

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Чумака Олександра Миколайовича

«Нестійкість змішаного стану жорстких надпровідників

та особливості динаміки магнітного потоку»,

поданої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 - магнетизм

Актуальність теми. Електродинамічні властивості надпровідників II-го роду в змішаному стані зазвичай досить добре описуються в рамках т.з. моделі критичного стану. Згідно цієї моделі, зразок охолоджений у нульовому магнітному полі до температур, нижчих за критичну температуру T_c , а потім підданий впливу поступово зростаючого із часом зовнішнього магнітного поля H_a , переходить у стан із бездисипативним поверхневим критичним струмом густини j_c . Цей струм протікає в поверхневому шарі, товщина якого визначається величиною зовнішнього магнітного поля. Магнітний потік входить у цей шар у вигляді вихорів Абрикосова. В той же час, у внутрішній частині зразка, куди магнітний потік не проникає, екрануючий струм дорівнює нулю (для довгих пластин або циліндрів у паралельному магнітному полі – т.з. «паралельна геометрія» експерименту), або його густина менша за критичне значення j_c і обертається у нуль у центрі (для зразка у формі тонкої пластини або плівки в перпендикулярному магнітному полі – т.з. «перпендикулярна геометрія» експерименту). При цьому, величина критичного струму визначається пінінгом абрикосовських вихорів, і у сучасних надпровідних матеріалах, які використовуються для струмонесучих електротехнічних елементів (наприклад плівок або покриттів, виготовлених з високотемпературних купратів (RE)BCO) може сягати дуже високих значень: $j_c(78K) \sim 10^6 \text{ A/cm}^2$. Модель критичного стану досить успішно застосовується для розрахунків профілів та квазістаціонарної динаміки магнітного потоку і кількісного опису результатів відповідних експериментів. Однак, за певних умов, критичний стан може руйнуватися, і магнітний потік може входити всередину зразка з поверхневого шару у вигляді лавин магнітного потоку. Об'єктом дослідження даної дисертації є саме критичний стан жорстких надпровідників другого роду, його стійкість по відношенню до виникнення термомагнітних нестійкостей, які є основною причиною зниження струмонесучої здатності жорстких надпровідників, фізика магнітного потоку та наноб'єкти надпровідного стану – вихори Абрикосова. Тема дослідження є **актуальною** – як з точки зору фундаментальних питань фізики вихорів

Абрикосова, а саме їх динаміки і пінінгу, так і для прикладної надпровідності – створення магнітних екранів, надпровідних роторів та застосування об'ємних надпровідників як "постійних" магнітів.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5-ти розділів, висновків, списку використаних джерел зі 141 найменування. Вона містить 27 рисунків і викладена на 125 сторінках.

В **першому розділі** наведено огляд літератури з питань стійкості критичного стану у жорстких надпровідниках II роду, умови виникнення термомагнітної нестійкості критичного стану та його властивості.

Другий розділ дисертації присвячений теоретичному розгляду двошарового надпровідника, шари якого складаються з різних надпровідних матеріалів. В першій частині впроваджено модель, в якій зовнішній шар і об'єм надпровідника відрізняються за значеннями густини критичного струму. В другій частині модель було модифіковано з метою кращого наближення до реальних матеріалів, а саме впроваджено різні теплові та провідні властивості, та критичні температури. В обох випадках була досліджена можливість оптимізації та проведені розрахунки стабільності критичного стану відповідних надпровідних конструкцій ($NbTi(1) + NbTi(2)$ та $Nb_3Sn + NbTi$).

У **третьому розділі** з використанням еліптичної моделі критичного стану розглянуто критичний стан надпровідників у режимі екранування та захоплення магнітного потоку з шорстким фронтом проникнення. Спочатку було впроваджено еліптичну модель, що дозволяє описати класичні випадки, яку далі було модифіковано за допомогою введення відхилення густини критичного струму, що дозволило представити шорсткий фронт проникнення магнітного потоку, який більш відповідає експериментальним дослідженням.

Четвертий розділ присвячений дослідженню явища динамічної інверсії магнітного моменту надпровідника внаслідок термомагнітної нестійкості критичного стану та побудові моделі, що якісно його описує. Спочатку було детально представлено умови та хід експерименту, проведеного зі зразком монокристалічного $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, докладний аналіз якого дозволив побудувати модель динамічної інверсії магнітного моменту.

П'ятий розділ присвячений вивченню коливань ізольованого вихору Абрикосова. Це найбільший за обсягом розділ, в першій частині якого була досліджена динаміка вихору з урахуванням його інерційних властивостей, а в другій частині також вплив на його рух зовнішньої періодичної сили, що затухає вглиб зразка. Було проведено аналіз вимушених коливань ізольованого вихору Абрикосова у широкому діапазоні частот, побудована математична модель, що дозволяє описати коливальний рух та траєкторії масивного

ізолюваного вихору Абрикосова, враховуючи усі сили, що діють на вихор у надпровіднику. Результати було застосовано для встановлення ієрархії впливу сил, що діють на вихор.

Основні наукові результати та їх новизна. Автору вдалося отримати ряд важливих **нових** результатів стосовно дослідження нестійкості критичного стану жорстких надпровідників, динаміки і структури фронту магнітного потоку у надпровідниках та динаміки ізолюваного вихору Абрикосова, а саме:

1. Вперше отримано аналітичний критерій стійкості критичного стану двошарового жорсткого надпровідника другого роду, шари якого мають різні фізичні характеристики. Шляхом вибору оптимальної товщини відповідного покриття 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. За допомогою концепції критичного стану була вперше побудована наочна індукційно-струмова модель інверсії повного магнітного моменту, що спостерігалася в експерименті на об'ємному надпровідному монокристалі $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$.

4. Отримано аналітичні рішення системи рівнянь, які описують вимушені коливання ізолюваного 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.

5. 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.

Достовірність наукових результатів і висновків дисертаційної роботи О.М. Чумака забезпечується використанням науково обґрунтованих теоретичних та експериментальних методів, публікаціями у провідних

міжнародних рецензованих наукових виданнях, які входять до наукометричних баз даних Scopus та WoS, узгодженістю отриманих результатів, у відповідних випадках, із результатами інших дослідників з провідних наукових лабораторій світу. Сформульовані висновки є цілком обґрунтованими і підкріплені експериментами. Вони відповідають поставленій меті роботи.

Практична значимість результатів даної роботи полягає у можливості передбачення поведінки жорстких надпровідників у зовнішньому змінному магнітному полі, встановленні критеріїв для підвищення стійкості роботи магнітних надпровідних систем, розширенні уявлень про динаміку магнітного потоку та вихорів Абрикосова у жорстких надпровідниках, що є суттєвою складовою фізики змішаного стану у надпровідниках із сильними центрами пінінгу вихорів. Результати досліджень можуть бути також корисними дослідникам, які займаються розробкою сучасних технологій отримання надпровідних виробів та деталей.

Матеріали дисертації достатньо повно опубліковані у 6 статтях у фахових виданнях, які входять до наукометричних баз даних Scopus та WoS і представлені у 9 доповідях на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях.

Зауваження та побажання.

Стосовно змісту даної дисертаційної роботи і отриманих результатів можна висловити наступні зауваження та побажання:

1. Бажано було б промодельовати, або хоча б оцінити, вплив просторової неоднорідності критичного струму на стійкість критичного стану у двошаровій структурі, дослідженій у 2-му розділі роботи.

2. У 2-му та 3-му розділах дисертації варто було б дослідити вплив шорсткості поверхні зразка на шорсткість фронту магнітного потоку всередині надпровідника.

3. В 4-му розділі індукційно-струмова модель інверсії магнітного потоку обговорюється лише на якісному рівні. Бажано було б розвинути, хоча б у спрощеному вигляді, математичний опис цієї моделі, з якого б слідували динамічні характеристики обговорюваного ефекту.

4. В 5-му розділі на рисунках 5.3, 5.4 наведені чисельні залежності НВЧ потужності поглинання вихором від координати та частоти. Але не зрозуміло, для якого матеріалу і при яких значеннях параметрів це було обчислено.

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи О.М. Чумака і не зменшують загальної наукової цінності отриманих результатів.

Представлена дисертаційна робота Чумака О.М. виконана на високому науковому рівні та є закінченим науковим дослідженням, яке містить актуальні нові наукові результати. Текст автореферату повністю відображає основний зміст дисертації. Матеріали дисертаційної роботи Чумака О.М., її висновки та результати достатньо повно опубліковані у фахових наукових виданнях та представлені доповідями на наукових конференціях.

Враховуючи високий рівень досліджень, актуальність, новизну, практичну цінність отриманих результатів та відповідність роботи спеціальності 01.04.11 – магнетизм, вважаю, що дисертація **Чумака О. М. «Нестійкість змішаного стану жорстких надпровідників та особливості динаміки магнітного потоку»**, повністю задовольняє вимогам чинного законодавства України щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук, а її автор **Чумак Олександр Миколайович** заслуговує присвоєння йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм.

Офіційний опонент, провідний науковий
Співробітник відділу надпровідності Інституту
металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
доктор фізико-математичних наук

О.Л. Касаткін

Підпис д.ф.-м.н. О.Л. Касаткіна засвідчую.

Учений секретар Інституту металофізики
ім. Г.В. Курдюмова НАН України
кандидат фізико-математичних наук



М.І. Савчук