

**ІНСТИТУТ МАГНЕТИЗМУ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ ТА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**



ЧУМАК Олександр Миколайович

УДК 538.945; 53.082.7

**НЕСТІЙКІСТЬ ЗМІШАНОГО СТАНУ ЖОРСТКИХ
НАДПРОВІДНИКІВ ТА ОСОБЛИВОСТІ ДИНАМІКИ
МАГНІТНОГО ПОТОКУ**

01.04.11 - магнетизм

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Донецькому фізико-технічному інституті ім. О.О. Галкіна Національної академії наук України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Чабаненко Віктор Васильович,
Донецький фізико-технічний інститут
ім. О.О. Галкіна НАН України,
головний науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Габович Олександр Маркович,
Інститут фізики НАН України,
провідний науковий співробітник
відділу фізики кристалів.

доктор фізико-математичних наук
Касаткін Олександр Леонідович,
Інститут металофізики
імені Г.В. Курдюмова НАН України,
провідний науковий співробітник
відділу надпровідності

Захист відбудеться «7» квітня 2021 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.248.01 при Інституті магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України за адресою: 03142, м. Київ, бульвар Вернадського, 36-б, конференц-зал Інституту магнетизму.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України за адресою: 03142, м. Київ, бульвар Вернадського, 36.

Автореферат розіслано « » березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої Ради Д 26.248.01
кандидат фізико-математичних наук



Л. Є. Козлова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Досліджувані в даній роботі матеріали належать до жорстких надпровідників другого роду. Сильно неоднорідний метастабільний критичний стан цих надпровідників в магнітному полі обумовлений пінінгом потоку. Пінінг унеможливилює вхід вихорів та їх вихід при перемагнічуванні, призводячи до незворотності їх властивостей.

В останні роки значні зусилля дослідників зосереджені на вивченні незвичайних явищ, пов'язаних з просторово-часовими динамічними властивостями такого стану. Це самоорганізована критичність при стохастичній динаміці вихорів, прояв ефектів пам'яті у вихровій структурі, утворення грубих «шорсткостей» фронту потоку, що проникає, звивистість інтерфейсу та ін.

Дослідження властивостей жорстких надпровідників є актуальною задачею, оскільки вони є перспективними з точки зору технічних застосувань. Реальні можливості для створення різного роду надпровідних магнітних систем з'явилися після відкриття жорстких надпровідників, що мають високі значення критичної температури і густини критичного струму в сильних магнітних полях. Технічні вироби на основі явища надпровідності відіграють визначальну роль при створенні накопичувачів енергії, ліній електропередач, генераторів, прискорювачів і детекторів елементарних частинок і т.п. Ці пристрої є великими надпровідними системами. Впровадження у нові фундаментальні галузі науки через створення гігантських експериментальних пристроїв (наприклад, Великий адронний колайдер), також засноване на застосуванні гранично сильних магнітних полів, гігантських струмів. Тому проблема отримання високостабільних сильних магнітних полів з використанням жорстких надпровідників дуже важлива. Забезпечення їх надійної роботи – актуальна задача. Її рішення визначається правильним вибором конструкції, надпровідного матеріалу і області параметрів, де його властивості високостабільні.

Термомагнітні нестійкості, що призводять до раптового руйнування критичного стану, є основною причиною, яка обмежує високоструміві технічні застосування об'ємних надпровідників. При цьому зникає головна прикладна властивість надпровідника – відсутність опору для протікання електричного струму. Виявляються термомагнітні нестійкості надпровідників у вигляді гігантських стрибків їхніх властивостей (опору, температури, швидкості звуку, магнітного потоку, намагніченості і т.і.). При цьому уся накопичена до нестійкості гігантська енергія струму (або магнітного поля) виділяється всередині надпровідника протягом мілісекунд. Це часто призводить просто до розплавлення окремих його ділянок і до незворотних наслідків, пошкоджуючи дороге електрообладнання (соленоїди, двигуни, накопичувачі енергії).

У дисертаційній роботі розглянута важлива практична задача – стабілізація критичного стану сучасних надпровідних матеріалів, що широко застосовуються в техніці та науці. Наприклад, прискорювач частинок у Сполучених Штатах Америки діаметром 80 км має надпровідні соленоїди з робочим полем 2 Тесла по всьому периметру кола. Ці соленоїди вироблені з NbTi дроту, а різні токоприймачі зі сплаву Nb₃Sn. У разі виникнення нестійкості критичного стану неоднорідна вихорова система, головним елементом якої є вихор Абрикосова, стрибком проникає у надпровідник. У роботі розглянута можливість інверсії магнітного моменту надпровідника, що спостерігається у експерименті та запропонована модель такого процесу, детально розглянуті особливості динаміки вихору (траєкторії руху, поглинання енергії вихором, ...) під дією зовнішньої сили у широкому діапазоні частот. Таким чином, у дисертаційній роботі вирішуються нові важливі наукові завдання, які мають фундаментальне і прикладне значення, що робить її тему актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відділі «Надпровідності і тунельної спектроскопії» Донецького фізико-технічного інституту ім. О.О. Галкіна НАН України і є складовою частиною наступних проектів:

- Відомча тема «Зміна фізичних станів багатофункціональних матеріалів у критичних умовах та пошук шляхів використання цих змін на практиці» за завданнями цільової наукової програми ВФА НАН України (№ держ. реєстрації 0117U000250, строки виконання: 01.2017 – 12.2021 рр., фундаментальні дослідження).
- Цільова програма НАН України «Розробка комплексних середовищ на основі складних оксидів і сплавів для пристроїв з електричними і магнітними зв'язками, дослідження динаміки нерівноважних процесів в них (номер державної реєстрації 0112U000107, термін виконання 2012-2016 рр.).
- Українсько-польські проекти в рамках наукового співробітництва між НАН України та Польською академією наук (ПАН):
- «Магнетизм і надпровідність перспективних матеріалів для застосувань», термін виконання 2018-2020 рр.;
- «Тривимірна динамічна трансформація критичного стану в надпровідних елементах», термін виконання 2015-2017 рр.;
- «Термомагнітні лавини в анізотропних високотемпературних надпровідниках – явище, котре обмежує їх технічне застосування в енергетиці», термін виконання 2012-2014 рр.;
- Проект SEP-CONACYT CB-2012-01-183673 (Мехіко) «Study of thermomagnetic avalanches in anisotropic superconductors» (термін виконання 2012-2015).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є виявлення особливостей нестійкості критичного стану жорстких надпровідників, впливу на стійкість двошаровості матеріалу та встановлення закономірностей у динаміці нанорозмірного об'єкту - вихору Абрикосова з урахуванням його інерційних властивостей під дією зовнішньої періодичної сили, яка загасає вглиб зразка. Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

- Побудувати і дослідити модель жорсткого надпровідника, що має два шари з різних надпровідних матеріалів. Дослідити стійкість критичного стану такого надпровідника. Розглянути ефекти, що є наслідками впровадження такої моделі; оптимізувати позитивні наслідки.
- Провести дослідження шорсткого фронту магнітного потоку, що проникає у надпровідник, у випадках його екранування та захвату. Запропонувати різні методи моделювання подібних фронтів потоку та впровадити еліптичну модель критичного стану, що використовує густину струму з просторовою періодичністю, з метою симуляції надпровідника з шорстким фронтом потоку, що проникає у надпровідник.
- Дослідити нове, підтверджене експериментально, явище динамічної інверсії магнітного моменту надпровідника внаслідок термомагнітної нестійкості критичного стану. Побудувати модель, що якісно пояснює явище, що спостерігається.
- Провести дослідження вимушених коливань ізолюваного вихору Абрикосова. Побудувати математичну модель, що дозволяє описати коливальний рух ізолюваного вихору Абрикосова під дією зовнішньої періодичної сили, яка затухає вглиб зразка, враховуючи його інерційні властивості та усі сили, що діють на вихор у надпровіднику, застосувати її для опису руху та встановлення ієрархії впливу цих сил на рух вихору.

Об'єктом дослідження є критичний стан жорстких надпровідників другого роду, його стійкість по відношенню до виникнення термомагнітних нестійкостей, які є основною причиною зниження струмонесучої здатності жорстких надпровідників, розподіл магнітного поля на поверхні жорстких надпровідників і монокристалів, явище динамічної інверсії магнітного моменту надпровідника, та нанооб'єкт надпровідного стану - поодинокий ізолюваний вихор Абрикосова.

З урахуванням особливостей структури надпровідних матеріалів, становить інтерес вивчення стійкості критичного стану та динаміки магнітного потоку в залежності від складу, геометрії зразка і способу його отримання і обробки.

Предмет досліджень. Жорсткі надпровідники другого роду NbTi , Nb_3Sn , YBaCuO і вплив параметрів і властивостей цих матеріалів на стабільність критичного стану у них.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань в дисертації використовувалося експериментальне обладнання (вібраційний магнітометр “Foner”, Quantum Design PPMS System) та програмне забезпечення Wolfram Mathematica (Wolfram Research, розрахунки), Mathcad (PTC Mathsoft, розрахунки), Origin (OriginLab Corporation, розрахунки та будова графіків), програмне забезпечення, створене на підставі MATLAB library integrator (MathWorks, бібліотеки ode45 та ode123) С. Romero-Salazar (розрахунки у частині роботи, що відноситься до розділу «Моделювання критичного стану надпровідника з шорстким фронтом проникаючого потоку»).

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше отримано аналітичний критерій стійкості критичного стану двошарового жорсткого надпровідника другого роду, шари якого мають різні фізичні характеристики. Шляхом вибору оптимальної товщини покриття (наприклад, для надпровідника Nb_3Sn , покритого шаром NbTi) поріг стійкості критичного стану зростає більш ніж на 60%.

2. У рамках еліптичної моделі критичного стану С. Romero-Salazar, з метою відтворити експериментальні спостереження, у довгому циліндрі з жорсткого надпровідника другого роду вперше змодельовані неоднорідні фронти магнітного потоку та контури індукції з різним рівнем шорсткості в режимах екранування та захоплення магнітного потоку, продемонстровано виникнення мейснерівських порожнин.

3. Отримано аналітичні рішення системи рівнянь, які описують вимушені коливання ізольованого вихору Абрикосова. Побудовано та вперше проаналізовано траєкторії руху вихору Абрикосова у надпровіднику $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ під дією зовнішньої періодичної (до 1 ТГц) сили, що загасає вглиб зразка з урахуванням ефективної маси вихору та сил, які на нього діють: пінінга, Лоренца, пружності та в'язкості.

4. Вперше встановлено ієрархію впливу різних сил на форму та розмір траєкторії, виявлені відмінності у прояві вимушених коливань вихору для різних орієнтацій поля в анізотропному $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ та ізотропному NbTi надпровідниках. Найбільший вплив на його динаміку на частотах до 500 МГц - має сила пружності вихора, вище 1 ГГц - сила Лоренца, інерційність вихора визначає його траєкторію на частотах вище 100 ГГц.

5. За допомогою концепції критичного стану була вперше побудована наочна індукційно-токова модель інверсії повного магнітного моменту, що спостерігалася в експерименті на об'ємному надпровідному монокристалі $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Важливо, що знання умов появи такого явища має вирішальне значення для застосування

об'ємних надпровідників як "постійних" магнітів, наприклад, у надпровідних левітаційних пристроях, тощо.

Достовірність отриманих результатів підтверджується використанням науково обґрунтованих теоретичних та експериментальних методів. Результати досліджень опубліковані у провідних вітчизняних і міжнародних наукових виданнях, а також доповідались на багатьох міжнародних конференціях.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що результати досліджень доповнюють і розширюють існуючі уявлення про фізичні явища, що виникають в процесі входження магнітного потоку і перетворенні критичного стану жорстких надпровідників другого роду. Висновки роботи повинні враховуватися при використанні жорстких надпровідників другого роду для різних технічних застосувань. Результати цих досліджень можуть бути також корисними дослідникам, які займаються розробкою сучасних технологій отримання надпровідних виробів та їх використання у різноманітних сучасних приладах.

Особистий внесок здобувача полягає в проведенні бібліографічного пошуку і аналізі літературних джерел за темою дисертаційної роботи. Експериментальні дослідження явища інверсії повного магнітного моменту, що спостерігалася на надпровідному монокристалі $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ були виконані у співавторстві із співробітниками Instituto de Física, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México та Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk, Warsaw, Poland. Здобувач побудував наглядну індукційно-струмову модель інверсії повного магнітного моменту. Автор самостійно розв'язував електродинамічну систему рівнянь для двошарового надпровідника та отримав критерій стійкості критичного стану, провів його аналіз. Здобувачем розв'язана система рівнянь, що описує динаміку поодинокого вихора Абрикосова, написані програми для розрахунків його траєкторій та побудовані траєкторії в широкому діапазоні частот. Аналіз цих результатів проведено спільно з д.ф.-м.н. проф. Русаковим В.Ф. (Донецький національний університет імені Василя Стуса МОН України). Автор брав активну участь в обговоренні результатів, формулюванні висновків, побудові моделей і написанні статей.

Визначення напрямків досліджень, постановка задач електродинаміки здійснювалася спільно з науковим керівником д.ф.-м.н. Чабаненко В.В. та д.ф.-м.н. проф. Русаковим В.Ф.

Таким чином, особистий внесок автора дисертації у вирішенні поставлених завдань є визначальним.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися особисто дисертантом на таких міжнародних наукових конференціях:

1. XIX National Superconductivity Conference "Unconventional Superconductivity and Strongly Correlated Electron Systems", Bronisławów, Poland, 2019.
2. 6th International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" NANO-2018, Kyiv, Ukraine, 2018.
3. The 2018 E-MRS Fall Meeting and Exhibit, Warsaw, Poland, 2018.
4. XVIII National Superconductivity Conference "Unconventional Superconductivity and Strongly Correlated Electron Systems", Krynica Morska, Poland, 2017.
5. I International Workshop "Actual Problems of Fundamental Science", Shatsk Lakes, Ukraine, 2015.
6. V International Conference for Young Scientists, Low Temperature Physics, Kharkiv, Ukraine, 2014.
7. 4th International Conference on Superconductivity and Magnetism, Antalya, Turkey, 2014.
8. 27th International Conference on Low Temperature Physics, Buenos Aires, Argentina, 2014.
9. XVI National Superconductivity Conference "Unconventional Superconductivity and Strongly Correlated Electron Systems", Zakopane, Poland, 2013.

Публікації. Результати дисертації представлені у 15 наукових публікаціях: 6 статей у фахових міжнародних періодичних наукових виданнях, що входять до наукометричної бази SCOPUS, та 9 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5-ти розділів, висновків і переліку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 125 сторінок машинописного тексту, з них 110 сторінок основного тексту. Дисертація містить 27 рисунків, 3 таблиці, перелік використаних джерел зі 141 найменувань на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

Перший розділ «Критичний стан жорстких надпровідників, термомагнітна нестійкість (огляд)». Цей розділ містить огляд літератури за темою дисертації. У ньому представлено короткий опис теоретичних й експериментальних робіт з вивчення стійкості критичного стану жорстких надпровідників, їх властивостей. У розділі розглянуті основні поняття і рівняння, що відносяться до теорії та моделей розвитку термомагнітних нестійкостей у надпровідниках і є необхідними для опису особливостей нестійкості змішаного стану жорстких надпровідників та динаміки магнітного потоку.

Другий розділ «Нестійкість критичного стану надпровідників та стабілізуючий вплив їх двошаровості» присвячений впровадженню моделі двошарового надпровідника, шари якого складаються з різних надпровідних матеріалів, її оптимізації та розрахункам стабільності критичного стану для надпровідної конструкції $\text{Nb}_3\text{Sn} + \text{NbTi}$.

У першій і другій частинах розділу вивчалася стійкість надпровідника з двома шарами, що відрізняються густиною критичного струму. Розглянуто надпровідник, що складається з внутрішньої частини із густиною критичного струму $j_2(T)$ (SC-II) та тонкого поверхневого шару товщиною δ_1 з меншим значенням густини критичного струму $j_1(T)$ (SC-I) (Рис. 1). Надпровідник, що має два шари, які різняться густиною критичного струму виникає часто в процесі виготовлення матеріалу.

Стійкість такого композиту була досліджена методами, запропонованими Мінцем та Рахмановим [1*]. Спочатку для критичного стану надпровідника за допомогою системи диференціальних рівнянь у часткових похідних були записані залежні від часу розподіли магнітного та електричного поля, а також температури. Далі ця система була спрощена для випадку «локально-адіабатичного» ліміту, коли магнітна дифузія набагато більша, ніж теплова дифузія. У подальшому система рівнянь була зведена до одновимірної задачі (Рис. 1). Стійкість цієї системи була досліджена проти малих збурень температури, магнітного та електричного поля, що дозволило отримати магнітне

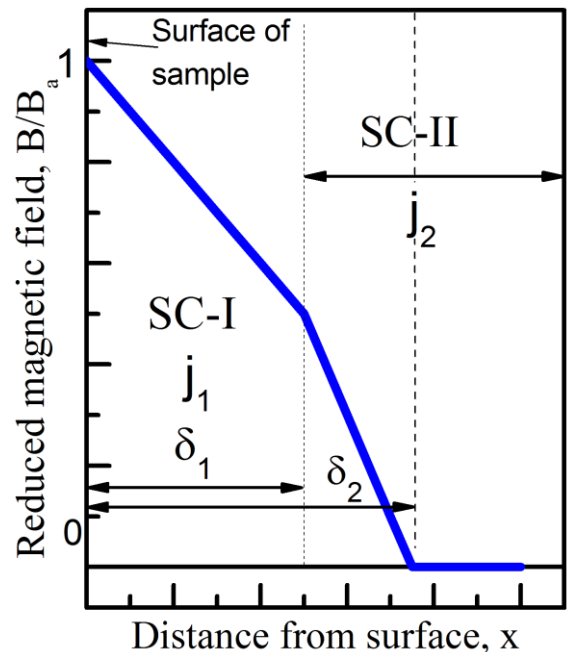


Рис. 1. Схематичний розподіл магнітного поля в двошаровому надпровіднику з двома різними густинами критичного струму (j_1 , j_2) і товщинами (δ_1 , $\delta_2 - \delta_1$).

поле першого стрибка магнітного потоку (поріг нестійкості) двошарового надпровідника:

$$B_{1j}(T_0) = B_{0j}(T_0) \left[1 - \frac{2}{\pi} \arctg \left[\frac{\operatorname{tg} \left(\frac{2\delta_1 j_{02}}{\pi K C(T_0) T_c} B_{0j}(T_0) \right)}{K} \right] + \frac{\mu_0 j_{02} \left(1 - \frac{T_0}{T_c} \right) \delta_1}{K} \right] \quad (1)$$

$$B_{0j}(T_0) = \frac{\pi}{2} \sqrt{\mu_0 C(T_0) (T_c - T_0)}$$

де T_0 і T_c – відповідно початкова і критична температура, B – магнітна індукція, j_0 – густина критичного струму, $C(T_0)$ – питома теплоємність на одиницю об'єму, μ_0 – магнітна стала, $B_{0j}(T_0)$ – добре відомий «класичний» вираз для поля першого стрибка у звичайному випадку (без покриття) [1*], параметр K визначає відношення критичних струмів $K = j_{02}/j_{01}$.

Далі критерій (1) було використано для дослідження надпровідника NbTi для обраної температури T та відношення критичних струмів K . Поле першого стрибка потоку має немонотонну залежність від товщини поверхневого шару (Рис. 2а), що дозволило визначити оптимальну товщину поверхневого шару δ_{opt} , що призводить до максимального значення поля першого стрибка (2):

$$\delta_{\text{opt}}(T_0, K) = \frac{2}{\pi} \frac{B_{0j}(T_0)}{\mu_0 j_2(T_0)} K \arccos \frac{1}{\sqrt{1+K}} = \frac{2}{\pi} d_c \arccos \frac{1}{\sqrt{1+K}} \quad (2)$$

Було встановлено, що у випадку звичайного надпровідника NbTi за допомогою покриття з меншою густиною критичного струму, можна збільшити поле першого стрибка потоку приблизно на 60 відсотків (Рис. 2б). В свою чергу це дозволяє, і що більш важливо, приблизно настільки збільшити критичні товщини надпровідних елементів (наприклад, дротів у кабелі).

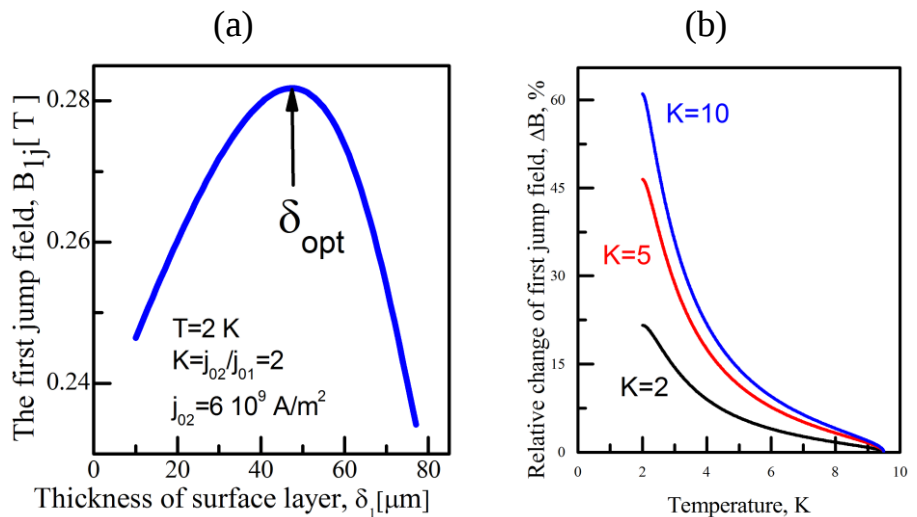


Рис. 2. (а) Залежність поля першого стрибка від товщини поверхневого шару; (б) відносні зміни поля першого стрибка (ΔB) від температури за різних співвідношень густини критичного струму ($K = j_{02}/j_{01}$), де криві розраховані для оптимальної товщини поверхневого шару.

У третій і четвертій частинах розділу задачу (Рис. 1) було модифіковано, розглянуто двошаровий надпровідник з шарами, що характеризуються різними

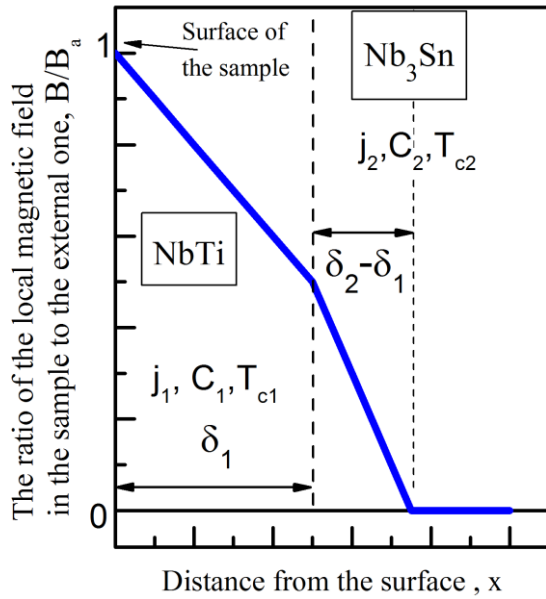


Рис. 3. Схематичний розподіл магнітного поля в двошаровому надпровіднику: Nb_3Sn , вкритий шаром NbTi .

Рис. 4а. Видно значне підвищення стійкості у випадку двошарового надпровідника, особливо в діапазоні низьких температур.

тепловими та провідними властивостями, та критичними температурами (Рис. 3), що є кращим наближенням до реальних об'єктів. Одночасно вивчався вплив провідних та теплових властивостей шарів на стійкість критичного стану двошарового надпровідника. Отриманий критерій (3) використовувався для визначення стійкості критичного стану у надпровіднику Nb_3Sn , покритому шаром NbTi (Рис. 2).

Як і в випадку попередньої задачі, була знайдена оптимальна товщина покриття, для якої поле першого стрибка потоку є максимальним (4).

Температурна залежність поля першої нестабільності для надпровідника Nb_3Sn , вкритого шаром NbTi , а також для надпровідника Nb_3Sn без покриття показана на

$$B_{1j}(k, T) = B_2(T) \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \arctan \left[\frac{\sqrt{\frac{T_{c1} j_1(T) C_2(T)}{T_{c2} j_2(T) C_1(T)}} \tan \left(\frac{\pi \delta_1 j_{02} j_1(T)}{2 B_1(T) k} \right)}{\frac{k}{k}} \right] \right\} + \mu_0 \delta_1 \frac{j_{02} j_1(T)}{k} \quad (3)$$

$$B_i(T) = \frac{\pi}{2} \sqrt{\mu_0 C_i(T) (T_{ci} - T)}$$

$$\delta_{opt} = K \sqrt{\frac{C_1(T) T_{c1}^2}{\mu_0 j_{02} (T_{c1} - T)}} \arccos \sqrt{\frac{K \frac{(T_{c2} - T) T_{c1}}{(T_{c1} - T) T_{c2}} - 1}{K^2 \frac{(T_{c2} - T) T_{c1}^2 C_1(T)}{(T_{c1} - T) T_{c2}^2 C_2(T)} - 1}} \quad (4)$$

Температурні залежності відносних змін поля першого стрибка потоку для різних відношень густин критичного струму показані на Рис. 4(b), зі збільшенням параметра K також зростає поле першого стрибка потоку. Однак слід зазначити, що цей результат виникає лише тоді, коли питома теплоємність поверхневого шару

перевищує питому теплоємність внутрішнього надпровідника: чим більша теплоємність, тим більше тепла потрібно генерувати для нагрівання надпровідника до заданої температури і, отже, тим пізніше починає розвиватися лавина. При

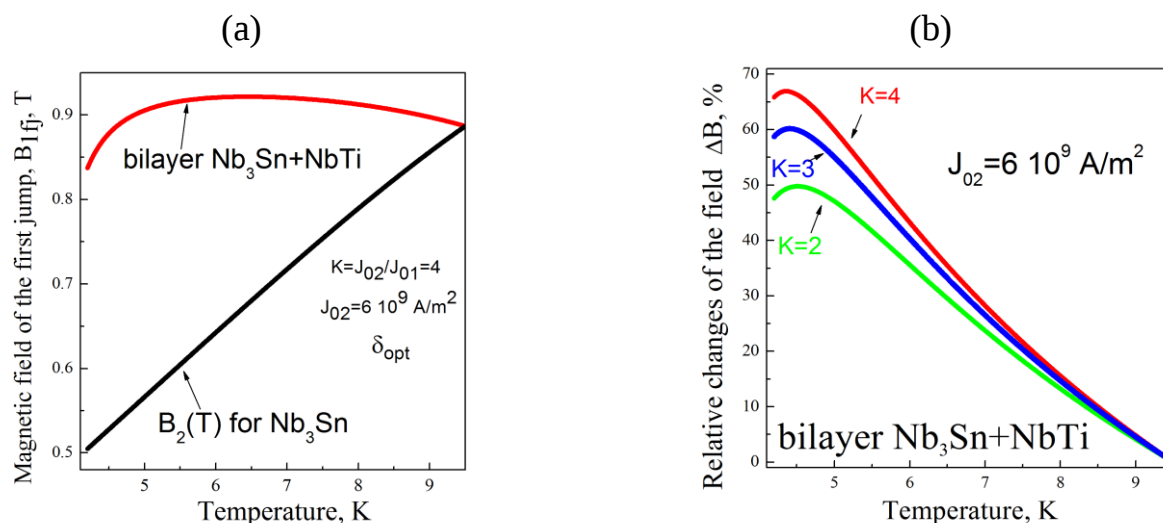


Рис. 4. (a) Температурна залежність величини поля першої нестійкості B_{1fj} для Nb_3Sn та двошарового надпровідника $Nb_3Sn + NbTi$ (з оптимальною товщиною δ_{opt} поверхневого шару); (b) відносні зміни поля першого стрибка (ΔB) від температури за різних співвідношеннях густини критичного струму ($K = j_{02}/j_{01}$), де криві розраховані для оптимальної товщини поверхневого шару.

температурі 4,2 К відносне збільшення поля першого стрибка потоку становить близько 60%.

Третій розділ «Модельовання критичного стану надпровідника з шорстким фронтом проникаючого потоку» присвячений моделюванню структур індукції магнітного поля з шорстким фронтом проникнення у режимах екранування та захоплення магнітного потоку за допомогою еліптичної моделі. Спочатку була представлена еліптична теорія критичного стану [2*] для циліндричної геометрії; далі за допомогою нерегулярної густини критичного струму моделюються структури проникнення магнітного потоку, подібні до тих, що спостерігалися раніше в експериментах. Числові симуляції розкладу магнітної індукції з різними типами нерегулярностей були отримані у нескінченному циліндрі із застосуванням програми для розрахунків, що розроблена С. Romero-Salazar.

У першій частині розділу розглянута еліптична модель критичного стану, що дозволяє відтворювати магнітний відгук надпровідників з сильним пінінгом, підданих багатокомпонентним або обертовим полям, або комбінацією постійного поля та змінного струму. Чисельне розв'язання рівнянь Максвелла разом із матеріальним законом та емпіричним критичним струмом Кіма-Андерсона з доданим коефіцієнтом відхилення $1 + \delta_\phi$, дозволили отримати просторово-неоднорідний фронт проникнення магнітного поля у надпровідник.

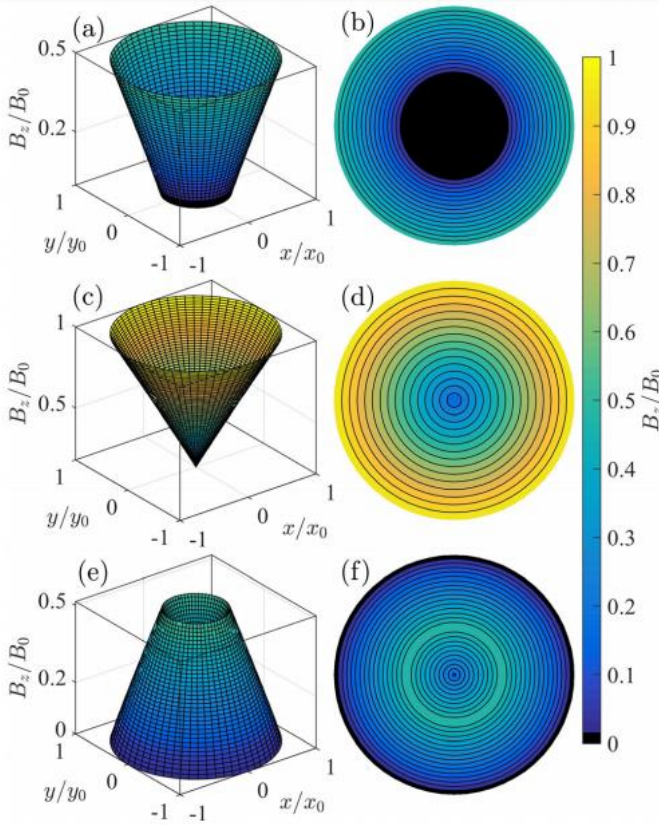


Рис. 5. Безрозмірний розподіл магнітної індукції $B_z(x, y)/B_0$ в надпровідному циліндрі, що поміщений у поздовжнє магнітне поле $\mathbf{H}_a$: $1 + \delta_\phi$: (а) - (б) і повного (с) - (д) проникнення, та випадок захопленого магнітного потоку (е) - (ф) після вимкнення зовнішнього поля у розподілах індукції, представлених на панелях (с) - (д); пінінг вибрано ізотропним.

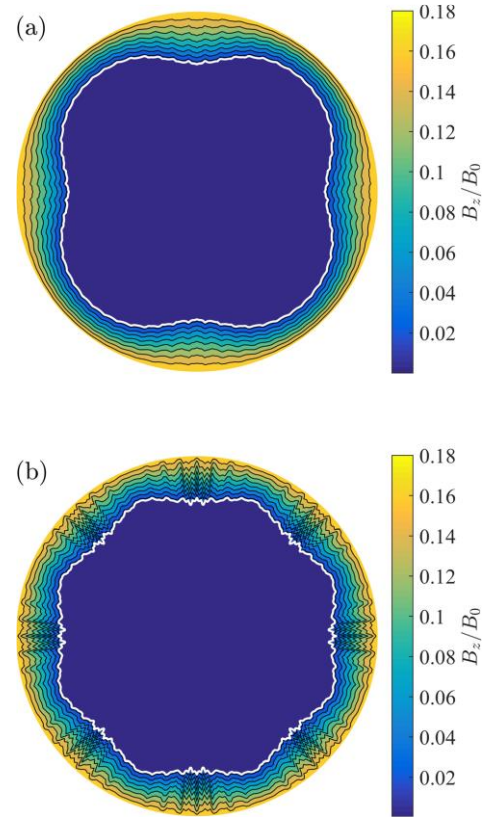


Рис. 6. Кольорові мапи $B_z(x, y)/B_0$, отримані для коефіцієнтів періодичного відхилення $1 + \delta_\phi$: (а) моделювання розподілу B_z у зразку з межами сектора росту та об'ємним розладом, $\delta_\phi = 0.3B_z / B_0 [\cos(4\phi + \pi) + 0.1\cos(64\phi + \pi)]$; (б) моделювання неоднорідного розподілу в об'ємному надпровіднику з урахуванням внесків від меж сектору росту та шорсткості, $\delta_\phi = 0.3B_z / B_0 [\cos(4\phi + \pi) \cos(64\phi + \pi)]$.

У другій частині розділу представлені результати комп'ютерного моделювання фронту магнітного потоку. Спочатку було проілюстровано еліптичну модель критичного стану на типовій, добре відомій поведінці надпровідника у сценаріях екранування та захоплення потоку в ізотропному випадку (Рис. 5): були представлені випадки часткового ((а)-(б)) і повного ((с)-(д)) проникнення магнітного поля в надпровідник, та випадок захоплення потоку ((е)-(ф)). У подальшому до еліптичної моделі критичного стану було впроваджено фактор відхилення $(1 + \delta_\phi)$ для густини критичного струму Кіма-Андерсона. Аналітичне «конструювання» фактору відхилення дозволило за допомогою цієї моделі відтворити нерегулярний, шорсткий розподіл магнітної індукції (Рис. 6), що спостерігається в магнетооптичних дослідженнях [3*].

Моделювання за допомогою керування параметрами задачі через фактор відхилення дозволило:

- досягти різних рівнів шорсткості на профілі фронту потоку, а також, отримати на фронті і за ним складні траєкторії циркуляції критичного струму;
- побачити утворення острівців або порожнин мейснеровського стану;
- відтворити картини фронтів, пов'язаних з границями переманічування всередині надпровідника.

Важливою особливістю сформульованої моделі є можливість в перспективі її застосувати для аналізу стійкості критичного стану (стійкості експлуатаційних параметрів) надпровідників для їх практичного використання в сильних магнітних полях. Сучасне уявлення про стійкість критичного стану засновано на аналізі тільки примітивної (далекої від реальності) ситуації - плоского проникаючого фронту магнітного потоку.

Четвертий розділ «Динамічна інверсія магнітного моменту надпровідника внаслідок термомагнітної нестійкості критичного стану» присвячений дослідженню явища миттєвого розвороту магнітного моменту надпровідника внаслідок термомагнітної нестійкості критичного стану та побудові моделі, що якісно його описує [4*]. Це явище виникає в надпровідному монокристалі $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ з захопленим потоком під час його лавинного виходу. Інверсія намагнічування відбувається в системі з величезною накопиченою енергією, без теплового контакту між зразком і держакон зразка, коли лавинний процес реалізується майже в квазіадіабатичних умовах. Представлена та обговорюється модель магнітної інверсії моменту надпровідника, що базується на особливій еволюції просторового розподілу критичного струму. Важливо, що знання умов виникнення такого явища має вирішальне значення для застосування об'ємних надпровідників як "постійних" магнітів, наприклад, у надпровідних левітаційних пристроях тощо.

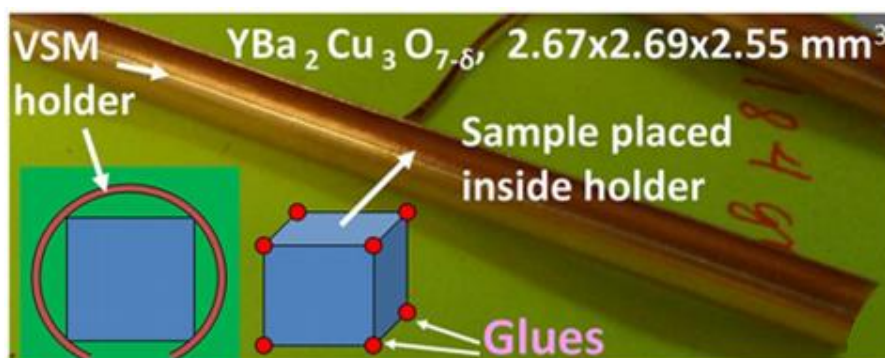


Рис. 7. Візуалізація встановлення зразка у держакон, що є зафіксованим у вакуумній камері, щоб уникнути теплових потоків між зразком та навколишнім середовищем.

У першій частині розділу представлено деталі експерименту та умови виникнення інверсії моменту. Явище інверсії було спостережено на відносно

великому надпровідному монокристалі, що був отриманий шляхом top-seeded solution growth. Густина критичного струму J_c , оцінена з поля першого стрибка потоку, становила $\geq 3 \cdot 10^9$ А/м² при $T = 2$ К. Магнітні властивості зразка були досліджені в системі Quantum Design PPMS DynaCool-9. Кристал поміщали в спеціальний держак (Рис. 7): ребра куба досліджуваного зразка знаходилися лише в механічному контакті з держак, що практично виключає можливість теплового потоку між зразком і держак зразка через обмежений тепловий контакт. Держак із зразком був встановлений до вакуумної камери для зменшення теплових потоків та обмеження розсіювання енергії. Залишковий тиск газу He в камері дорівнював приблизно 38,4 Торр. Магнітне поле було прикладено вздовж кристалографічної осі c кристала.

Друга частина розділу присвячена представленню особливостей перемагнічування кристалу та опису петлі гістерезису. На рисунку 8(а) показана петля гістерезису, що виміряна при $T = 2$ К, тоді як панелі (b) і (c) зосереджені на її деталях. Петля $M(H)$ була зареєстрована під час першого циклу перемагнічування надпровідника. У початковій діаманітній частині кривої намагніченості, тобто в першій чверті – режимі екранування – видно надзвичайну термомагнітну лавину після двох часткових стрибків потоку близько $\mu_0 H = 4,85$ Т. Стрибок потоку є майже завершеним, тобто дорівнює приблизно 96% від початкового значення намагніченості. Далі, типова поведінка стрибка потоку намагніченості спостерігалася до 9 Т. Багато малих стрибків з'явилося у режимі захоплення, коли магнітне поле зменшилося до $H = 0$, тобто у другій чверті петлі, представлений на рис. 8.

Відомо, що в негативному полі (третя чверть) захоплений магнітний момент об'ємного зразка досягає максимуму. У цій області виникає найбільший градієнт індукції, що визначає місце найбільшої нестабільності критичного стану на контурі намагніченості. Як правило, лавина потоку у цьому місці є найбільшою за величиною. У досліджуваному кристалі, коли напрямок магнітного поля було змінено, відбулася драматична подія, інверсія моменту (рис. 8 (a, b, c)). Було оцінено, що тривалість такого процесу дорівнює кільком десяткам мілісекунд.

На рисунку 8 (b, c) показані деталі процесу перемагнічування поблизу нульового поля. Як видно, намагніченість, що пов'язана з захопленням магнітним потоком, перевертається під час термомагнітної лавини при $\mu_0 H_f = -0,048$ Т. Таку поведінку можна класифікувати як динамічну інверсію. Намагніченість переходить із стану з позитивним $+M_1$ (позначається як 1 на рисунку, $+\mu_0 M_1 = 2,82$ Т) у стан з від'ємним значенням намагніченості, $-\mu_0 M_2$, що дорівнює $-2,46$ Т (рис. 8 (b)). Появу негативної намагніченості $-M_2$ можна пояснити інверсією критичного струму (рух струму в протилежному напрямку).

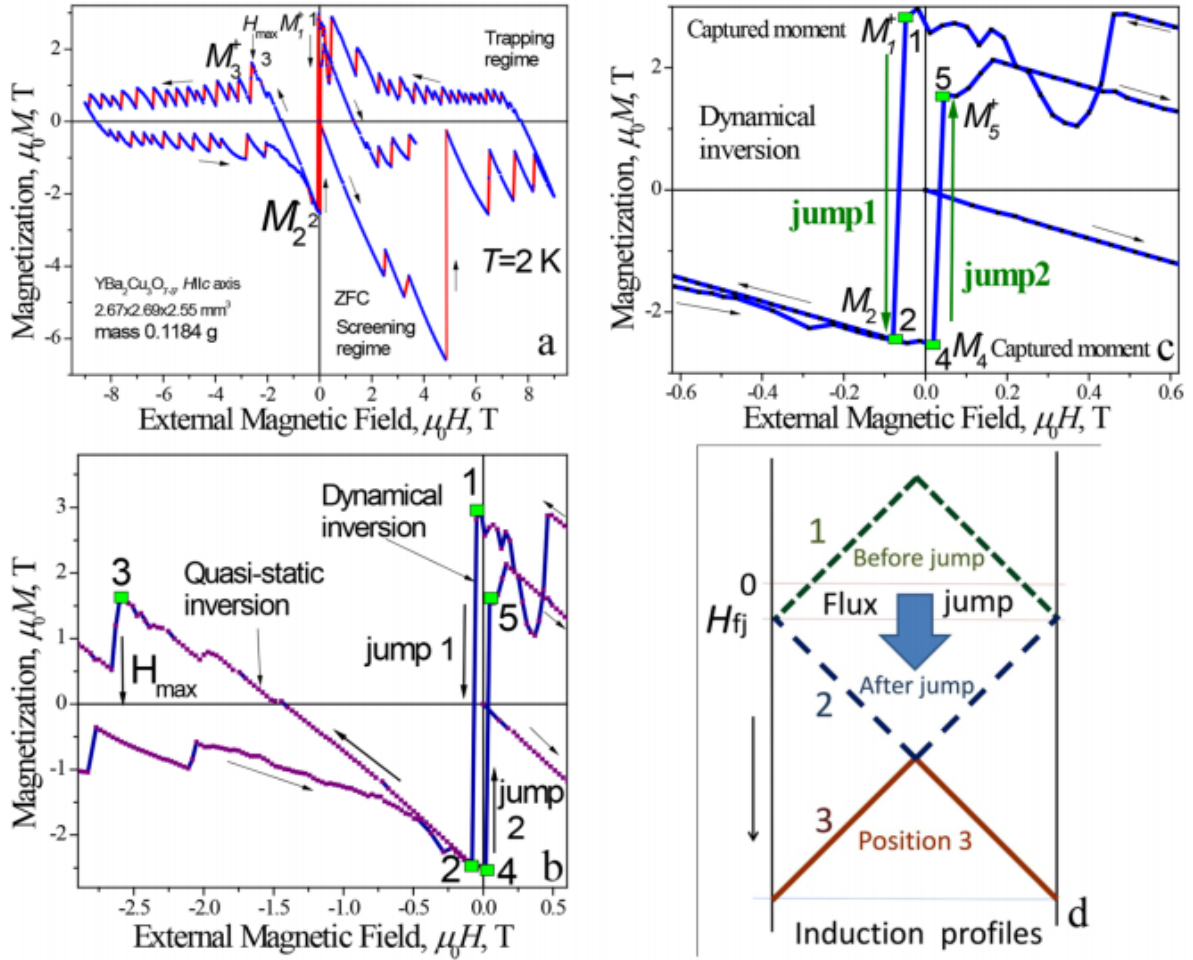


Рис. 8. (а) Петля переманічування $M(H)$ для монокристала $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ при $T = 2$ К у магнітному полі $H \parallel c$. (б) Розширення даних, представлених на панелі (а), поблизу поля трохи вище динамічної інверсії магнітного моменту, та в районі позиції 3, тобто для діапазону полів вище квазістатичної інверсії. (с) Деталі петлі в районі динамічної інверсії гігантського магнітного моменту навколо $H = 0$. (д) Профілі магнітної індукції для різних місць (позиції 1, 2, 3) петлі гістерезису (б).

Подальше повільне збільшення поля в негативному напрямку призводить до поступового обертання намагніченості та розвороту зі стану $-M_z$ (положення 2 на рисунку, четверта чверть на кривій $M(H)$) до третьої чверті до стану $+M_z$ у магнітному полі $\mu_0 H_{0\max} = -2,6$ Т. В ході цього процесу намагніченість досліджуваного зразка була повністю перевернута (квазістатичний перехід $-M_2 \rightarrow +M_3$), тобто сталося квазістатичне обертання профілю індукції (з положення 2 в положення 3, рис. 8 (d)). Квазістатична інверсія профілю дозволила оцінити значення густини критичного струму. Як впливає з рис. 8 (d), поле $\mu_0 H_{\max} \approx 2B_p$, де поле повного проникнення $B_p = (1/2) \mu_0 J_c d$, d – товщина зразка. Значення густини критичного струму J_c , визначене з величини B_p , було $J_c \approx 1 \cdot 10^9$ А/м², що добре узгоджується з даними, отриманими з ширини петлі гістерезису.

Коли поле зменшилося від максимального значення у четвертій чверті, крива намагніченості $M(H)$ повторила поведінку, що спостерігалася у другій чверті (рис.

8 (а)), що характерно для процесу перемагнічування. Коли поле наблизилося до нульового значення, захоплена намагніченість стала порівнянною за значенням з намагніченістю $-M_2$, отриманою в результаті інверсії лавини. Це вказує на те, що динамічна інверсія намагніченості надпровідника, тобто стрибок магнітного потоку, з метастабільного положення 1 на петлі гістерезису $M(H)$ в третій чверті до метастабільного положення 2, розташованого в четвертій чверті, насправді відбулася в результаті термомагнітної лавини.

Під час перемикавання напрямку зовнішнього поля динамічна інверсія захопленої намагніченості (рис. 8 (с), стрибок 2) повторювалася, тобто спостерігався стрибок намагніченості: $-M_4 \rightarrow +M_5$. У цьому випадку величина інвертованої намагніченості $+M_5$ незначно відрізнялася від величини максимальної намагніченості, захопленої у другій чверті. Це може бути пов'язано з нестабільністю захопленого потоку у кристалі у цій області поля. Така нестабільність спостерігалася вже у другій чверті, коли поле сканувалося від $H = +9$ Т до нуля.

У третій частині розділу був якісно описаний процес перетворення критичного стану та побудована індукційно-струмова модель інверсії.

Опис можливої магнітної інверсії надпровідника у разі лавини може бути подано наступним чином. Розподіл захопленого потоку («кулоподібна» структура) в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-8}$ для плівки квадратної форми при 4,2 К наведено на рис. 9 (а) ([5*]). Максимальні значення індукції відповідають найяскравішим місцям.

Абсолютно чорні місця відповідають нульовій нормальній складовій індукції B_n . Аналогічна картина індукції при захопленні магнітного потоку очікується для досліджуваного зразка кубічної форми.

"Кулоподібна" структура індукції є наслідком надпровідного критичного струму

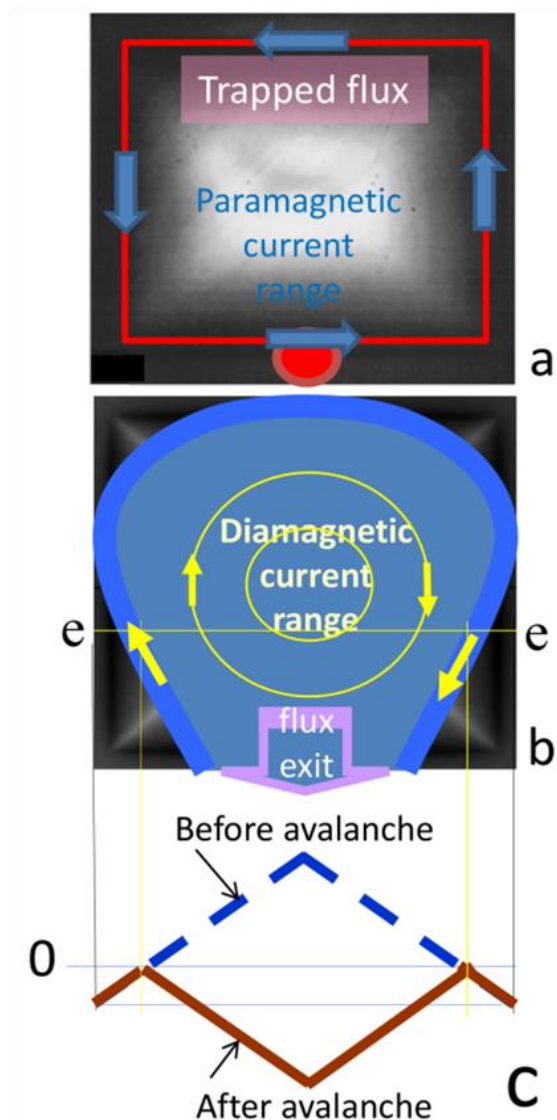


Рис. 9. (а) Зображення розподілу захопленого потоку, тобто візуалізація «кулоподібної» структури для плівки квадратної форми $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-8}$ в 4,2 К [5*]. (b) Зображення виходу потоку при лавині. (c) Схематичний вигляд еволюції профілю індукції при лавині в моделі Біна, зображений вздовж перерізу e-e панелі (b).

J_c , напрямок якого вказано стрілками на рис. 9 (а). Магнітний момент надпровідного зразка, пронизаного магнітним потоком, визначається інтегруванням критичного струму в об'ємі зразка. Для перевертання магнітного моменту потрібна зміна напрямку критичного струму на протилежний під час лавини потоку, а «кратер» лавини, утворений при виході потоку, повинен займати практично усю площу зразка.

Аналіз даних інших дослідників дозволив зробити наступні висновки: (а) лавина виходу захопленого потоку зароджується біля краю зразка і його фронт поширюється всередину у вигляді дуги, орієнтованої опуклістю до центру [6*], [7*]; (б) значення критичного струму на передній частині лавини, в динамічних умовах, близьке до його квазістатичного значення, а напрямок є протилежним струму поблизу країв зразка, що забезпечує захоплення магнітного потоку [6*]; (с) лавинний фронт, що наштовхується на перешкоду, деформується відповідно до її форми [8*].

Враховуючи вищезгаданий процес, перетворення профілю у разі лавини може бути зображено схематично, як показано на рис. 9. Припустимо, що лавина потоку, що виникає біля поверхні, виходить, наприклад, у точці на “куполоподібній” структурі (рис. 9 (а), точка у нижній частині рисунка) та її передня частина досягає майже країв зразка, як показано на рис. 9 (б). На межі лавини з'явився шар критичного стану зі струмом діаманітного напрямку, протилежним струму, що забезпечує захоплення магнітного потоку [7*]. Цей струм реалізує інверсію профілю магнітної індукції в центральній частині місця лавини (створює «кратер», рис. 9 (с)). Очевидно, у нашому випадку «кратер» із потоку, що виходив, набув форми, близької до квадратної, подібної до геометрії зразка. У цьому випадку площа, по якій протікає критичний струм, тобто струм діаманітного напрямку, дорівнює площі надпровідника із захопленим магнітним потоком перед лавиною. У цьому випадку інверсія магнітного моменту під час лавини майже повна.

Слід зазначити протилежний напрямок захопленого моменту у положенні 1 (а також у положенні 4) петлі гістерезису (рис. 8 (с)) та зовнішнього поля. Такий стан є енергетично несприятливим, і наслідкова взаємодія має тенденцію до розгортання моменту надпровідника у напрямку поля, сприяючи інверсії лавини.

Умови експерименту з інверсії моменту [4*] є, певною мірою, екзотичними. На практиці процеси левітації застосовуються на космічному кораблі, де можуть бути присутні деякі з цих екзотичних умов експерименту. Крім того, сучасні технології дозволяють отримати захоплене поле 17 Т при 29 К в об'ємних надпровідниках. У таких матеріалах можна очікувати гігантських критичних струмів і термомагнітних лавин з інверсією моменту при більш високих температурах. Нестабільність може стимулюватися випадковим магнітним польовим імпульсом або, наприклад, натисканням (ударом), що виникає внаслідок руху одного з об'єктів, що беруть участь у левітації.

Таким чином за допомогою концепції критичного стану була побудована наочна струмова модель інверсії повного магнітного моменту, що спостерігалася в експерименті на об'ємному монокристалі $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-8}$. Важливо, що знання умов появи такого явища має вирішальне значення для застосування об'ємних надпровідників як "постійних" магнітів, наприклад, у надпровідних левітаційних пристроях, тощо.

П'ятий розділ «Коливання ізолюваного вихору Абрикосова» присвячений аналізу вимушених коливань ізолюваного вихору Абрикосова у широкому діапазоні частот, побудові математичної моделі, що дозволяє описати коливальний рух та траєкторії масивного ізолюваного вихору Абрикосова, враховуючи усі сили, що діють на вихор у надпровіднику та застосовуванню результатів для встановлення ієрархії впливу сил, що діють на вихор.

У першій частині розділу була досліджена динаміка вихору з урахуванням його інерційності. Спочатку були представлені власні коливання ізолюваної вихрової лінії та їх спектр, отримані De Gennes і Matricon [9*], які враховували силу лінійного натягу вихору і силу Лоренца. У цих наближеннях отримано рівняння руху вихору, розв'язуючи це рівняння, автори отримали безактиваційний параболічний спектр коливань. Далі був представлений аналіз механізмів масивності вихору та їх чисельні оцінки. З існуючих механізмів домінуючий внесок до ефективної маси вихору дають квазічастинки у корі вихору [10*]. У подальшому був досліджений вплив урахування сил в'язкості, пінінгу та інертності вихрової лінії на її рух і спектр її власних коливань, що складається з двох гілок: низькочастотної – $\omega_1(k)$ і високочастотної – $\omega_2(k)$ [11*]. Урахування сили пінінга привело до появи енергії активації у спектрі, а урахування сили в'язкості до загасання коливальних мод. У безпінінговій і бездисипаційній границях низькочастотна мода збігається з виразом, отриманим раніше De Gennes і Matricon [9*]. У випадку, коли на вихор також діє зовнішня періодична однорідна сила, була проаналізована залежність енергії, що поглинається, від частоти зовнішньої сили (зовнішнього змінного струму) та температури. Було показано, що поглинання як функція частоти змінного струму має два резонансних максимуми, що обумовлені низько- і високочастотною гілками спектра.

У другій частині розділу досліджено динаміку вихору під дією зовнішньої періодичної сили, що затухає вглиб зразка. Була розглянута задача про рух поодинокі вихрової лінії з урахуванням сил, що на неї діють з боку надпровідника, і зовнішньої гармонійної сили, що затухає вглиб зразка, включаючи інерційність вихору. Проведений теоретичний аналіз динаміки вихора є важливою базою для експериментальних механічних маніпуляцій ізолюваним вихором, що є хорошим локальним зондом для вивчення динаміки вихорів.

Для цього випадку була записана система рівнянь, що описує вимушені коливання вихору (5), яке далі було знайдено у вигляді (6):

$$\begin{cases} \mu_{eff} \frac{\partial^2 S_x}{\partial t^2} = J_x \frac{\partial^2 S_x}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial S_y}{\partial t} - \eta \frac{\partial S_x}{\partial t} - \beta_x S_x + f_{0x} e^{-z/\lambda} \cos \omega t \\ \mu_{eff} \frac{\partial^2 S_y}{\partial t^2} = J_y \frac{\partial^2 S_y}{\partial z^2} - \alpha \frac{\partial S_x}{\partial t} - \eta \frac{\partial S_y}{\partial t} - \beta_y S_y + f_{0y} e^{-z/\lambda} \sin \Omega t \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} S_x(z, t) &= S_x^*(t) e^{-z/\lambda}, \\ S_y(z, t) &= S_y^*(t) e^{-z/\lambda}. \end{aligned} \quad (6)$$

де $S_{x,y}$ – зміщення вихору вздовж осей x та y ; f_0 – амплітуда зовнішньої гармонійної сили, що затухає вздовж осі z та має частоти ω і Ω відповідних проекцій зовнішньої сили; α, β, η, J – параметри, що визначають вплив сил Лоренца, пінінга, в'язкості та натягу вихору, відповідно; μ_{eff} – ефективна маса вихору, t – час, λ – глибина проникнення магнітного поля.

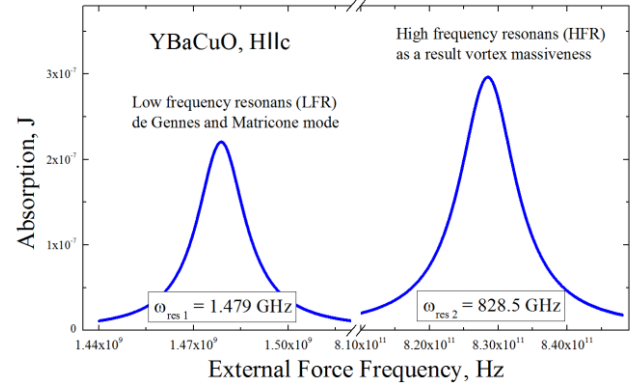


Рис. 10. Поглинання енергії вихором в YBaCuO при $H||c$ (розрахунок).

Це дозволило провести аналіз траєкторії руху вихору в широкому частотному діапазоні, що було зроблено для надпровідників YBaCuO (в двох орієнтаціях) та NbTi. Були знайдені резонансні частоти (рис. 10) та досліджено, як змінюється вигляд траєкторії і її розміри зі зміною частоти зовнішньої сили, встановлено (рис. 11, 12, 13), яку роль відіграє кожна з розглянутих сил як далеко від резонансів, так і на резонансних частототах.

Таким чином, дослідження, наведені в цьому розділі, дозволили зробити кілька важливих висновків.

Проведено аналіз сучасного стану проблеми осциляційної динаміки ізолюваних вихорів Абрикосова у надпровідниках II роду. Обговорюються експерименти з маніпуляції поодинокими вихорами за допомогою (SQUID) [12*], магнітного силового мікроскопа (MFM) [13*]. Розглянуто розв'язання рівнянь, що описують вимушені коливання пружної вихрової лінії у надпровіднику з урахуванні усіх сил, що на неї діють і інертності вихора. На їхній основі побудовані траєкторії коливань поодинокого вихору Абрикосова. Параметри розрахунку динаміки вихору обрані для двох класичних надпровідників: анізотропного високотемпературного – YBaCuO і низькотемпературного – NbTi.

У YBaCuO в геометрії $H||c$ аналіз форми траєкторії вихору у широкому діапазоні частот зовнішньої сили дозволив встановити наступне:

- на частотах $\omega \geq 3 \cdot 10^7$ Гц помітні відхилення від стандартної форми для вимушених коливань гармонійного осцилятора пов'язані з впливом пружних властивостей вихору (натягу вихрової лінії);

- показано, що перетворення форми траєкторії від гармонійної на низьких частотах до спіралеподібної при $\omega \sim 10^9$ Гц пов'язано зі зростанням впливу сили Лоренца. Збільшення сили Лоренца обумовлено зростанням швидкості вихору зі збільшенням частоти зовнішньої сили. Таким чином, у цьому частотному діапазоні траєкторія вихору Абрикосова в основному визначається силою Лоренца і силою пружності. При цьому інертність вихору, сили піннінга і в'язкості на форму і розмір траєкторії практично не впливають. Вплив інертності вихору

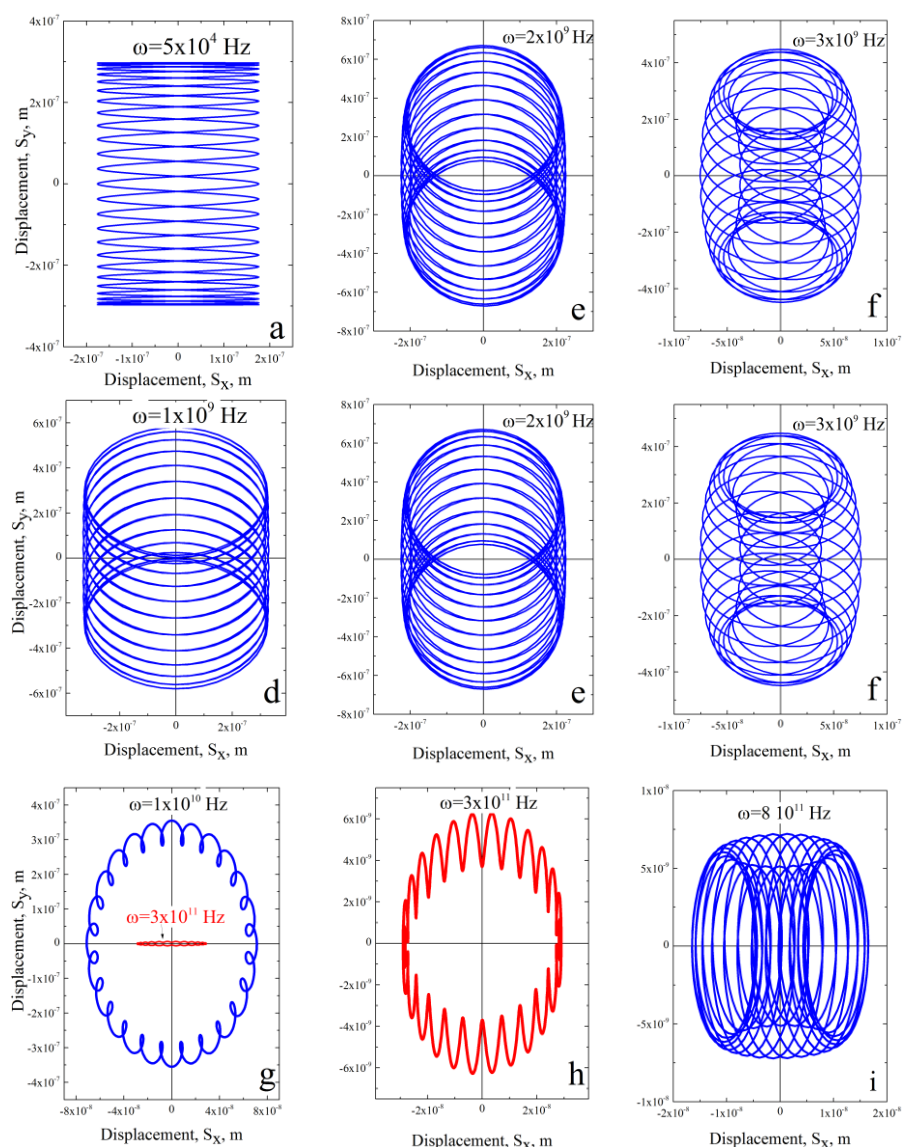


Рис. 11. Еволюція траєкторії вихору в YBaCuO зі зростанням частоти вимушених коливань при урахуванні ефективної маси μ_{eff} вихору і діючих на нього сил: піннінга, Лоренца, пружності і в'язкості, $H||c$.

- починає проявлятися на частотах $\omega \sim 2 \cdot 10^{11}$ Гц. Сила в'язкості істотно змінює траєкторію при резонансній частоті (рис. 13 (с));
- поглинання енергії має два характерних максимуми. Врахування сили натягу вихору і неоднорідності діючої сили призводить до значного зсуву низькочастотного резонансу (моди de Gennes і Matricon) в область більш високих частот, на відміну від результатів [11*], де розглядався рух вихору під дією однорідної зовнішньої сили. Високочастотний пік поглинання як і раніше

знаходиться поблизу циклотронної частоти вихору [11*], яка визначається його інертністю;

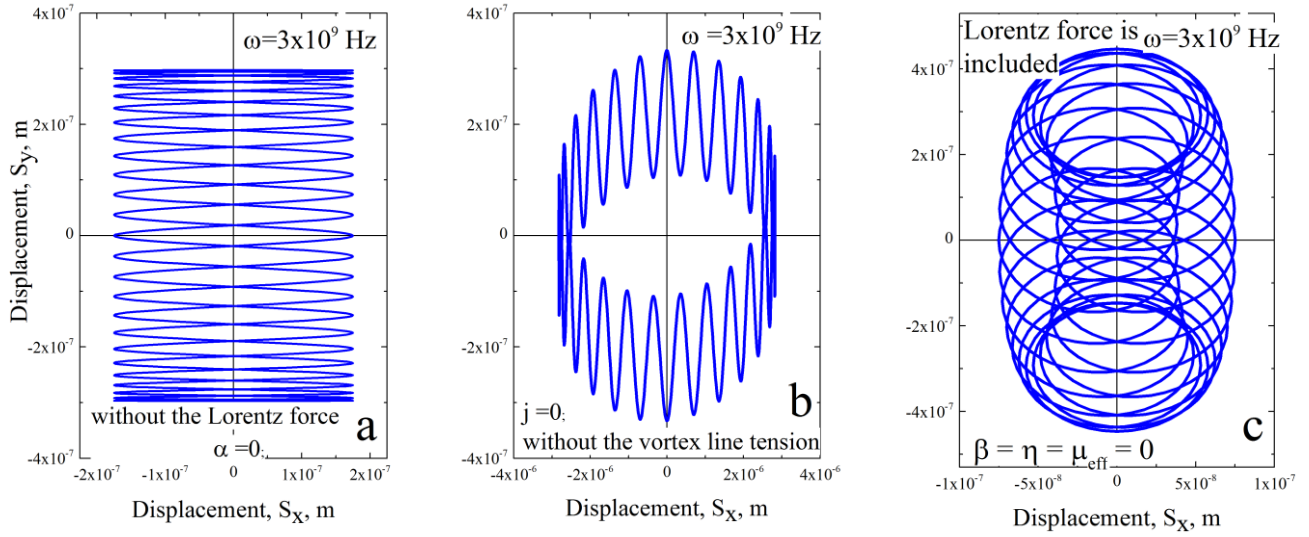


Рис. 12. Траєкторія вихору в YBaCuO при $H \parallel c$ на частоті $\omega = 3 \cdot 10^9$ Гц: (а) – без урахування сили Лоренца; (б) – без урахування сили пружності; (с) – без урахування сил піннінга, в'язкості і інертності вихору. Траєкторія практично не змінилася (див. рис. 11 (f)).

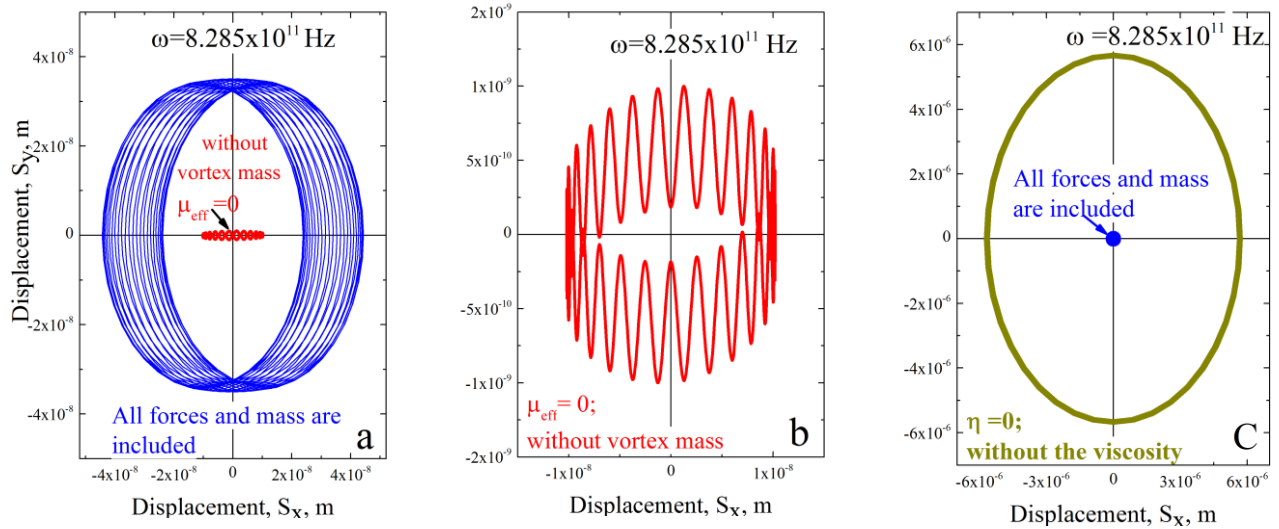


Рис. 13. Траєкторія вихору в YBaCuO при $H \parallel c$ на частоті $\omega_{res2} = 8,285 \cdot 10^{11}$ Гц : (а) – порівняння амплітуд коливань з урахуванням (основний рисунок) і без урахування інертності вихору (вставка в центрі); (б) – траєкторія вихору без урахування його інертності ($\mu_{eff} = 0$) при оптимальному масштабі; (с) – без урахування сили в'язкості ($\eta = 0$) – основний рисунок, в центрі траєкторія з урахуванням усіх сил, що перетворилася в цьому масштабі у точку.

- зазначені особливості форми траєкторії зберігаються і в орієнтації магнітного поля $H \perp c$ для YBaCuO. Однак через зміну на порядок параметрів надпровідника в цій геометрії (на порядок зменшуються сила Лоренца і сила натягу вихору) вже при частотах $\omega \sim 10^{11}$ Гц помітно проявляється вплив сили в'язкості.

При розгляді динаміки вихору для параметрів надпровідника NbTi було встановлено, що реалізація експерименту [13*] в цьому матеріалі може

виявитися проблематичною, через необхідність використання великих значень амплитуди зовнішньої сили.

ВИСНОВКИ

Дисертація присвячена вивченню питань фізики нестійкості критичного стану жорстких надпровідників, в ній отримані наступні результати.

1. На базі рівнянь електродинаміки отримано аналітичний критерій стійкості критичного стану у випадку двошарової надпровідної конструкції, коли властивості шарів мають різні фізичні характеристики (товщини поверхневого шару, густину критичного струму, теплові та провідні параметри). Знайдено вираз для поля першої нестабільності у такій системі. Шляхом вибору оптимальної товщини покриття (наприклад, для надпровідника Nb_3Sn , покритого шаром NbTi) поріг стійкості критичного стану зростає більш ніж на 60%.
2. У рамках еліптичної моделі критичного стану С. Romero-Salazar, змодельовані неоднорідні фронти магнітного потоку та контури індукції з різним рівнем шорсткості у режимах екранування та захоплення магнітного потоку. Розрахунки відтворюють результати експериментальних спостережень проникнення магнітного поля у реальні жорсткі надпровідники, передбачають можливі конфігурації мейснеровських порожнин.
3. У випадку прояву термомагнітної нестійкості критичного стану була побудована наочна індукційно-струмова модель інверсії повного магнітного моменту, що спостерігалася в експерименті на об'ємному надпровідному монокристалі $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Важливо, що знання умов появи такого явища має вирішальне значення для застосування об'ємних надпровідників як "постійних" магнітів, наприклад, у надпровідних левітаційних пристроях, тощо.
4. Для ізольованого наноструктурного елементу критичного стану – вихору Абрикосова – отримано аналітичний розв'язок системи рівнянь, які описують вимушені коливання під дією зовнішньої періодичної (до 1 ТГц) сили, яка затухає вглиб надпровідника, з урахуванням його ефективної маси і сил, що на нього діють всередині надпровідника: пінінга, Лоренца, пружності та в'язкості. Побудовано та проаналізовано траєкторії руху вихору Абрикосова у розглянутому діапазоні частот.
5. Встановлено ієрархію впливу різних сил на форму та розмір траєкторії, виявлені особливості вимушених коливань вихору для різних орієнтацій поля в анізотропному $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ та ізотропному NbTi надпровідниках. Найбільший вплив на його динаміку на частотах до 500 МГц має сила пружності вихора, вище 1 ТГц – сила Лоренца, інерційність вихора визначає його траєкторію на частотах вище 100 ГГц.

6. Частотна залежність поглинання енергії вихровою ниткою має два характерних піки поглинання, що відповідають низько (de Gennes-Matricone) - і високочастотній гілкам спектра коливань. Максимум в низькочастотній гілці відповідає пороговій частоті депінінгу, у високочастотній – циклотронній частоті вихору. В анізотропних надпровідниках, наприклад в YBaCuO, ці характерні частоти залежать від напрямку магнітного поля у кристалі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1*. R. G. Mints and A. L. Rakhmanov, *Reviews of Modern Physics*, **53**, no. 3. pp. 551–592 (1981).
- 2*. C. Romero-Salazar and F. Pérez-Rodríguez, *Applied Physics Letters*, **83**, no. 25. pp. 5256–5258 (2003).
- 3*. D. Barness *et al.*, *Physical Review B*, **77**, no. 9, pp. 094514 (2008).
- 4*. V. Chabanenko *et al.*, *Scientific Reports*, **9** no. 1, pp. 6233 (2019).
- 5*. V. K. Vlasko-Vlasov *et al.*, *Physical Review B*, **56**, no. 9, pp. 5622–5630 (1997).
- 6*. J. R. Keyston and M. R. Wertheimer, *Cryogenics*, **6**, no. 6, pp. 341–343 (1966).
- 7*. V. V. Chabanenko *et al.*, *Low Temperature Physics*, **42**, no. 4, pp. 239–257 (2016).
- 8*. B. B. Goodman and M. Wertheimer, *Physics Letters*, **18**, no. 3, pp. 236–238 (1965).
- 9*. P. G. de Gennes and J. Matricon, *Reviews of Modern Physics*, **36**, no. 1, pp. 45–49 (1964).
- 10*. N. B. Kopnin, *Reports on Progress in Physics*, **65**, no. 11. pp. 1633–1678 (2002).
- 11*. S. V. Vasiliev, V. V. Chabanenko, N. V. Kuzovoi, and V. F. Rusakov, *Low Temperature Physics*, vol. 39, no. 2, pp. 102–106 (2013).
- 12*. L. Embon *et al.*, “Probing dynamics and pinning of single vortices in superconductors at nanometer scales,” *Scientific Reports*, vol. 5, no. 1, pp. 7598 (2015).
- 13*. O. M. Auslaender *et al.*, *Nat. Phys.*, vol. 5, no. 1, pp. 35–39 (2009).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. V.V. Chabanenko, A. Nabiałek, R. Puźniak, O. Kuchuk, O. Chumak, F. Pérez-Rodríguez, U. Pal, V. Garcia-Vazquez, R. Cortés-Maldonado, J. Qian, X. Yao and H. Szymczak. „Magnetic moment inversion at giant flux jump: dynamical property of critical state in type-II superconductors”, *Scientific Reports*, V. 9, pp. 6233 (2019).
2. V.F. Rusakov, V.V. Chabanenko, A. Nabiałek, O.M. Chumak and R. Puzniak. „Dynamics of Abrikosov’s vortex forced oscillations: role frequency, acting forces and vortex parameters”, *Фізика низких температур/Low Temperature Physics*, V. 45 (9), pp. 1192-1201 (2019).

3. C. Romero-Salazar, O. A. Hernandez-Flores, O. Chumak, F. Perez-Rodriguez, and V. Chabanenko, „Emulating rough flux patterns in type-II superconducting cylinders using the elliptic critical-state model”, *Journal of Applied Physics*, V. 122, Issue 13, pp. 143904 (2017).
4. V.F. Rusakov, V.V. Chabanenko, A. Nabiałek, and O.M. Chumak, “Oscillations of a single Abrikosov vortex in hard type-II superconductors”, *Фізика низких температур/Low Temperature Physics*, V. 43, pp. 670 (2017).
5. O.M. Chumak, V.V. Chabanenko, V.F. Rusakov, S.V. Vasiliev, F. Pérez-Rodríguez, A. Nabiałek, “Threshold Field for Runaway Instability of Bilayer Hard Type-II Superconductor”, *Journal of Low Temperature Physics*, V. 179, Issue 1, pp 75–82 (2015).
6. S.V. Vasiliev, O.M. Chumak, V.V. Chabanenko, F. Pérez-Rodríguez, A. Nabiałek, “Stability of Bilayer Superconductors against Thermomagnetic Avalanche”, *Acta Physica Polonica A*, V. 126, 4a, A-84-A-88 (2014).
7. XIX National Superconductivity Conference "Unconventional Superconductivity and Strongly Correlated Electron Systems", Bronisławów, Poland, 2019.
8. 6th International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" NANO-2018, Kyiv, Ukraine, 2018.
9. The 2018 E-MRS Fall Meeting and Exhibit, Warsaw, Poland, 2018.
10. XVIII National Superconductivity Conference "Unconventional Superconductivity and Strongly Correlated Electron Systems", Krynica Morska, Poland, 2017.
11. I International Workshop “Actual Problems of Fundamental Science”, Shatsk Lakes, Ukraine, 2015.
12. V Intern. Conference for Young Scientists, Low Temperature Physics, Kharkiv, Ukraine, 2014.
13. 4th Intern. Conference on Superconductivity and Magnetism, Antalya, Turkey, 2014.
14. 27th Intern. Conference on Low Temperature Physics, Buenos Aires, Argentina, 2014.
15. XVI National Superconductivity Conference "Unconventional Superconductivity and Strongly Correlated Electron Systems", Zakopane, Poland, 2013.

АНОТАЦІЯ

Чумак О.М. Нестійкість змішаного стану жорстких надпровідників та особливості динаміки магнітного потоку. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 «Магнетизм». - Інститут магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, Київ, 2021.

Робота присвячена вирішенню проблеми нестійкості критичного стану жорстких надпровідників.

Вирішена задача стійкості критичного стану двошарового жорсткого надпровідника другого роду, шари якого мають різні фізичні властивості (густина критичного струму, питома теплота та критична температура). Була знайдена оптимальна товщина для зовнішнього шару, що призводить до максимального збільшення порогу стійкості - магнітного поля, при якому відбувається перша термомагнітна лавина (стрибок магнітного потоку та інших фізичних властивостей). Розрахунки проведено для надпровідника Nb_3Sn , вкритого шаром NbTi . Показано, що шляхом вибору оптимальної товщини покриття поріг стійкості, по відношенню до магнітного поля, збільшується більш ніж на 60%.

У випадку виникнення нестійкості критичного стану у надпровідному монокристалі $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ та входження в нього магнітного потоку запропоновано індукційно-струмову модель виникнення інверсії магнітного моменту зразка, схематично побудовано перетворення картини індукції у зразку внаслідок гігантської термомагнітної лавини.

З використанням еліптичної моделі критичного стану проведено моделювання шорстких фронтів магнітного потоку та контурів індукції у довгому циліндрі з жорсткого надпровідника другого роду. Зокрема, з використанням густини струму з просторовою періодичністю, проведено чисельні розрахунки розподілу індукції магнітного поля у надпровіднику в режимах екранування та захоплення магнітного потоку. Встановлено, що за допомогою вибору параметрів запропонованої моделі можна досягти різних рівнів шорсткості на фронті потоку, спостерігати утворення островів або мейснеровських порожнин та т.з. фронтів перемагнічування.

Електродинамічний відгук запінігованих вихорів Абрикосова у надпровідниках II роду у високочастотному діапазоні дозволив вивчити особливості їхньої поведінки. Проаналізовано систему рівнянь, що описують власні та вимушені коливання ізольованої пружної вихорової нитки при урахуванні різних сил, що впливають на її рух: Лоренца, пінінгу, пружності та в'язкості. У рівняннях враховано інерційні властивості вихору, які обумовлені різними механізмами масивності.

Побудовано та проаналізовано траєкторії руху ізольованого вихору Абрикосова в анізотропному надпровіднику $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ під дією зовнішньої періодичної сили, яка загасає вглиб зразка, з урахуванням ефективної маси вихору та зазначених вище сил, які на нього діють у надпровіднику. Встановлено ієрархію впливу різних сил у широкому діапазоні частот (до ~ 1 ТГц) зовнішньої сили на форму та розмір траєкторії. Розраховане поглинання енергії вихором, як функція частоти, має два резонансних піки, які відповідають низько- та високочастотній модам спектра коливань: перший відповідає моді de Gennes та Matricon, другий пов'язаний з інертністю вихору. Проаналізовано відмінності у прояві вимушених коливань вихору для різних орієнтацій поля в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ та для ізотропного низькотемпературного надпровідника NbTi .

Ключові слова: надпровідність, жорсткі надпровідники II роду, динаміка намагнічування, стабільність критичного стану, термомагнітні лавини, піннінг потоку, вихрова динаміка, стрибок потоку.

АНОТАЦІЯ

Чумак О.М. Неустойчивость смешанного состояния жестких сверхпроводников и особенности динамики магнитного потока. -Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 «Магнетизм». - Институт магнетизма Национальной академии наук Украины и Министерства образования и науки Украины, Киев, 2021.

Работа посвящена решению проблемы неустойчивости критического состояния жестких сверхпроводников.

Решена задача устойчивости критического состояния двухслойного жесткого сверхпроводника второго рода, слои которого имеют различные физические свойства (плотность критического тока, удельная теплота и критическая температура). Была найдена оптимальная толщина для внешнего слоя, что приводит к максимальному увеличению порога устойчивости - магнитного поля, при котором происходит первая термомагнитная лавина (скачок магнитного потока и других физических свойств). Расчеты проводили для сверхпроводника Nb_3Sn , покрытого слоем $NbTi$. Показано, что путем выбора оптимальной толщины покрытия порог устойчивости, по отношению к магнитному полю, увеличивается более чем на 60%.

В случае возникновения неустойчивости критического состояния в сверхпроводящем монокристалле $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и проникновения в него магнитного потока предложена индукционно-токовая модель возникновения инверсии магнитного момента образца, схематично построены преобразования картины индукции в образце вследствие гигантской термомагнитной лавины.

С использованием эллиптической модели критического состояния проведено моделирование шероховатых фронтов магнитного потока и контуров индукции в длинном цилиндре из жесткого сверхпроводника второго рода. В частности, с использованием плотности тока с пространственной периодичностью, проведены численные расчеты распределения индукции магнитного поля в сверхпроводнике в режимах экранирования и захвата магнитного потока. Установлено, что с помощью выбора параметров предложенной модели можно достичь различных уровней шероховатости на фронте потока, наблюдать образование островов или мейсснеровских полостей и т.н. фронтов перемагничивания.

Электродинамический отклик запинингованных вихрей Абрикосова в сверхпроводниках II рода в высокочастотном диапазоне позволил изучить особенности их поведения. Проанализирована система уравнений, описывающих

собственные и вынужденные колебания изолированной упругой вихревой нити при учете различных сил, влияющих на ее движение: Лоренца, пиннинга, упругости и вязкости. В уравнениях учтены инерционные свойства вихря, которые обусловлены различными механизмами массивности.

Построены и проанализированы траектории движения изолированного вихря Абрикосова в анизотропном сверхпроводнике $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ под действием внешней периодической силы, затухающей вглубь образца с учетом эффективной массы вихря и указанных выше сил, которые на него действуют в сверхпроводнике. Установлена иерархия влияния различных сил в широком диапазоне частот (до ~ 1 ТГц) внешней силы на форму и размер траектории. Рассчитанное поглощение энергии вихрем, как функция частоты, имеет два резонансных пика, соответствующие низко- и высокочастотной модам спектра колебаний: первый соответствует моде de Gennes и Matricon, второй связан с инертностью вихря. Проанализированы различия в проявлении вынужденных колебаний вихря для различных ориентаций поля в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ и для изотропного низкотемпературного сверхпроводника NbTi.

Ключевые слова: сверхпроводимость, жесткие сверхпроводники II рода, динамика намагничивания, стабильность критического состояния, термомагнитные лавины, пиннинг потока, вихревая динамика, скачок потока.

ABSTRACT

Chumak O.M. Instability of the mixed state of hard superconductors and features of dynamics magnetic flux. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for a candidate's degree in physics and mathematics in specialty 01.04.11 – magnetism. - Institute of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The problem of stability of bilayer type II superconductor with different critical current densities of inner part and coating was considered. The optimum thickness of surface layer enabling the maximal increase of the field of first flux jump was found. The field of instability for such bilayer structure was calculated for NbTi superconductor. An increase of the field of the first flux jump by about 60% has been found for optimal coating thickness.

The problem of the critical state stability of a bilayer type-II superconductor, whose layers have different physical properties (critical current density, specific heat, and critical temperature) was solved. The optimal thickness for the outer layer was found, which results in a maximal increase in the stability threshold—the magnetic field at which the first thermomagnetic avalanche occurs (the jump of the magnetic flux and other physical properties). The calculations were performed for a Nb_3Sn superconductor coated with a

layer of NbTi. It is shown that by choosing the optimum coating thickness, the stability threshold of the magnetic field increases by more than 60 %.

In the event of instability of a critical state in a superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ single crystal and filling it with magnetic flux, an induction-current model of the inversion of the magnetic moment of the sample is proposed, a transformation of the induction pattern in the material due to a giant thermomagnetic avalanche is schematically constructed.

We emulate rough magnetic flux fronts and induction contours in a long hard type-II superconducting cylinder, using the elliptic critical-state model. Specifically, using a current density with spatial periodicity we perform numerical calculations to obtain magnetic induction distributions of the sample in screened and trapped flux regimes. We found that tuning the parameters of our model it is possible to achieve different roughening levels at the flux front as well as at the flux profiles behind it, complex current circulation paths, the formation of Meissner state islands or cavities, and the so-called remagnetization fronts.

The fine structure of huge thermomagnetic flux jumps in V_3Si single crystal was analyzed in detail. Structure of avalanches consists of several hundreds of microavalanches. The magnitude of the flux of the microavalanches and their duration were determined. The histograms of the distribution of microflux jumps magnitudes are plotted (the number of microavalanches as a function of the outgoing flux size) for different temperatures. The role of microstructure pinning centers was discussed on the assumption that microavalanches are jumps of flux bundles. In such case, fine structure of the avalanche can characterize the parameters of the pinning centers (size, number of pinned vortices, etc.).

During the last decade registration and manipulation of single vortex lines in bulk superconductors have been investigated with the aid of experimental techniques. Electrodynamical response of pinned vortices in high frequency range allows studying some of their characteristic. In the submitted survey the analysis of the problem of contemporary status of the single Abrikosov vortex oscillation in type II superconductors has been performed. The solutions of the free and forced oscillations of the single elastic vortex line have been analyzed considering different affecting on movement forces: pinning, elasticity, viscosity and Lorenz force. Also vortex inert properties due to the different mechanisms of massiveness have been taken into account. The nature and magnitude of the vortex effective mass caused by some of them are discussed in the paper. The roles of every force and inert in the free oscillation spectrum have been detailed investigated. In De Gennes and Matricon mode (about megahertz) with parabolic dispersion dependence and considering the pinning force an activation threshold appears. The account of the effective vortex mass in the equation of motion leads to the occurrence of high-frequency mode (about terahertz) in the oscillation spectrum which also has an activation character. Estimations of the characteristic frequencies for these modes have

been given for two widespread superconductors (NbTi and anisotropic YBaCuO material). The paper also presents the features of the resonant behavior of elastic massive vortex line arising under the influence of the external driving uniform damped into the sample depth harmonic force taking into account all the forces mentioned above. The frequency and temperature dependences of the energy absorption by the vortex line have been analyzed. Maximum absorption in the low-frequency mode corresponds to the threshold frequency, in the high-frequency mode one corresponds to the cyclotron frequency of the vortex. At the end the single vortices manipulation experiments and vortex dynamics simulation have been considered.

The trajectories of motion of an isolated Abrikosov vortex in the anisotropic YBa₂Cu₃O₇ superconductor under the influence of an external periodic force, damping into the sample, were constructed and analyzed, taking into account the inert properties of the vortex and the forces acting on it: pinning, Lorentz, elasticity and viscosity. The hierarchy of the influence of various forces in a wide frequency range (~ 1 THz) of the driving force on the shape and size of the trajectory is established. The calculated energy absorption by the vortex, as a function of frequency, taking into account the effective mass of the vortex, has resonant peaks: one at low frequency associated with the de Gennes and Matricon mode, the second high frequency. The differences, manifested in the manifestation of vortex-induced oscillations for different field orientations in YBa₂Cu₃O₇ and for the isotropic low temperature superconductor NbTi, are analyzed.

Keywords: superconductivity, hard type II superconductors, magnetization dynamics, critical state stability, thermomagnetic avalanches, flux pinning, vortex dynamics, flux jump.

Підписано до друку 24.02.2021. Ум. друк. арк. 0,9.
Формат 60х90 1/16. Папір офсетний.
Друк різнографічний
Кількість умовних друкованих аркушів 0,9
Тираж 100 екз. Замовлення №12568
Ліцензія від 10.11.2019 2 063 000 0000 012219
Надруковано в поліграфії «КРІ print»,
За адресою м. Київ, пров. Політехнічний 1/33

