

УДК 538.95+945

В.Ф. Русаков, д-р физ.-мат. наук, профессор (Донецкий национальный университет)

ДИНАМИКА ТЕРМОМАГНИТНЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СОЕДИНЕНИЯХ И СПЛАВАХ

Введение

Основной причиной ограничивающей высокоточные технические применения сверхпроводников, является внезапное случайное разрушение их критического состояния. Оно выражается в потере основного свойства сверхпроводника - отсутствия сопротивления для протекания электрического тока. Такие явления называются термомагнитными неустойчивостями сверхпроводников. Проявляются они в виде гигантских скачков свойств (сопротивления, температуры, скорости звука, магнитного потока, намагниченности и т.д.) материала. При этом вся гигантская накопленная энергия тока или магнитного поля выделяется внутри сверхпроводника на протяжении микросекунд. Это часто приводит просто к расплавлению отдельных его участков и к необратимым последствиям.

Проблеме гигантских магнитных неустойчивостей в жестких сверхпроводниках более чем тридцать лет [1]. Изучение термомагнитных неустойчивостей стало еще более актуальным после открытия высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) [2-5]. Интерес возрос в связи с перемещением режимов эксплуатации новых сверхпроводящих материалов на 100 градусов ближе к комнатной температуре без потери качества технических параметров. Это значительно снижает затраты эксплуатации. Как выяснилось в последнее время, гигантские скачки магнитного потока, которые развиваются в результате магнитотермических неустойчивостей приводят еще к одному неприятному последствию - растрескиванию [4]. Больше того, авторами [6] было открыто новое явление механического расслоения текстурованных материалов ВТСП, которые имеют высокий критический ток и хорошие технические перспективы. Расслоение происходит вследствие гигантских скачков магнитного потока, а также скачков размера образцов, вследствие гигантской магнитострикции [7].

Поэтому центральным вопросом в поисках предупреждения катастрофических явлений в материалах вследствие термомагнитных неустойчивостей является выяснение механизмов их зарождения, установление определяющих движущих сил при их развитии и путей предотвращения таких событий. Гигантские неустойчивости, как физическое явление, имеют много общих черт с теоретическими моделями катастроф.

В последние годы большое внимание уделяется изучению метастабильного состояния сверхпроводника, обусловленного балансом сил межвихривого отталкивания и пиннингом потока на дефектах. Было наблюденно значительное количество необычных явлений, связанных с пространственно-временными динамическими свойствами: вихревыми лавинами различного масштаба, самоорганизованной критичностью и эффектами памяти в вихревой структуре [8-15]. Эти исследования сосредоточены на анализе причин и закономерностей возникновения малых пусковых флуктуаций – скачков потока (от десятков до сотни тысяч квантов магнитного потока) внутри материала,

которые могут перерасти в гигантские магнитотермические неустойчивости. Такие малые скачки потока всегда сопровождают, например, процесс проникновения магнитного потока (в виде вихревой структуры) внутрь сверхпроводника под давлением, возрастающего с течением времени, магнитного поля.

Модель и результаты

Ниобий-титановые сплавы, иттрий-бариевые и ртутные керамики, и другие сверхпроводящие материалы широко используются для получения магнитных полей высокой напряженности и проводников с высокой плотностью токов для различных приложений.

В наших исследованиях мы обнаружили целую серию новых динамических явлений, которые представляют перспективное направление экспериментальных исследований, требуют проведения детального анализа полученных результатов, построения адекватных теоретических моделей и определения серии параметров, которые характеризуют смешанное состояние сверхпроводника. Из вышеприведенного ясно, что исследование динамики процессов развития термомагнитных неустойчивостей является достаточно актуальной задачей.

В работе [16], на основе экспериментальных данных показано, что локальное поле на поверхности сверхпроводящего сплава NbTi, может менять знак.

В данной работе, на основе модели Бина, развиты представления, учитывающие преобразования индукции магнитного поля и токов, в сверхпроводящих соединениях в процессе входа и выхода лавин магнитного потока, другими словами, в режиме экранирования и захвата магнитного потока.

На рис.1 схематически представлено состояние сверхпроводника: 1a – в режиме полного экранирования внешнего магнитного поля и 1b – после вхождения лавины магнитного потока.

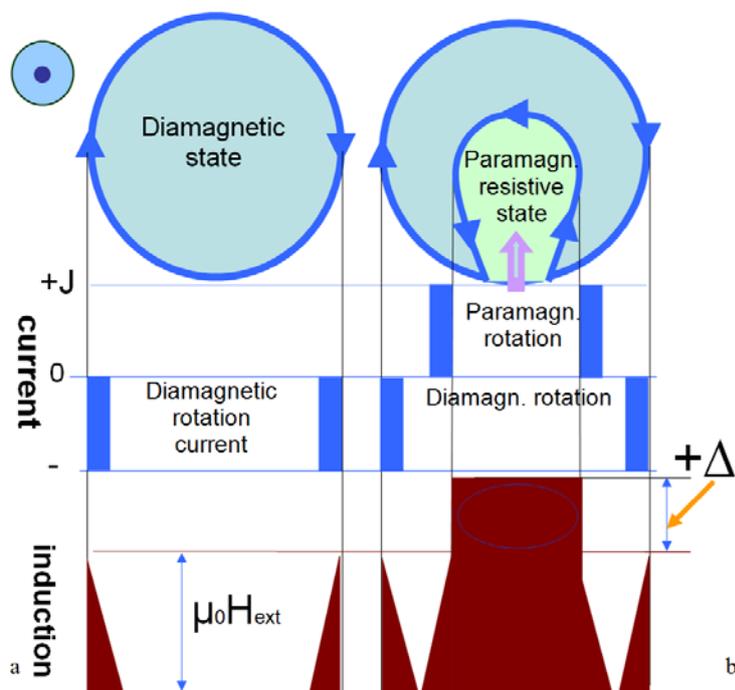


Рис. 1. Схематическое изображение динамики развития термомагнитной лавины в процессе вхождения магнитного потока

Образец имеет форму цилиндра, магнитное поле направлено вдоль его оси. В нижней части рисунка 1a показано распределение экранирующего тока и магнитного поля в образце. В модели Бина поле линейно убывает внутрь образца. В верхней части рисунка 1b показано состояние образца после вхождения термомагнитной лавины магнитного потока.

В результате вхождения лавины, в месте ее зарождения, происходит разрыв сплошного экранирующего контура [17]. Экранирующие токи начинают течь по границе области проникновения

магнитного поля, в которой образуется резистивное состояние, внутри образца токи текут в направлении, противоположном токам на границе образца. Эти (парамагнитные) токи могут приводить к увеличению поля в образце, по сравнению с внешним магнитным полем на некоторую величину Δ . При этом предполагается, что плотность тока, текущего по границе области лавины, равна плотности критического тока в образце (модель Бина).

Таким образом, в образце могут возникать так называемые парамагнитные области, т.е. области, в которых индукция магнитного поля превышает индукцию внешнего магнитного поля. Превышение индукции магнитного поля на поверхности образца наблюдалось экспериментально в работе [17]. В этой работе на основе измерений индукции магнитного поля в сверхпроводящем ниобий-титановом сплаве, с помощью линейки датчиков Холла, было обнаружено, что индукция магнитного поля в образце может превышать индукцию внешнего магнитного поля на величину порядка 10%. Приведенная схема перераспределения экранирующих токов и индукции, удовлетворительно объясняет полученный результат. Ток, текущий по границе области проникновения лавины, создает магнитное поле, направление которого совпадает с направлением внешнего магнитного поля. В силу принципа суперпозиции напряженности обоих полей складываются, в результате магнитное поле в области, занятой лавиной, превышает внешнее магнитное поле.

На рисунке 2 приведена схема перераспределения токовых контуров и индукции магнитного поля в режиме его захвата.

На рисунке 2а схематически представлено смешанное состояние сверхпроводника, парамагнитные токи, текущие по его поверхности, приводят к тому, что поле в образце превышает внешнее магнитное поле. При некотором понижении внешнего магнитного поля, возможен лавинный выход магнитного потока, что схематически представлено на рисунке 2b. Ток, текущий по границе области лавины выхода потока, имеет направление,

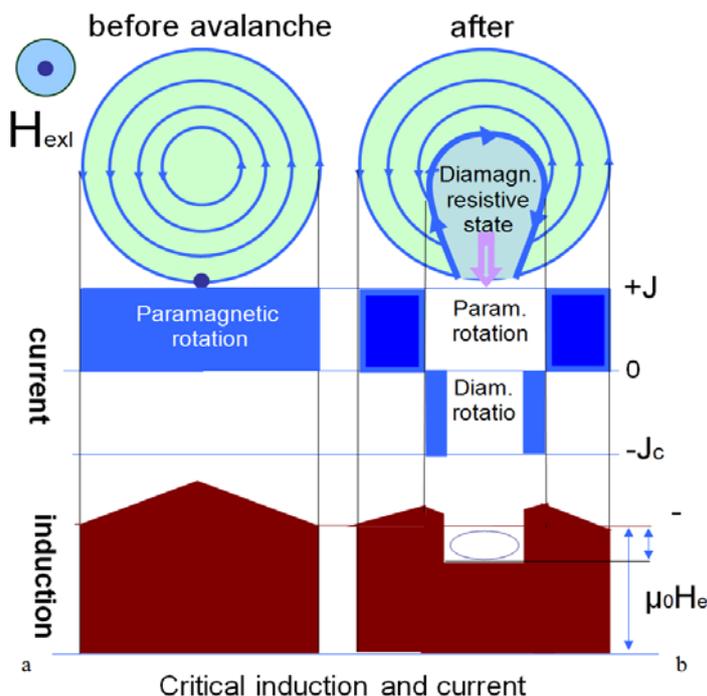


Рис. 2. Схематическое изображение динамики развития термомагнитной лавины в процессе выхода магнитного потока

противоположное парамагнитным токам в образце (диамагнитные токи) и приводит к понижению поля в этой области, которое становится меньше внешнего магнитного поля. Распределение токов и поля в образце показано в нижней части рисунка 2b.

Приведенная модель удовлетворительно объясняет экспериментально наблюдаемые, как превышение индукции магнитного поля в образце, в процессе вхождения термомагнитной лавины, так и более низкое, по отношению к величине индукции внешнего

магнитного поля, значение индукции магнитного поля в сверхпроводнике, в процессе лавинного выхода магнитного потока из образца.

Выводы

Проведен анализ результатов экспериментального исследования формы профиля индукции магнитного поля в сверхпроводящем образце в режиме экранирования и захвата магнитного поля. Построено распределение экранирующих токов и индукции магнитного поля. Объяснено как повышение индукции магнитного поля в образце по сравнению с индукцией внешнего магнитного поля в процессе вхождения лавины (парамагнитное состояние), так и более низкое значение индукции магнитного поля в образце по отношению к внешнему магнитному полю в процессе лавинного выхода потока (диамагнитное состояние).

Автор выражает благодарность Чабаненко В.В. за плодотворные дискуссии по вопросам, изложенным в статье.

Список использованной литературы

1. Evets J.E. Flux Instabilities in Hard Superconductors / J.E. Evets, A.M. Campbell, and Dew-Hughes // Phil. Mag. — 1964. — Vol. 10. — P. 339–345.
2. Muller K-H. Flux jumps in melt-textured Y-Ba-Cu-O / K-H. Muller and C. Andrikidis // Phys.Rev. B. — 1994. — Vol. 49. — P. 1294–1307.
3. Mints R. G. Flux creep and flux jumping / R. G. Mints // Phys. Rev. B. — 1996. — Vol. 53. — P. 12311–12317.
4. Gao L. Thermal instability, magnetic field shielding and trapping in single-grain $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bulk materials / L. Gao, Y.Y. Xue, R.L. Meng, and C.W. Chu // Appl. Phys. Lett. — 1994. — Vol. 64. — P. 520–522.
5. Mints R.G. Flux jumping in thin films / R.G. Mints and E.H. Brandt // Phys. Rev. B. — 1996. — Vol. 59. — P. 12421–12426.
6. Chabanenko V.V. Failure of textured YBaCuO samples in the strong magnetic field / V.V. Chabanenko, A.I. D'yachenko, H. Szymczak and S. Piechota // Physica C. — 1997. — Vol. 289. — P. 211–215.
7. Chabanenko V.V. Flux instabilities in textured YBaCuO in strong magnetic fields and stabilization critical state / V.V. Chabanenko, A.I. D'yachenko, H. Szymczak and S. Piechota // Physica B. — 1996. — Vol. 216. — P. 289–290.
8. Field S. Superconducting vortex avalanches / S. Field, J. Witt, F. Nori, X. Ling // Phys. Rev. Lett. — 1995. — Vol. 74. — P. 1206–1209.
9. Zieve R.J. Vortex avalanches at one thousandth the superconducting transition temperature / R.J. Zieve, T.F. Rosenbaum, H.M. Jaeger, G.T. Seidler, G.W. Crabtree, U. Welp // Phys. Rev. B. — 1996. — Vol. 53. — P. 11849–11854.
10. Behnia K. Internal avalanches in pile of superconducting vortices / K. Behnia, C. Capan, D. Mailly, B. Etienne // Phys. Rev. B. — 2000. — Vol. 61. — P. R3815–R3818.
11. Seidier G.T. Vanishing magnetization relaxation in the high field quantum limit in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ / G.T. Seidier, C.S. Carrillo, T.F. Rosenbaum, U. Welp, G.W. Crabtree, V.M. Vinokur // Phys. Rev. Lett. — 1993. — Vol. 70. — P. 2814–2817.
12. Nowak E.R. Magnetic flux instabilities in superconducting niobium rings: tuning the avalanche behavior / E.R. Nowak, O.W. Taylor, Li Liu, H.M. Jaeger, T.I. Selinder // Phys. Rev. B. — 1997. — Vol. 55. — P. 11702–11705.
13. Seidier G.T. Low Temperature Action in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ / G.T. Seidier, T.F. Rosenbaum, K.M. Beauchamp, H.M. Jaeger, G.W. Crabtree, U. Welp, V.M. Vinokur // Phys.Rev.Lett. — 1995. — Vol. 74. — P. 1442–1445.
14. Zebouni N.H. Magnetothermal effects in type II superconductors / N.H. Zebouni, A. Venkataram, G.N. Rao, C.G. Grenier, J.M. Reynolds // Phys. Rev. Lett. — 1964. — Vol. 13. — P. 606–609.

15. Bassler K.E. Braided Rivers and Superconducting Vortex Avalanches / K.E. Bassler, M. Paczuski, and G.F. Reiter // *Phys. Rev. Lett.* — 1999. — Vol. 83. — P. 3956–3959.

16. Chabanenko V. Dynamical transformation of superconducting state at thermomagnetic avalanches / V. Chabanenko, S. Vasiliev, V. Rusakov, A. Nabiałek, P. Alekseev, H. Szymczak, S. Piechota // *Physica C.* — 2007. — Vol. 460–462. — P. 776–777.

17. Nabiałek A. The reversal of the local magnetic field profile at the surface of superconducting sample caused by the thermomagnetic avalanche / A. Nabiałek, V. Chabanenko, S. Vasiliev, V. Rusakov, G. Shushmakova, H. Szymczak, // *J. Low Temp. Phys.* — 2009. — Vol. 154. — P. 55–67.

Надійшла до редколегії 28.02.2013.

В.Ф. Русаков ДИНАМІКА ТЕРМОМАГНІТНИХ НЕСТІЙКОСТЕЙ У НАДПРОВІДНИХ СПОЛУКАХ ТА СПЛАВАХ

В роботі представлено результати аналізу експериментального дослідження форми профілю індукції магнітного поля у надпровідному зразку у режимі екранування та захвату магнітного поля. Запропоновано модель розподілу екрануючих струмів, яка дозволяє пояснити значення індукції магнітного поля, що спостерігаються у зразку. Пояснено як перевищення індукції магнітного поля у зразку в процесі входження лавини (парамагнітний стан), так і більш низьке значення індукції магнітного поля у зразку по відношенню до зовнішнього магнітного поля, в процесі лавинного виходу потоку (діамагнітний стан).

Ключові слова: термомагнітна лавина, надпровідники, струми, що екранують.

V.F. Rusakov THE DYNAMICS OF THERMOMAGNETIC INSTABILITIES IN SUPERCONDUCTING COMPOUNDS AND ALLOYS

Thermomagnetic avalanches that occur in hard type-II superconductors and lead to a sudden failure of the critical state are a major factor limiting the use of such materials in conditions of high-density electric currents and high magnetic field strengths.

Niobium-titanium alloys, yttrium-barium and mercury ceramics, and other superconducting materials are widely used for obtaining magnetic fields of high intensity and conductors with high current densities for different applications. The central question in the search of prevention of catastrophic events in the materials due to thermomagnetic instabilities is to understand the mechanisms of their origin and determining the conditioning driving forces in their development.

The results of the analysis of the experimental study of the profile shape of the magnetic field induction in a superconducting sample in the mode of screening and the trapping of the magnetic field is presented in the paper. A model of the distribution of the screening currents allowing explanation the observed values of the magnetic field in the sample is proposed. It is shown that in the regime of the external magnetic field shielding in the course of the avalanche entering on the edge of the region occupied by an avalanche currents having a direction opposite to the screening currents are flowing. These currents create a magnetic field, which coincides with the direction of the external magnetic field. As a result of the superposition of these fields, the field in the region occupied by avalanche exceeds the external magnetic field (paramagnetic state). In the magnetic flux trapping mode with a decrease of the external magnetic field avalanche flux leaving the sample is possible. In this case the currents flowing on the boundary of the region of the avalanche process create a field whose direction is opposite to the field in the sample. This leads to the fact that the magnetic field in the region of the avalanche is less than external magnetic field (diamagnetic state).

The above model satisfactorily explains the experimentally observed phenomena, both the excess of the magnetic field in the sample in the process of the thermomagnetic avalanche entering, and lower, compared to the external magnetic field, magnetic induction in a superconductor in the course of magnetic flux avalanche leaving the sample.

Keywords: thermomagnetic avalanche, superconductors, screening currents.

Русаков Владимир Федорович – д-р физ.-мат.наук, зав.кафедрой общей физики и дидактики физики Донецкого национального университета, г. Донецк, Украина, e-mail: nadezhda.rus@gmail.com.