

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Коноплюка Сергія Михайловича
“Магнітні та структурні перетворення в сплавах Гейслера з пам’ятю форми”
подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм

У дисертації Сергія Михайловича Коноплюка вивчені термодинамічні, магнітні та електричні властивості магнітних сплавів з ефектом пам’яті форми.

Актуальність даної роботи зумовлена цілою низкою яскравих фізичних ефектів, притаманних магнітним сплавам Гейслера. Найбільш відомим з цих ефектів є велетенська магнітоіндукована деформація ($\geq 5\%$) у зовнішніх магнітних полях помірної величини ($\sim 1\div 8$ кЕ). Перше спостереження цього ефекту у 1996 р. викликало сплеск кількості наукових публікацій, у яких вивчалися, переважно, феромагнітні сплави Гейслера принадлежні до сімейства Ni-Mn-Ga. Після досконалого вивчення велетенської магнітоіндукованої деформації увага дослідників значною мірою переключилася на такі сплави цього сімейства, у яких відбувається фазовий перехід першого роду з парамагнітної аустенітної фази до феромагнітної мартенситної фази, оскільки в температурному околі такого фазового переходу можливий великий магнітокалоричний ефект. Саме до таких сплавів є близьким за трансформаційними властивостями досліджений у дисертації С. М. Коноплюка сплав Ni_{51.9}Mn₂₇Ga_{21.1}. Іншими об’єктами, що викликають значне зацікавлення дослідників, є сплави Ni-Mn-X (X = Sn, In, Ga), Ni-Mn-In(Co), Ni-Mn-Sn(Fe) та інші. Цим сплавам притаманні магнітоструктурні фазові переходи з феромагнітної аустенітної фази до слабомагнітного мартенситного стану, тому їх називають метамагнітними мартенситними сплавами. У дисертації С. М. Коноплюка вивчені трансформаційні, магнітні та електричні властивості механічно навантажених метамагнітних сплавів Ni-Mn-In та Ni-Mn-In(Co), а отже, і ця частина роботи лежить у світовому руслі досліджень сплавів з ефектом пам’яті форми.

Високий науковий рівень дисертації С. М. Коноплюка стає очевидним вже при читанні її перших розділів, і підтверджується всіма наступними розділами. З цього погляду слід особливо відзначити другий третій та четвертий розділи даної роботи. У другому розділі дисертації дуже докладно викладені особливості виготовлення експериментальних зразків (масивних полікристалів, стрічок, порошків), особливості експериментального обладнання та методика вимірювань. У третьому розділі ретельно співставлені результати вимірювань магнітної сприйнятливості та електричного опору сплаву Ni_{51.9}Mn₂₇Ga_{21.1} і завдяки цьому показано, що фазове перетворення, яке виглядає як магнітоструктурний фа-

зовий перехід, насправді є двома близькими за температурою фазовими переходами – структурним і магнітним. Встановлення цього факту потребувало від автора дисертації надзвичайно високого рівня проведення експериментів і ретельного аналізу отриманих результатів. Стосовно четвертого розділу дисертації слід відзначити логічну доцільність проведених в ньому досліджень: тут спочатку були виміряні величини магнітокалоричного ефекту у різних сплавах Гейслера, визначено, що цей ефект є максимальним для сплаву $Ni_{45.4}Mn_{40.9}In_{13.7}$, і тому, саме для цього сплаву були проведені трудомісткі експерименти по визначенням стабільності його трансформаційних властивостей по відношенню до багаторазового циклічного фазового перетворення. (Така стабільність є важливою передумовою практичного використання магнітокалоричного ефекту). Співставлення результатів вимірювань різних фізичних величин та фізичне пояснення цих результатів забезпечує *довірість* зроблених у дисертації висновків.

Не перелічуючи всі отримані в дисертації нові результати, виокремлюти з них, які, на мою думку, є найбільш важливими в контексті сучасних досліджень магнітних сплавів з ефектом пам'яті форми.

Перш за все, слід відзначити експериментальне спостереження мартенситного перетворення з надзвичайно малим температурним гістерезисом ≈ 2 К у сплаві $Ni_{54}Mn_{24}Ga_{22}$ і висновок про те, що така мала величина гістерезису не корелює з величиною об'ємного ефекту мартенситного переходу. Раніше цілеспрямоване звуження гістерезису мартенситного перетворення було здійснено варіацією хімічного складу сплавів на основі Ti–Ni та було синтезовано сплав Ti–Ni–Cu–Pd з гістерезисом перетворення близько 1 К (R. Zarnetta, et al., Adv. Funct. Mater. **20** (2010) 1917) та було відзначено, що ширина гістерезису не корелює з величиною об'ємного ефекту мартенситного перетворення. Отже, отримані в даній дисертації результати показують, по-перше, що незалежність ширини гістерезису від об'ємного ефекту може бути притаманна дуже різним за хімічним складом сплавам, й по друге, магнітне впорядкування сплаву не призводить до істотного збільшення гістерезису мартенситного перетворення.

Слід особливо відзначити проведені в дисертації систематичні вимірювання магнітокалоричного ефекту у метамагнітних сплавах. Важливість цих вимірювань пов'язана з тим, що автори більшості статей, в яких розглядається даний ефект у сплавах з ефектом пам'яті форми, обмежуються оцінкою величини ефекту з термодинамічного співвідношення Максвела. У той же час, іншими авторами висловлюються обґрунтовані сумніви щодо застосовності співвідношення Максвелла до фазових переходів першого роду (див., наприклад, статтю A. Magnus G. Carvalho, et al., Journal of Alloys and Compounds **509** (2011) 3452), Звідси випливає, що надійного методу теоретичного визначення величини

магнітокалоричного ефекту у метамагнітних сплавах досі не існує. Саме це зумовлює заощідність експериментальних вимірювань цього ефекту, проведених у даній дисертації.

Підсумовуючи оцінку новизни результатів дисертації С. М. Коноплюка, зазначу, що новизна цих результатів та зроблених з них Висновків 1– 4, 6, 7 не викликає в мене сумніву, а для обговорення Висновку 5 доцільно сформулювати зауваження до дисертації.

Зауваження до дисертації.

1. У висновку 5 написано: “Вперше серед метамагнітних сплавів Гейслера в $Ni_{45.4}Mn_{40}In_{14.6}$ спостерігався ефект надпружності за рахунок мартенситного перетворення ініційованого одновісним стисненням.” Насправді, той факт, що метамагнітним сплавам Гейслера притаманний ефект надпружності, є загальновідомим (див., наприклад, Рис. 3 у статті R. Kainuma et al., *Nature*, **439** (2006) 957), а те, що він притаманний саме сплаву вивченому у дисертації не можна вважати *суттєво* новим результатом.
2. У тексті дисертації і Висновку 2 стверджується, що надзвичайна малість ширини гістерезису мартенситного перетворення сплаву $Ni_{54}Mn_{24}Ga_{22}$ зумовлена близькістю температур мартенситного і межмартенситного перетворення. Це твердження, на мою думку, у дисертації обґрунтоване недостатньо. Як показано у заданій вище роботі R. Zarnetta, et al., та низці інших публікацій, маленька ширина гістерезису визначається певною узгодженістю між параметрами кристалічних граток аустенітної та мартенситної фази. У дисертації не проаналізовані співвідношення між гратковими параметрами тих фаз, між якими відбуваються межмартенситне та мартенситне перетворення. Таке порівняння могло б або обґрунтувати, або поставити під сумнів зазначене вище твердження.

Інша можливість зменшення ширини гістерезису мартенситного претворення зумовлена наявністю критичної точки на фазовій діаграмі у площині температура – напруження (див. статтю V. A. Chernenko, V. A. L'vov, S. Kabra, et al., *Phys. Status Solidi B* (2017) 1700273, та посилання в ній). Ця можливість у дисертації також не розглянута.

3. В авторефераті дисертації зазначено, що для досягнення мети дослідження треба було, серед іншого, “дослідити механізм взаємовпливу міжмартенситного, мартенситного і магнітного перетворень при їх протіканні у вузькому температурному інтервалі в сплавах системи Ni-Mn-Ga”. На мою думку, у дисертації встановлено наявність зазначеного впливу і описано, в чому він полягає. Щодо механізму впливу

(механізм має включати до себе фізичні взаємодії, що визначають величину впливу), то він вивчений у дисертації не повною мірою.

Зроблені зауваження стосуються лише невеликої частини результатів дисертації С. М. Коноплюка, і тому, не заважають дати їй загальну високу оцінку. Високий рівень дисертації підтверджується достатньо високим рівнем публікації її матеріалів в українських і Західних фізичних журналах (серед яких Applied Physics Letters, Journal of Applied Physics, Journal of Magnetism and Magnetic Materials) та тим фактом, що статті автора дисертації процитовані у фізичній літературі близько 170 разів, і це надає йому *h*-індекс рівний 6-ти (за даними Scopus).

Результати дисертації неодноразово доповідалися на міжнародних конференціях, що відбувалися в Україні та за її кордонами.

Автореферат достатньо повно відображає зміст дисертації.

На мою думку, дисертаційна робота Сергія Михайловича Коноплюка “Магнітні та структурні перетворення в сплавах Гейслера з пам'яттю форми” задовольняє вимогам до докторських дисертацій, а її автор заслуговує на присвоєння йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм.

Офіційний опонент:

Професор кафедри комп'ютерної інженерії
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
доктор фізико-математичних наук, професор

Левіт

В. А. Львов

Підпис професора В. А. Львова засвідчує,
заступник декана факультету радіофізики,
електроніки та комп'ютерних систем
Київського національного університету імені Тараса Шевченка

О. Ю. Нечипорук

