции на обеих поверхностях образца имеет подобную, но не одинаковую структуру. Это дает возможность анализировать распределение поля, установившееся в объеме образца. Отличие размеров областей, возникших в результате выхода потока на противоположных поверхностях диска, свидетельствует о наличии в некоторых местах диска не только перпендикулярной к поверхности компоненты магнитного поля (только ее может фиксировать магнитооптика), но и компоненты, лежащей в плоскости диска.

**Результаты анализа данных магнитооптики.** На рис. 1 в нижнем правом углу представлена оригинальная фотография из работы [7]. На ней показано распределение магнитного поля на поверхности

образца после выхода нескольких (6-7) лавин. Каждой лавине соответствует дуга, расположенная по периметру диска. Эта дуга ограничивает область вышедшего потока. Белые стрелки, проведенные через центр дуг, указывают направления, вдоль которых выполнен анализ интенсивности освещенности фотографии. Цифрами указаны номера лавин для идентификации с построенными кривыми распределений. Вверху на графике показаны кривые распределение освещенности, как функции расстояния от границы образца. На каждой кривой определены области, наиболее быстрого изменения освещенности, т.е., где производная максимальна. Производная в этой области  $dV_z/dr$  определяет величину локального тока (обусловленного  $z$  – компонентой магнитного поля), протекающего на границе области захваченного потока. Наклон этих прямых, сформированный процессом срыва потока при термомагнитной неустойчивости, близок по величине для всех исследованных лавин. В то же время площади лавин, существенно (на порядок) отличаются (рис. 1). Если предположить, что величина вышедшего, в процессе лавины, потока пропорциональна площади образца, из которой вышел поток, то можно сделать вывод, что критическая величина локального тока по границе лавинного пятна не зависит от величины вышедшего потока. В то же время структура индукции магнитного поля, внутри возникшей впадины, изменяется немонотонным образом (ламина 1). На формирование этой структуры оказывает влияние изменение температуры (разогрев) внутри впадины магнитной индукции. С увеличением количества вышедшего потока температура этой области значительно возрастает вследствие диссипации (разогрева образца движущимися вихрями). Отличие температур внутри области сверхпроводника, из которой вышел поток, для разных номеров лавин и определяет различие структур индукции.

В теоретической работе [8] показано, что в ситуации уменьшения поля до нуля после режима захвата потока, вблизи боковой поверхности сверхпроводящего диска существует область, в которой силовые линии магнитного поля замкнуты и, как следствие, в этой области образуются кольцевые вихри Абрикосова. Образование таких областей является следствием влияния поля размагничивания, поскольку при уменьшении внешнего магнитного поля до нуля, из-за захваченного магнитного потока поле на границе диска оказывается обратно направлению магнитного поля в его центре. Изменение картины силовых линий магнитного поля при выходе магнитного потока из сверхпроводящего диска в случае уменьшения внешнего поля показано на рис. 2, а. Здесь рассмотрены конфигурации линий индукции при трех

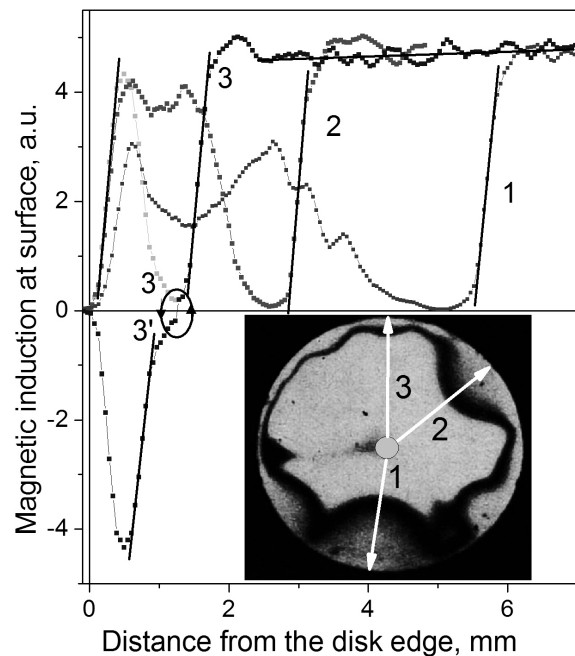


Рис. 1. Профили магнитной индукции в ниобиевом диске в направлениях, указанных стрелками на магнитооптическом изображении; диаметр диска 13мм, толщина 1 мм. Внизу показано магнитооптическое изображение распределения магнитной индукции при температуре  $T=1.8K$  [7]

значениях внешнего поля  $H_0$ :  $H_0=0.5H_p$ ,  $0.25H_p$  и в нулевом поле. Величина внешнего поля нормируется на поле полного проникновения  $H_p$  (поле, в котором вихри проникают до центра образца). Возникновение областей с противоположным направлением индукции вблизи края диска хорошо видно для ситуации, когда внешнее поле равно нулю (рис. 2, б). Здесь также отчетливо видно образование замкнутых силовых линий. В образце совокупность таких линий образует тороидальную полость, называемую мейсснеровской полостью [8]. Схема образования и расположения мейсснеровской полости в пластине сверхпроводника второго рода прямоугольной формы изображена на рис. 2б. Экспериментальное наблюдение таких тороидальных областей в монокристалле YBaCuO при квазистатическом проникновении поля представлено в работах [9,10].

Учитывая вышеприведенные рассуждения, мы на графике для третьей лавины изменили знак индукции (кривая 3') вблизи поверхности, как показано на рис. 1. Тогда в районе нулевого значения индукции силовая линия может замкнуться, образовав внутри диска подобную тороидальную область. Если обратиться к фотографии (рис. 1), то темная извилистая полоса вдоль боковой поверхности диска, сформированная лавинами, представляет мейсснеровскую полость, сформированную лавинным выходом потока.

Следует отметить тот факт, что для лавин в направлении 1 и 2 на рис.1 эта область оказывается весьма широкой, что несколько противоречит статическим расчетам Брандта о проникновении поля в сверхпроводящий диск. Образование таких областей с нулевой осевой индукцией можно объяснить с помощью гипотезы об аннигиляции пар вихрь-антивихрь. Захваченный поток в центре образца направлен вдоль оси z, по мере уменьшения внешнего поля из-за имеющегося захваченного потока поле на границе образца оказывается меньше внешнего и при некоторой величине внешнего поля (отличной от нуля), на границе сверхпроводника поле обращается в нуль. По мере дальнейшего уменьшения поля на границе появляется магнитное поле обратного знака, что приводит к вхождению в сверхпроводник вихрей Абрикосова с обратной ориентацией (антивихрей). Таким образом, в образце возникает граница раздела между захваченными вихрями и антивихрями. Сила взаимодействия между вихрем и антивихрем является силой притяжения, что приводит к их аннигиляции с выделением тепла. Этот процесс порождает локальный разогрев и снижение силы пиннинга и, как следствие, повышает подвижность вихрей и антивихрей в области границы их раздела, что способствует процессу их аннигиляции. В результате такого процесса возможно образование безвихревых областей в сверхпроводящем диске. Подобные явления наблюдались на масштабах в несколько миллиметров в сверхпроводящих пленках YBaCuO [11].

**Выводы.** На основе анализа экспериментальных результатов магнитооптического исследования термомагнитных неустойчивостей в жестких сверхпроводниках второго рода построено распределение индукции магнитного поля на поверхности сверхпроводящего диска, возникшее в результате нескольких последовательных лавин, связанных с выходом магнитного потока. Из представленного анализа следует, что темная извилистая полоса вдоль боковой поверхности диска, сформированная лавинами, может представлять замкнутую тороидальную мейсснеровскую полость, ранее предсказанную в [8], либо область аннигилировавших пар вихрь – антивихрь.

Установлено, что величина локального тока (обусловленная z – компонентой магнитного поля), протекающего на границе области вышедшего потока, практически одинакова для всех исследованных лавин, т.е. не зависит от величины этого потока. Структура поля индукции в магнитной «впадине» для разных лавин сильно отличается, в отдельных случаях она сложная, с регулярными немонотонностями. Эти отличия могут быть связаны с различной температурой локального разогрева вследствие диссипативных процессов при лавинной динамике потока.

## РЕЗЮМЕ

На підставі магнітооптичного дослідження термомагнітних нестійкостей у жорстких надпровідниках другого роду проведено вивчення розподілу індукції магнітного поля на поверхні надпровідного диска, яке виникає внаслідок послідовного виходу лавин магнітного потоку. Показано, що при зменшенні зовнішнього магнітного поля до

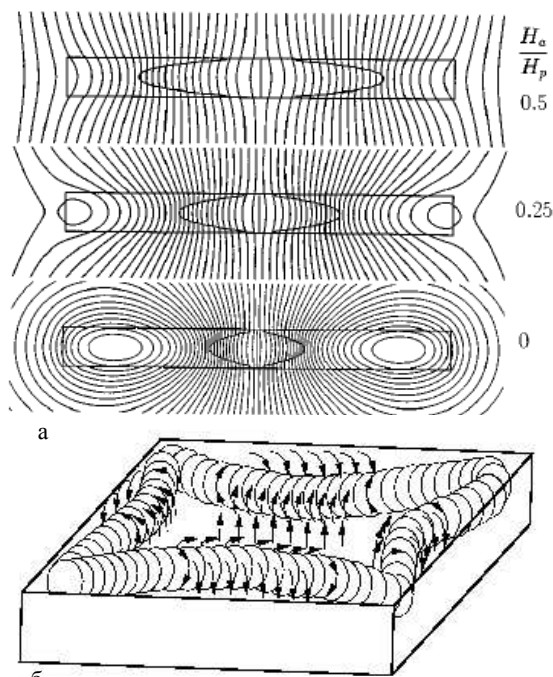


Рис. 2. а) – изменение картины силовых линий магнитного поля при выходе магнитного потока из сверхпроводника (по работе [8]); б) – форма мейсснеровской полости в пластине квадратной формы [9]

нуля у зразку виникають, так звані, мейснерівські порожнини. Величина локального струму (обумовлена  $z$  – компонентною магнітного поля), який протікає по межі захопленого потоку, майже однакова для усіх лавин.

*Ключові слова:* жорсткий надпровідник другого роду, критичний струм, магнітна візуалізація, мейснерівська порожнина, лавина магнітного потоку.

## SUMMARY

Basing on the data of magneto-optical measurements of thermomagnetic instabilities in superconductors of type II, the distribution of the magnetic field induction was studied at consequence emerging magnetic avalanche at the surface of a superconducting disc. It was shown that when external magnetic field decreases to zero, so called Meissner holes appears in sample. The magnitude of local current (which is defined by  $z$  – component of magnetic field) practically is identical for all avalanches.

*Key words:* hard superconductor type II, critical current, magnetic visualization, Meissner holes, magnetic flux avalanche.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рельеф индукции магнитного поля на поверхности жесткого сверхпроводника при неоднородном лавинном вхождении магнитного потока / В.Ф. Русаков, А. Nabialek, В.В. Чабаненко и др. // Вісник Донецького університету. Сер. А. Природничі науки. – 2011. – № 1. – С. 78-81.
2. Русаков В.Ф. Анализ движения вихревой системы в жестких сверхпроводниках второго рода по результатам магнитооптического изучения лавин магнитного потока / В.Ф. Русаков, В.В. Чабаненко, С.В. Васильев // Вісник Донецького університету. Серія А. Природничі науки – 2007. – Вип. 2. – С. 132-135.
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. Finger patterns produced by thermomagnetic instability in superconductors / A.L. Rakhmanov, D.V. Shantsev, Y.M. Galperin, T.H. Johansen // Phys. Rev. B. – 2004. – Vol. 70. – P. 224502-1 – 224502-8.
6. The reversal of the local magnetic field profile at the surface of superconducting sample caused by the thermomagnetic avalanche, / V. Chabanenko, S. Vasiliev, V. Rusakov et al. // J. Low Temp. Phys. – 2009. – Vol. 154. – P. 55-67.
7. Keyston J.R. A new method for measuring the speed of flux jumps in type II superconductors / J.R. Keyston, M.R. Wertheimer // Cryogenics. – 1966. – Vol. 6. – P. 341-343.
8. Brandt E.H. Superconductor disks and cylinders in an axial magnetic field. I. Flux penetration and magnetization curves / E.H. Brandt // Phys. Rev. B. – 1998. – Vol. 58, No 10. – P. 6506-6522
9. Meissner holes in superconductors / V.K. Vlasko-Vlasov, U. Welp, G.W. Crabtree et al. // Phys. Rev. B. – 1997. – Vol. 56. – P. 5622-5630.
10. Meissner holes and turbulent structures in superconductors in unidirectional and rotating fields / V.K. Vlasko-Vlasov, U. Welp, G.W. Crabtree et al. // Phys. Rev. B. – 1998. – Vol. 58. – P. 3446-3456.
11. Prozorov R. Collapse of the critical state in superconducting niobium / R. Prozorov, D. Shantsev, R.M. Mints // Phys. Rev. B. – 2006. – Vol. 74. – P. 220511-1 – 220511-4.

*Поступила в редакцію 20.02.2012 г.*