

## **ВІДГУК**

офіційного опонента

на дисертаційну роботу МОНАСТИРСЬКОГО ГЕННАДІЯ ЄВГЕНОВИЧА  
«Закономірності фазових структурних перетворень в неоднорідних,  
нерівноважних і просторово обмежених станах функціональних матеріалів»  
поданої на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук  
за спеціальністю 01.04.13 – фізика металів

Дисертаційна робота присвячена систематичному дослідженню особливостей мартенситного та інших структурних фазових перетворень в негомогенних, нерівноважних і просторово обмежених станах широкого кола функціональних матеріалів, що включає сплави, які зазнають ефект пам'яті форми (ЕПФ), у тому числі магнітний і високотемпературний, характеризуються надпружністю, високою демпфуючою здатністю та ін.

Відомо, що матеріалам з ЕПФ, отриманим методом лиття, притаманні низька пластичність в полікристалічному стані, незадовільна технологічність, схильність до виділення фаз, що не зазнають ЕПФ, висока вартість окремих компонентів. Це обмежує перспективи їх практичного застосування. Тому, поряд з розробкою нових систем сплавів привабливим є пошук ефективних шляхів одержання нових матеріалів з високим рівнем властивостей.

Одним з підходів до підвищення пластичності є подрібнення мікроструктури шляхом диспергування сплаву з його подальшою консолідацією. Вимога рафінації субструктури та зменшення розмірів прекурсорів, їх використання в свіже отриманому стані (наприклад, в адитивних технологіях) викликає питання про вплив розмірного фактору на мартенситні та інші структурні фазові перетворення. Зокрема, цим зумовлений і зростаючий інтерес до застосування інноваційних методів виготовлення матеріалів для досягнення оптимального співвідношення між функціональними властивостями, технологічністю та механічними характеристиками матеріалів. Застосування методів загартування із рідкого та газоподібного станів,

іскро-плазмового методу консолідації дає можливість створювати в матеріалах негомогенні, нерівноважні, часто просторово обмежені стани. Проте еволюція мікроструктури, фазового складу сплавів з ефектом пам'яті форми в процесі їх диспергування і консолідації, перебіг мартенситного та інших структурних перетворень в диспергованих та консолідованих формах матеріалів є недостатньо висвітленими.

Підкреслюю, що результати, які склали дисертаційну роботу, отримані в рамках перелічених держбюджетних НДР і міжнародних проєктів, що виконані на кафедрі прикладної фізики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Таким чином, враховуючи вище сказане, вважаю, що тема дисертаційної роботи, як її сформульовано у назві, є **безумовно актуальною**.

**Метою дисертаційної роботи** є встановлення і систематизація особливостей структурних фазових переходів в негомогенних, нерівноважних станах, що сформовані в функціональних сплавах в процесі виготовлення традиційними та інноваційними методами, та встановлення впливу розмірного фактору на структурні фазові переходи в цих сплавах.

**Структура дисертації, основні наукові і практичні результати і їх новизна.**

Дисертація Г.С. Монастирського включає анотацію державною та англійською мовами і складається зі вступу, восьми розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел (833 найменувань), а також 33 додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і завдання дослідження, описані наукова новизна і практичне значення одержаних результатів, пропозиції з використання отриманих результатів, зв'язок роботи з науковими темами, предмет і об'єкт дослідження, методи дослідження, вказано особистий внесок здобувача, наведено інформацію щодо апробації одержаних результатів.

Перший розділ має оглядовий характер і свідчить про достатньо глибоке знання автором сучасного стану теоретичних і експериментальних досліджень, присвячених мартенситним перетворенням. Аналіз літератури та діаграм стану дозволив зробити висновок, що разом із термодинамічними параметрами можливість мартенситного перетворення в свіжеотриманих та підданих термообробкам  $\beta$ -сплавах та твердих розчинах визначається такими ключовими хімічними та структурними неоднорідностями, як розподіл легуючих елементів та фаз, дефекти пакування, ступень впорядкованості аустеніту, дефекти кристалічної будови.

У другому розділі досліджено вплив легування ізоелектронними елементами сплавів з ЕПФ на формування під час індукційного та електродугового топлення або термообробок хімічних неоднорідностей у вигляді дендритів, евтектичних, перитектичних та інтерметалічних фаз та їх вплив на перебіг мартенситного перетворення. Показано, що включення інших фаз, розміри яких не перевищують характерних масштабів мартенситної фази, не є перешкодою для росту мартенситу за умови схожості кристалічної структури перешкоди із мартенситною або аустенітною, що передбачає як ізоструктурність, так і близькість параметрів границі.

В третьому розділі розглянуто застосування методу порошкової металургії як способу цілеспрямованого контролю за характеристиками мартенситного перетворення, оскільки формування хімічних та структурних неоднорідностей у природний спосіб під час кристалізації розплаву є слабо контрольованим процесом. Досліджено процес формування градієнтних станів в процесі синтезу елементних порошків Ti, Ni, Zr мікронних розмірів за різних режимів спікання. Показано, що спікання суміші чистих порошків Ti, Ni, Zr дозволяє отримувати матеріали із контрольованою негомогенністю складу та пористості. Це надає можливість контролювати багатостадійність звичайного ефекту пам'яті форми, знак і величину двонаправленого ефекту пам'яті форми в сплавах Ti-Ni-Zr.



Четвертий розділ присвячено первинній характеристиці диспергованих сплавів Ti-Ni-Cu-Zr, Ti-Ni-Hf, Ni-Al, Cu-Al-Ni, Ni-Mn-Ga, Ni, Ti, Zr-Cu-Ti-Al-Ni, отриманих методом об'ємного електроіскрового диспергування (ОЕІД) з використанням в якості діелектричного середовища етанолу та рідких криогенних речовин.

В п'ятому розділі досліджувались фактори, що впливають на механізми формування частинок сплавів, що дисперговані методом ОЕІД в криогенних рідинах, їх структуру і мікроструктуру. Розроблені моделі формування порошків та структуроутворення багатокомпонентних сплавів, а саме первинний і вторинний механізми формування частинок із рідкої фази, наночастинок, порожнистих частинок; з'ясовані механізми трансформації під час нагріву та перебіг мартенситних та супутніх дифузійно контрольованих фазових перетворень в електроіскрових порошках сплавів з ефектом пам'яті форми на основі Ti-Ni, Cu-Al-Ni, Ni-Al, Ni-Mn-Ga.

Шостий розділ присвячений структурним фазовим перетворенням в частинках, диспергованих методом ОЕІД сплавів. Показано, що в частинках Ni-Al та Cu-Al-Ni, менше критичного розміру, структуроутворення мартенситу подібно до фазових переходів другого роду, внаслідок чого мартенситна фаза однієї орієнтації заповнює весь об'єм частинки, не утворюючи окремих доменів або кристалів.

Сьомий розділ присвячено особливостям консолідації порошків, виготовлених із попередньо виплавлених сплавів традиційними методами і методом іскро-плазмового синтезу. Встановлено, що методи традиційного спікання порошків сплавів є малоефективними. Натомість метод іскро-плазмового спікання дозволяє швидко отримати механічно стійкі об'ємні форми із диспергованих сплавів. Розвинуто і обґрунтовано механізми ущільнення.

В восьмому розділі розглянуто процеси фазоутворення, мартенситне перетворення, механічну та структурну стабільність в матеріалах, виготовлених методом іскро-плазмового синтезу із порошків сплавів з ефект пам'яті форми.

Детально описано структуру отриманих матеріалів та її вплив на мартенситне перетворення сплавів з ефектом пам'яті форми на основі Ti-Ni, Cu-Al-Ni, Ni-Al, Ni-Mn-Ga. Показано, що архітектура консолідованих матеріалів із електроіскрових порошків у вигляді мікронних частинок, вбудованих в металокерамічну матрицю, забезпечує поліпшення механічних характеристик сплавів Ni-Al та Ni-Mn-Ga з ефектом пам'яті форми.

В додатках наведено перелік публікацій за темою дисертації, опис деяких методик та схем, подробиці обрахунків та обробки експериментальних результатів, таблиці даних та деякі допоміжні матеріали довідкового характеру.

Основні положення сформульовані автором в пункті **«Наукова новизна отриманих результатів»** відповідають критерію наукової новизни. Серед найбільш значущих результатів слід зазначити наступні:

- встановлено, що хімічні неоднорідності не є перешкодами для поширення мартенситної фази, якщо їх розміри співставні із характерним масштабом області мартенситної фази;
- встановлено, що ефективно контролювати багатостадійне відтворення форми, знак і величину двонаправленого ефекту пам'яті форми можна шляхом формування негомогенного за складом та пористістю стану матеріалу в процесі спікання із елементних порошків різного розміру;
- запропоновано первинний і вторинний механізми формування частинок із рідкої фази, наночастинок та порожнистих частинок в процесі об'ємного електроіскрового диспергування в кріогенних рідинах;
- запропоновано і обґрунтовано механізми трансформації нанофракції під час нагріву, перебіг мартенситних та супутніх дифузійно-контрольованих фазових перетворень в частинках порошків мікронних розмірів;
- показано, що в наночастинках Ni-Al та Cu-Al-Ni, розмірам яких менше деякого критичного, мартенситна фаза однієї орієнтації заповнює весь об'єм частинки, не утворюючи окремих доменів або кристалів;
- описано детально механізми консолідації порошків сплавів з ефектом пам'яті форми методом іскро-плазмового синтезу; показано, що структура у вигляді

мікронних частинок, вбудованих в металокерамічну матрицю, забезпечує поліпшення механічних характеристик сплавів Ni-Al та Cu-Al-Ni з ЕПФ.

Серед великої кількості результатів роботи варто відзначити спостереження автором таких специфічних об'єктів, як наночастинка Ti-Ni типу «ядро-оболонка», наночастинки Ni-Al та Cu-Al-Ni, суцільний об'єм яких зайнятий мартенситною фазою, мартенситні кристали, що формуються на сферичних поверхнях мікронних частинок, когерентне проростання тонких двійникованих кристалів мартенситу через прожилки комірчастої структури в диспергованих частинках Ni-Al. Також автором встановлені закономірності утворення порожнистих частинок в процесі електроіскрової ерозії в крихких сплавах Ni-Al та Ni-Mn-Ga, що є перспективним кроком у напрямку виготовлення металевих піп з ефектом пам'яті форми, розроблені моделі формування частинок із рідкої та газоподібної фаз в процесі електроіскрової ерозії в криогенних рідинах.

В цілому, дисертаційну роботу виконано на високому сучасному науковому рівні. Робота є актуальним і новим дослідженням, що стосується вивчення структури таких цікавих і перспективних з точки зору практичного застосування матеріалів як функціональні матеріали на основі металевих сплавів, що зазнають мартенситне перетворення та демонструють ефект пам'яті форми.

**Достовірність і обґрунтованість висновків** забезпечено використанням автором для розв'язання поставлених в роботі задач ряду сучасних методів дослідження структури, елементного, фазового складу, властивостей матеріалів. Результати, отримані різними методами, доповнюють один іншого. Одержані експериментальні результати узгоджуються між собою та з відповідними літературними теоретичними та експериментальними даними інших авторів. Основні положення і висновки дисертації добре обґрунтовано і достатньо повно доведено. Результати дисертаційної роботи опубліковані автором в провідних міжнародних фахових виданнях та апробовані на багатьох міжнародних конференціях.



Слід відзначити також достатньо високий для експериментальної роботи рівень теоретичних обрахунків, що дозволило автору дисертації кількісно обґрунтувати деякі висновки і отримати низку корисних оцінок.

**Практична цінність отриманих результатів.**

Отримані результати будуть корисними для спеціалістів в області фізики металів, які працюють над створенням і дослідженням функціональних матеріалів, спеціалістам з методів порошкової металургії.

**Повнота викладення основних наукових і практичних результатів в опублікованих роботах. Завершеність і стиль викладення.**

Основні результати роботи Г.С. Монастирського викладено в 33 статтях у фахових вітчизняних та зарубіжних наукових журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних. Результати досліджень були представлені на багатьох міжнародних наукових конференціях і опубліковані в збірниках тез і матеріалів конференцій. У дисертації отримано ряд нових результатів, надано їх інтерпретацію і узагальнення. Дисертація є завершеною науковою працею, написана хорошою науковою мовою і оформлена відповідно існуючим вимогам.

Зміст автореферату дисертації досить повно та об'єктивно відображає зміст основних положень і структуру дисертаційної роботи.

Тема роботи та суть її наукових результатів повністю відповідають паспорту спеціальності 01.04.13 - фізика металів.

Зауваження до змісту дисертації та автореферату є такі:

1. В тексті зустрічаються деякі орфографічні, стилістичні, пунктуаційні неточності, зокрема, поряд зі скороченнями розмірності на кирилиці зустрічаються греко-латинські.
2. На мій погляд, дисертація містить занадто велику кількість додатків – 33! Матеріали додатків варто було б звести до декількох тематичних рубрик, зокрема з викладенням в одній з них методик досліджень, перелік яких займає більш ніж сторінку в авторефераті.
3. В першому розділі автор класифікує неоднорідності матеріалу за їх

впливом на МП. В подальшому ця класифікація дуже не часто використовується в тілі дисертації. Наприклад, до якого типу можна віднести виділення  $\text{Ni}_5\text{Al}_3$  в  $\text{Ni-Al-Pt}$  та  $\text{Ni-Al-Ga}$ , вакансії в синтезованих матеріалах  $\text{Ni-Al}$  та  $\text{Cu-Al-Ni}$  і, судячи з усього, неупорядкованість в  $\text{Ni-Mn-Ga}$ ?

4. Робота б мала більш довершений вигляд, якби для кожного стану, дослідженого в роботі, були б виміряні параметри ЕПФ. Наприклад, серед чотирьох матеріалів, консолідованих методом іскро-плазмового синтезу, тільки в одному було досліджено ЕПФ.

5. Оцінка швидкості охолодження частинок в методі електро-іскрової ерозії була зроблена 3 методами. Проте схоже, що автор залишає на розсуд читача висновок, який із них є більш релевантним. Було б добре, якби автор зробив коротеньке резюме з цього приводу.

6. Після такого дуже ретельного дослідження матеріалів, що отримуються методом електро-іскрової ерозії, дуже корисно було б дати рекомендації щодо переваг, недоліків, очікуваних результатів застосування цього методу для інших відомих багатокомпонентних систем, зокрема із високотемпературним ЕПФ ( $\text{Ni-Al-Pt}$ ,  $\text{Hf-Pd}$ ).

7. В п'ятому розділі наведено ступеневі залежності параметру мікроструктури  $\lambda$  від розмірів частинок. Чи оцінювалось автором граничні значення розмірів частинок, при яких параметри мікроструктури стають зрівнянні із розмірами частинок, тобто структура стає практично однорідною?

Проте зроблені зауваження та рекомендації не впливають на загальну високу оцінку дисертації Монастирського Г.Є. Вказані зауваження мають, в основному, характер побажань і не ставлять під сумнів основні результати роботи, їх новизну, наукову та практичну цінність.

Вважаю, що дисертаційна робота Монастирського Геннадія Євгеновича «Закономірності фазових структурних перетворень в неоднорідних, нерівноважних і просторово обмежених станах функціональних матеріалів» є завершеною науковою працею і за своїм змістом, актуальністю, новизною



отриманих результатів відповідає вимогам, що висуваються до докторських дисертацій згідно з «Порядком присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р. (зі змінами, внесеними Постановою Кабінету Міністрів України № 656 від 19.08.2015 р. і Наказом МОН України № 40 від 12.01.2017 р.), а її автор, безумовно, заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.13 – фізика металів.

Офіційний опонент:

Директор Інституту фізики твердого тіла,  
матеріалознавства і технологій  
Національного наукового центру  
«Харківський фізико-технічний інститут»  
НАН України, член-кореспондент НАН України  
доктор фізико-математичних наук, професор

Воеводін В.М.

Підпис В.М. Воеводіна засвідчую

*Заст. Генерального директора  
ННЦ ХФТИ*



*Карнаухов Т.М.*