

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Косогор Анни Олексіївни «*Теорія фероеластичних фазових переходів у кристалах з дефектами*», представлена на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Мартенситні фазові переходи активно вивчаються науковцями вже не перше десятиріччя. Але, не зважаючи на це, тут все ще залишається певне коло невирішених питань як фундаментального, так і прикладного характеру. Сьогодні фундаментальні дослідження в цій області стимулюються різноманітними практичними потребами, важливим з точки зору стабільності та ефективності роботи пристройів, що функціонують на основі гігантського магнітокалоричного ефекту та велетенської безгістерезісної деформації. Дисертаційна робота Косогор А.О. саме і присвячена розробці термодинамічної теорії, яка надала би можливість розрахувати величину фізичних ефектів при фероеластичних фазових перетвореннях у реальних кристалічних твердих тілах з врахуванням симетрії кристалічної комірки та дефектів в ній.

Роботи, що увійшли до дисертації, виконувалися в рамках тематичного плану науково-дослідних робіт відділу теорії магнітних явищ та магнітної динаміки конденсованих середовищ Інституту магнетизму НАН і МОН України та гранту Президента України для молодих вчених.

Дисертація складається зі Вступу, семи розділів, Висновків, Списку використаних джерел (по кожному розділу) та Додатка. Повний обсяг дисертації – 309 сторінок. Дисертація містить 9 таблиць та 80 рисунків.

Метою дисертаційної роботи є теоретичне пояснення та кількісні розрахунки фізичних ефектів, пов'язаних з фероеластичними фазовими переходами у сплавах з ефектом пам'яті форми та підсистемі водню в металах, і обумовлені точковими кристалічними дефектами та їх просторовою реконфігурацією через процеси дифузії в кристалі. В дисертації розроблена симетрійно-узгоджена теорія фероеластичних фазових переходів, яка виходить з розкладу термодинамічного потенціалу за степенями параметру порядку фазового переходу. Важливою особливістю запропонованої теорії є її кількісний характер, завдяки чого авторові вдалося врахувати індивідуальні особливості різних сплавів з ефектом пам'яті форми.

Результати теорії базуються на розкладенні термодинамічного потенціалу за ступенями багатокомпонентного параметру порядку. Традиційно теорія Ландау сприймається як теорія, яка описує фізичні явища на якісному рівні, але в дисертаційній роботі показано, як за допомогою теорії Ландау можна кількісно описати мартенситні перетворення в реальних сплавах (в тому числі магнітних). Особливістю є те, що модельні результати отримані з врахуванням експериментальних значень фізичних параметрів, притаманних досліджуваним сплавам. Так, наприклад, у багатьох випадках стан підсистеми дефектів змінюється у часі завдяки процесам дифузії і, як показано в роботі, врахування цих змін є дуже важливим. Продемонстровано кількісне узгодження теоретичних результатів з відповідними експериментальними даними. У такий спосіб забезпечена достовірність результатів дисертації.

Наведу приклади найбільш цікавих, на мій погляд, результатів дисертаційної роботи.

1. Встановлено залежність коефіцієнтів розкладення потенціалу Гіббса за ступенями параметру порядку від внутрішнього тиску, спричиненого дефектами кристалічної гратки, що надає можливість кількісного теоретичного опису впливу дефектів на практично важливі фізичні ефекти, що спостерігаються у фероеластичних сплавах. Визначено величину відповідних коефіцієнтів розкладу потенціалу Гіббса для сплавів Ni-Mn-Ga, Ti-Ni, Cu-Al-Ni та Ni-Fe(Co)-Ga.

2. Виявлено та кількісно досліджено два різних режими деформації сплавів з ефектами пам'яті форми. А саме: (i) надпружну деформацію внаслідок індукованого механічним напруженням мартенситного перетворення та (ii) нелінійну деформацію сплаву у відсутності мартенситного перетворення, що спостерігається при перевищенні критичних значень температури або напруження, які відповідають критичній точці на фазовій діаграмі. Показано, що перехід до закритичного режиму деформації супроводжується кількаразовим звуженням гістерезису деформаційних петель. Передбачено, що сплави з ефектами пам'яті форми і низькими значеннями пружного модуля є кандидатами на спостереження великих (до 10%) деформацій з вузьким гістерезисом. Це теоретичне передбачення було потім підтверджено експериментами.

3. Кількісний теоретичний аналіз температурної та часової залежності пружніх модулів сплаву Cu-Al-Ni показав, що експериментально спостережене поступове збільшення їх під час старіння мартенситу з точністю до 1% описується теорією з двома різними часовими параметрами, а саме, часами релаксації внутрішніх аксіальних напружень та часами релаксації тиску до значень, що відповідають мінімуму потенціалу Гіббса кристала з дефектами.

4. Показано, що циклічна деформація феромагнітних сплавів з ефектами пам'яті форми може до 4-х разів збільшити магнітострікцію зістареного феромагнітного мартенситу внаслідок зменшення пружного модулю зсуву. Розраховано теоретичну залежність магнітострікції від температури, яка дозволила пояснити експерименти, згідно яких порогове магнітне поле, що викликає рух двійникових меж з високою рухомістю практично не залежить від температури, а для меж з більш низькою рухомістю порогове поле критично залежить від температури сплаву.

5. Використовуючи розкладення потенціалу Гіббса за ступенями складових тензора деформації та вектору намагніченості показано, що:

(i) магнітна підсистема феромагнітних сплавів з ефектами пам'яті форми дає основний внесок до теплоти мартенситного перетворення, яке проходить у феромагнітному стані поблизу температури Кюрі;

(ii) підвищені (~15 Дж/гр) значення теплоти мартенситного перетворення сплавів Ni-Mn-Ga, яке відбувається в парамагнітному стані, зумовлені великими (~20%) деформаціями МП;

(iii) магнітна та немагнітна частини теплоємності метамагнітних сплавів з ефектами пам'яті форми мають одинаковий порядок величини і отримання правильної величини оберненого магнітокалоричного ефекту у метамагнітних сплавів з ефектами пам'яті форми потребує врахування обох вказаних вище частин теплоємності.

Результати роботи є обґрунтованими та достовірними. Автором продемонстровано кількісне узгодження отриманих теоретичних результатів з відповідними

експериментальними даними. У такий спосіб забезпечена достовірність результатів дисертації. Слід відзначити також, що основні результати роботи пройшли апробацію на міжнародних наукових конференціях та семінарах.

Наукове та практичне значення результатів достатньо вагоме. З фундаментальної точки зору, сукупність отриманих у дисертаційній роботі результатів являє собою значний внесок у теорію фазових переходів у реальних твердих тілах і, зокрема, фероеластичних фазових переходів у кристалах з дефектами. З практичної точки зору, важливим є питання щодо прояви впливу дефектів на температуру зворотних мартенситних перетворень, збільшення порогового механічного напруження, появу гумоподібної поведінки, збільшення величини пружного модуля з часом, тощо. Саме на ці питання і надано відповіді в дисертації.

В цілому, робота справляє позитивне враження. Дисертація добре написана і оформленена, хоча є і недоліки. Серед зауважень до роботи відзначаю наступні.

1. Почну з загального. Як вже відзначалось, в дисертаційної роботі надані як теоретичні пояснення, так і кількісні розрахунки фізичних ефектів, пов'язаних з фероеластичними фазовими переходами у сплавах з ефектом пам'яті форми та підсистемі водню в металах, та обумовленими точковими кристалічними дефектами та їх просторовою реконфігурацією через процеси дифузії. Але в реальному твердому тілі існують дефекти і іншого типу, наприклад, дислокації, пори, включення домішкових фаз і таке інше. Яка їх роль у фероеластичних фазових переходах? Як вони впливають ефекти, що обговорюються? Бажано і важливо було би надати оцінку їх внескам, особливо коли ми претендуємо на кількісні розрахунки фізичних ефектів.

2. Є зауваження і щодо результату 4, що виносиється на захист. Сформульовано це так (друга половина результату 4): « ... Як з'ясувалося, якщо магнітострикційна деформація, необхідна для початку руху двійникованих меж, дорівнює за порядком величини  $10^{-6}$ , то порогове поле слабко залежить від температури і рух двійникових меж спостерігається до надзвичайно низьких температур ( $\sim 1.7$  К). Якщо ж порогова деформація є порядку  $10^{-4}$ , то порогове поле сильно залежить від температури та рух двійникових меж можна спостерігати лише в інтервалі температур  $\sim 70$  К нижче температури мартенситного перетворення.» (Підкреслено мною.)

Вказані абсолютні значення. З точки зору теорії, з чим порівнювати величину деформації? Що є критерієм «мала/велика»? З яким параметром?

3. Це саме зауваження є і до висновку 2. Сформульовано це так: « ... Передбачено, що СЕПФ з низькими значеннями пружного модуля є кандидатами на спостереження великих (до 10%) деформацій з вузьким ( $\sim 1\text{--}5$  МПа) гістерезисом.»

Що означає «низькі значення пружного модуля»? З яким параметром/критерієм? Для теорії важливим є критерій «малості».

4. Формула (7.17):  $T_c(H) = T_c(0) + H^{2/3} \Delta T$ , де  $\Delta T = 10$  К/Т, і далі рисунок 7.2, де наведено данні експерименту та теоретична залежність (7.17). Не зрозуміло як з розмірністю? Магнітне поле – у Теслах, температура – у Кельвінах ?

Втім, зазначені вище зауваження не впливають на достовірність наукових положень і загальну позитивну оцінку представленої до захисту дисертаційної роботи. Деякі з них слід розглядати як побажання автору для його майбутньої роботи.

Оформлення та зміст дисертації відповідає вимогам ВАК України. Результати дисертації адекватно відображені у достатній кількості публікацій і неодноразово обговорювалися на наукових симпозіумах та конференціях.

На мій погляд, автореферат достатній мірі відображає основні результати дисертації та положення, що виносяться на захист, хоча й він містить деякі недоліки. Так, наприклад, на с. 19 наведена формула (9):  $\sigma^* = (8/27)C'(T_1)[c(T_2)/a(T_2) - 1]$ . Не надано пояснень щодо параметрів  $c(T_2)$  та  $a(T_2)$ ; що це за параметри?

Мета, задачі та предмет досліджень дисертаційної роботи, методика досліджень, основні наукові положення та висновки роботи відповідають паспорту спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика. В цілому, у дисертації наведено низку нових результатів, які дають можливість краще зрозуміти фундаментальні фізичні властивості фероеластичних фазових переходів у кристалах з дефектами.

Результати, що виносяться на захист, базуються на своєчасно опублікованих автором наукових працях в провідних світових та вітчизняних наукових виданнях. Результати дисертаційної роботи викладено у 21 статті у міжнародних та вітчизняних фахових виданнях, з яких в 3 дисертант є одноосібним автором.

Вважаю, що робота «*Теорія фероеластичних фазових переходів у кристалах з дефектами*» відповідає вимогам ВАК України щодо докторських дисертацій, а її автор, Косогор Анна Олексіївна, заслуговує присудження її наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент,  
доктор фізиго-математичних наук, професор  
заступник директора ДонФТІ ім. О.О. Галкіна НАН України,  
лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки

Криворучко В. М.

