

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 фахом 01.04.11 - магнетизм

Актуальність. Метою дисертаційної роботи Чумака О.М. є вивчення квазістатичних і динамічних процесів, обумовлених проникненням магнітного поля в ніобій, ніобієві сполуки та металооксидні сполуки при низьких температурах. Зокрема, в дисертаційній роботі досліджені, проаналізовані й пояснені складні процеси, які виникають внаслідок термомагнітних нестійкостей критичного стану надпровідних матеріалів під дією змінних зовнішнього магнітного поля й температури.

Матеріали, які досліджуються, відносяться до жорстких надпровідників другого роду, що мають широке практичне застосування. Однак термомагнітні нестійкості, які можуть зруйнувати критичний стан і призвести до виникнення лавини магнітного потоку й, як наслідок, до переходу надпровідника в нормальний (резистивний) стан, суттєво обмежують високоструміві технічні застосування надпровідних матеріалів. Термомагнітні нестійкості проявляються у вигляді гігантських стрибків опору, магнітного потоку, намагніченості, магнітострикції й інших характеристик матеріалів. У роботі з'ясовані основні закономірності явищ, що виникають безпосередньо перед розвитком, у процесі просування лавини в товщі зразка та відразу після неї. Аналіз проводився в режимах екранування й захвату потоку. Такий підхід безсумнівно становить інтерес для з'ясування механізмів зародження й розвитку термомагнітних нестійкостей, а отже, і шляхів запобігання руйнуванню критичного стану. Вивчення термомагнітних лавин має також важливе фундаментальне значення для дослідження процесів екранування надпровідниками магнітного поля. Отже, можна стверджувати, що тема наукових досліджень дисертаційної роботи Чумака О.М., є актуальною як з фундаментальної, так і з прикладної точок зору. Виконання роботи проводилося в рамках міжнародних наукових програм Національної академії наук України та спільних наукових проектів з Інститутом фізики Польської академії наук, та з Автономним університетом, Пуебла, Мексика.

Достовірність отриманих у дисертації розрахункових результатів забезпечується використанням добре перевірених пакетів програмного забезпечення; надпровідні матеріали експериментально досліджені на апаратурі високої точності науково обґрунтованими і перевіреними в лабораторіях світу експериментальними методами. Отримані у роботі результати та зроблені висновки добре корелюють з відомими в літературі уявленнями про досліджені фізичні явища.

Основні результати досліджень були опубліковані у 6 статтях у фахових міжнародних періодичних наукових виданнях, що входять до наукометричних

баз SCOPUS та WoS і були широко (9 тез доповідей) представлені на вітчизняних і міжнародних наукових конференціях.

Новизна й практична цінність дисертації обумовлюється, насамперед, отриманими в роботі оригінальними результатами, чітко сформульованими висновками й узагальненнями. У роботі отримано ряд нових науково обґрунтованих результатів.

До числа найбільш важливих результатів, отриманих на основі теоретичного вивчення та проведених експериментів слід віднести наступні:

1. На підставі розв'язку рівнянь Максвела для двошарових надпровідників з різними фізичними параметрами шарів отримано новий аналітичний критерій стійкості, що дозволило оптимізувати (збільшити) поріг нестійкості надпровідного стану. Зокрема, для надпровідника Nb_3Sn , покритого шаром $NbTi$, магнітне поле першої термомагнітної лавини зростає більш ніж у півтора рази.

2. З метою відтворити існуючі у літературі експериментальні спостереження, вперше змодельовані неоднорідні фронти проникнення магнітного потоку в надпровідник та контури індукції з різним рівнем шорсткості. Розрахунки для режимів екранування зовнішнього поля та захоплення магнітного потоку зроблені з використанням еліптичної моделі критичного стану С. Romero-Salazar. В роботі також продемонстровано виникнення островів мейснерівського стану. Таке моделювання дозволить в майбутньому отримати критерій стійкості критичного стану для надпровідників з шорстким фронтом проникнення магнітного поля.

3. Вперше отримано аналітичні розв'язки системи рівнянь, які описують вимушені коливання ізольованого вихору Абрикосова під дією зовнішньої періодичної сили з урахуванням ефективної маси вихору та сил, які на нього діють: пінінгу, Лоренца, пружності та в'язкості. Побудовано та проаналізовано траєкторії руху вихору Абрикосова для фізичних параметрів надпровідника $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ у двох орієнтаціях зовнішнього поля відносно кристалічної осі. Встановлена ієрархія діючих сил у частотному діапазоні до 1 ТГц. На низьких частотах (до 500 МГц) Найбільший вплив на динаміку вихору має сила його пружності, вище 1 ГГц – сила Лоренца, інерційність вихору визначає його траєкторію на частотах вище 100 ГГц.

4. В рамках концепції критичного стану Біна була *вперше* побудована наочна індукційно-струмова модель-схема інверсії повного магнітного моменту, що спостерігалася в експерименті на об'ємному надпровідному монокристалі $YBa_2Cu_3O_{7-8}$. Спостереження та розуміння цього явища є важливим для застосування об'ємних надпровідників як «постійних» магнітів, наприклад, у надпровідних електричних двигунах та левітаційних пристроях тощо.

Отримані результати доповнюють і розширюють наявні уявлення про фізичні явища, що виникають в процесі входження магнітного потоку й перетворенні критичного стану жорстких надпровідників другого роду. Крім того, вони можуть бути використані при проектуванні приладів з

використанням надпровідних елементів: для потреб енергетики, транспорту, а також для наукових досліджень.

Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, і списку літератури зі 141 найменувань. Вона викладена на 125 сторінках машинописного тексту, що включають 27 рисунків та 3 таблиці. В кожному розділі своя нумерація параграфів, пунктів, формул і рисунків.

У вступі досить повно обґрунтовано вибір тематики й сформульовані цілі й завдання досліджень, показані актуальність, наукова новизна, практична цінність роботи, зазначений особистий внесок автора, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами й вказано, де проведена апробація результатів дослідження.

У списку літератури досить широко представлені літературні дані, опубліковані в провідних журналах світу, в тому числі й роботи, які вийшли останнім часом, що свідчить про те, що дисертант добре орієнтується у літературі з даної тематики.

В першому розділі представлено аналіз сучасного стану проблеми пов'язаної з термомагнітною нестійкістю жорстких надпровідників II роду, та лавинною динамікою магнітного потоку, яка є наслідком цієї нестійкості. Проаналізовані відомі механізми виникнення стрибків потоку й способи запобігання такому сценарію розвитку подій. Детально розглянута лавинна динаміка магнітного потоку у об'ємних надпровідниках, порожнистих циліндрах (екранах) та з'ясовано роль фактору розмагнічування. Важливо зазначити, що дослідження проведені з урахуванням магнітної передісторії стану матеріалів. На підставі представленого аналізу сформульовані наукові проблеми й завдання, які були вирішені під час виконання дисертаційної роботи.

В другому розділі розглянуто проблему стійкості двошарового жорсткого надпровідника з різною критичною густиною струму внутрішньої частини та покриття. Отримано критерій стійкості критичного стану для двошарового надпровідника. Стійкість надпровідних властивостей сильно залежить від товщини покриття та від співвідношення критичних густин струмів. Використовуючи покриття з меншою густиною струму, отримано збільшення поля першого стрибка потоку, а також критичні розміри надпровідних елементів. Встановлено оптимальну товщину поверхневого шару, що дозволяє максимально збільшити стійкість критичного стану двошарових структур для надпровідників на основі ніобію.

Третій розділ присвячений комп'ютерному моделюванню жорсткого фронту магнітного потоку в циліндрі з жорсткого надпровідника II роду з використанням залученої з літератури еліптичної моделі критичного стану. Зокрема, за рахунок використання густини струму з просторовою періодичністю, чисельними розрахунками отримано розподіл індукції магнітного поля близький до того, який спостерігається в зразках реальних матеріалів в режимах екранування і захоплення магнітного потоку. Моделювання, через управління параметрами задачі, дозволяє досягти різних рівнів жорсткості на профілі фронту потоку, а також отримати на фронті і за

ним складні траєкторії циркуляції критичного струму, побачити утворення острівців або порожнин мейснерівського стану, відтворювати картини фронтів, пов'язаних із границями перемагнічування всередині надпровідника. Важливою особливістю сформульованої моделі є можливість її використання для аналізу стійкості критичного стану (стійкості експлуатаційних параметрів) надпровідників для їх практичного застосування в сильних магнітних полях. Натомість, досі наявні уявлення про стійкість критичного стану засновані на аналізі тільки примітивної (далекої від реальності) ситуації – плаского фронту магнітного потоку, який проникає в надпровідник.

У четвертому розділі вперше запропонована модель-схема інверсії магнітного моменту, що проявляється як стрибок між двома метастабільними станами надпровідника. Модель представлена в термінах критичного стану Біна з відповідною еволюцією просторового розподілу критичного струму. Інверсія моменту з метастабільного стану захоплення магнітного потоку в стан з таким же за величиною моментом, але орієнтованим в протилежному напрямку, спостерігається при термомагнітному лавинному процесі в надпровідному монокристалі $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Це явище реалізується в системі без теплового контакту між зразком і навколишнім середовищем, тобто практично в квазіадіабатичних умовах. Виникнення такого явища має велике значення для застосувань об'ємного надпровідника в якості своєрідного «постійного» магніту, наприклад, у надпровідних левітаційних пристроях, тощо.

В п'ятому розділі презентовано двовимірне моделювання вихрових траєкторій. Як відомо, надпровідники другого роду у змішаному стані містять квантовані вихори Абрикосова. Траєкторії руху ізольованого вихору в анізотропному надпровіднику (з параметрами, які відповідають оксиду YBaCuO) під дією зовнішньої періодичної сили, яка згасає вглиб зразка, побудовано з урахуванням ефективної маси вихору і сил, що діють на нього: піннінгу, Лоренца, пружності і в'язкості. Встановлено ієрархію впливів різних сил у широкому діапазоні частот (до ~ 1 ТГц) зовнішнього чинника на форму й розмір траєкторії. Отримані дані дозволяють якісно пояснити експериментальні результати маніпуляцій поодиноким вихором, які досліджувались експериментально (Auslaender O. M. et al, Nature Physics, 2009) за допомогою магнітно-силової мікроскопії.

В розділі також розглянуто поглинання енергії вихором як функція частоти. Залежність поглинання має два резонансних піки, які відповідають низько- і високочастотній модам спектру коливань. Перша – відповідає моді de Gennes та Matricon, друга пов'язана з інертністю вихору. Проаналізовано також відмінності в прояві вимушених коливань вихору для різних орієнтацій поля в анізотропному YBaCuO та ізотропному низькотемпературному надпровіднику NbTi .

По змісту дисертаційної роботи Чумака О.М. є **зауваження**:

1. В дуже важливій задачі про проходження шорсткого магнітного фронту вглиб зразка не проаналізовано, чи є дендритна структура однозначно обумовленою дефектністю та складом матеріалу надпровідника, чи в кожному

конкретному експерименті на тому ж зразку виникає інша, хоча й подібна картина розподілу магнітного потоку. Такий аналіз був би цікавим з точки зору залежності або незалежності явища від невеликих збурень початкових значень.

2. Не зроблена оцінка теплового потоку внаслідок існування механічного контакту між зразком та тримачем.

3. У тексті дисертації є деякі стилістичні неточності та друкарські помилки. Наприклад, замість «ліміт» треба вживати слово «границя», а замість «держак» – «тримач». Сполучення «повільно мінливих процесів», «грубих фронтів» є наслідком неправильного перекладу з англійської.

Загальний висновок. Незважаючи на зазначені несуттєві недоліки, представлена дисертаційна робота в цілому є закінченим цікавим дослідженням, яке виконано на високому сучасному науковому рівні. Автореферат правильно і повною мірою відображає зміст дисертації. Основні результати представлені в 15 публікаціях, серед яких 6 статей у наукових журналах. Робота пройшла апробацію на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях. Результати, отримані автором, добре відомі фахівцям в області фізики магнетизму та надпровідності, які активно працюють у даній області не тільки в Україні, але й за її межами. Отримані автором дисертації результати можуть бути використані в таких провідних наукових організаціях як ФТІНТ ім. Б. І. Веркина НАН України (м. Харків), КНУ ім. Тараса Шевченка (м. Київ), Інститут магнетизму МОН і НАН України (м. Київ), Інститут фізики Польської академії наук (м. Варшава, Польща) і інших установах, а також при підготовці спецкурсів для студентів і аспірантів, котрі спеціалізуються в області фізики магнетизму та надпровідності.

За обсягом виконаних досліджень, їх актуальності, новизни й практичної цінності отриманих результатів, дисертаційна робота Чумака О.М. «Нестійкість змішаного стану жорстких надпровідників та особливості динаміки магнітного потоку» поза сумнівом задовольняє всі вимоги Департаменту атестації кадрів МОН України, які висувуються до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук, а її автор **Чумак Олександр Миколайович** заслуговує присудження йому вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за фахом 01.04.11 - магнетизм.

Провідний науковий співробітник
Інституту фізики НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник



О. М. Габович

Підпис О. М. Габовича засвідчую:

Вчений секретар
Інституту фізики НАН України
Кандидат фізико-математичних наук



 В.С. Манжара