

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Сергія Станіславовича Поліщука "Структура та фізико-механічні властивості покриттів на основі алюмінію з квазікристалічними та апроксимантними фазами", представлену на здобуття наукового ступеню доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.13 -фізика металів.

Дисертаційна робота С.С. Поліщука присвячена розробці наукових основ створення покриттів з квазікристалічними або апроксимантними фазами в алюмінієвих сплавах і встановленню зв'язків між властивостями матеріалів з фазами зі складною кристалічною будовою, їх структурними особливостями та внутрішніми напруженнями.

Актуальність теми дисертаційної роботи обумовлена тим, що властивості покриттів на основі алюмінію з квазікристалічною або апроксимантною структурою залежать від низки взаємопов'язаних факторів, найважливішими з яких є хімічний склад, розмір структурних елементів, рівень макронапружень, наявність додаткових кристалічних фаз та домішок.

Тому дослідження закономірностей формування квазікристалічних та апроксимантних фаз в системах на основі алюмінію, розробка методики вимірювання в них макронапружень, визначення оптимальних умов для отримання малодфектних матеріалів на основі фаз зі складною кристалічною будовою та встановлення впливу хімічного та фазового складу на їх стабільність, механічні та фізичні властивості є **актуальною науковою проблемою**.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Встановлено фізичні умови формування квазікристалічних та апроксимантних структур безпосередньо в процесі фізичного осадження парової фази на прикладі систем Al-Cu-Fe, Al-Cr-Fe, Al-Co та визначено вплив температури осадження на параметри мікроструктури і структурну досконалість квазікристалів та апроксимантів.

2. Вперше визначено комплекс механічних, трибологічних, дисипативних та електрофізичних властивостей гомогенних та гетерогенних покриттів систем Al-Cu-Fe та Al-Cr-Fe, що містять квазікристалічну або апроксимантну фази. Запропоновано пояснення відмінності механізмів дисипації енергії в наноструктурованих та гетерогенних покриттях Al-Cu-Fe та Al-Cr-Fe, що містять квазікристалічну або апроксимантну фази.
3. Встановлено, що в результаті осадження квазікристалічних покриттів системи Al-Cu-Fe при високих температурах на підкладки, матеріал яких характеризується низьким коефіцієнтом термічного розширення і подальшого охолодження до кімнатної температури, в покриттях розвиваються розтягуючі напруження, величина яких може досягати 1100 МПа. Промодельовано розподіл залишкових напружень у квазікристалічних покриттях, осаджених на різні типи підкладок при різних типах прошарків.
4. Встановлено, що основним механізмом релаксації напружень у квазікристалічних покриттях Al-Cu-Fe є наскрізне розтріскування і визначено значення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Ic} матеріалу квазікристалічного покриття: $(1,6 \pm 0,1) \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.
5. Вперше розроблено методику оцінки макронапружень у квазікристалічних покриттях рентгенівським методом. На основі експериментально отриманих значень макронапружень, ЛКТР та критичного коефіцієнта інтенсивності напружень у квазікристалічних покриттях Al-Cu-Fe визначено значення їх критичної товщини в залежності від ЛКТР підкладки та температури осадження, вище якої стає ймовірним їх наскрізне розтріскування.
6. Встановлено фізичні умови формування апроксиматної фази $\gamma_2\text{-Al}_4\text{Cu}_9$ в процесі реакційної дифузії в багатошарових фольгах системи Al-Cu і визначений вплив періоду модуляції евтектичних багатошарових фольг Al/Cu на послідовність і температурний діапазон реакцій у фольгах при нагріванні. В рамках запропонованого фізичного пояснення впливу періоду модуляції на фазоутворення у багатошарових фольгах Al-Cu показано, що утворення фаз Al_2Cu і $\gamma_2\text{-Al}_4\text{Cu}_9$ відбувається переважно на міжфазних границях між шарами

Al і Cu, а також між шарами Al_2Cu і Cu, відповідно, тоді як утворення фази $\beta_1\text{-AlCu}_3$ відбувається на границях стовпчастих зерен Cu.

7. Вперше встановлено, що зменшення розміру зерен в квазікристалічних та апроксимантних матеріалах до наномасштабних величин приводить до значного зростання їх власної демпфуючої здатності при підвищених температурах. Показано, що температурна залежність демпфуючої здатності в наноструктурованих матеріалах з фазами зі складною кристалічною будовою має пороговий характер: демпфування починає експоненціально зростати при температурах вищих 500 К. При цьому демпфуюча здатність цих матеріалів має слабку залежність від амплітуди деформації в температурному діапазоні 300...600 К. Така поведінка пов'язується зі зміною механізму дисипації енергії при переході від мікро- до субмікро- та наномасштабного розміру зерен у вакуумних конденсатах з дислокаційного на переважно зернограничний.

Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів підтверджується комплексом сучасних експериментальних методів дослідження структури та напруженого стану покриттів (електронна мікроскопія, рентгеноструктурний аналіз, текстурний аналіз, моделювання розподілу залишкових напружень, рентгенівський метод дослідження залишкових напружень, метод Стоні), механічних та електрофізичних характеристик покриттів (трибологія, дюрометрія, дослідження дисипативних властивостей, мікрохвильові дослідження) та калориметрією. При цьому основні результати роботи, отримані різними методами, добре узгоджуються між собою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відділах будови та властивостей твердих розчинів та фізики дисперсних систем Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України в рамках наступних бюджетних тем: «Структурно-фазовий стан і фізико-механічні властивості гетерофазних систем на основі елементів з обмеженою взаємною розчинністю» (№055/06,

2006-2010 рр; «Вплив інтенсивної пластичної деформації на формування структурно-фазових станів і фізико-механічні властивості металевих матеріалів на основі Al, Fe, Cu, Mg» (№ 055/11, 2011-2015); «Закономірності формування твердих розчинів та інтерметалідних фаз в багатокомпонентних металічних системах в умовах дії термосилових обробок і в результаті фазових перетворень» (№055/16, 2016-2020). Частина результатів дисертації була отримана під час досліджень проведених дисертантом в Інституті Жана Ламура (м. Нансі, Франція, 2009-2011 рр.) при роботі над міжнародним проектом «Development of wear resistant coatings based on complex metallic alloys for functional applications» в рамках програми FP7-NMP - Specific Programme "Cooperation": Nanosciences, Nanotechnologies, Materials and new Production Technologies.

Практичне значення одержаних результатів. Встановлені в дисертаційній роботі закономірності напруженого стану в квазікристалічних покриттях, отриманих методами фізичного осадження, дозволяють визначити оптимальні умови, необхідні для формування малodefektnih покриттів із квазікристалічною структурою, а саме величину критичної товщини, вище якої спостерігається їх розтріскування. Це дозволило створити фізико-технічні основи одержання товстих покриттів на основі квазікристалічної або апроксимантної структури, які можуть бути використані як покриття функціонального призначення.

Представлені в дисертаційній роботі результати в повній мірі відображені в 37 публікаціях, з яких 21 стаття (з них 8 статей у реферованих журналах, віднесених до 1-го і 2-го кuartilів (Q1 і Q2), 8 статей в журналах, віднесених до 3-го та 4-го кuartilів (Q3 і Q4) відповідно до класифікації SCImago, 5 статей у журналах, включених до переліку наукових фахових видань України (категорія «Б»)), та 16 тез доповідей на міжнародних і українських наукових конференціях.

Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації. У ньому викладені мета та задачі дослідження, наукова новизна отриманих

результатів, методики досліджень, основні результати та висновки. Автореферат оформлений належним чином.

Зауваження щодо дисертаційної роботи:

1. У вступі на с. 22 та 41 у визначенні квазікристалу фігурує термін дальній квазіперіодичний порядок, але не надано визначення самого квазіперіодичного порядку.
2. У розділі 1 на с. 57 наведено класифікацію квазікристалічних систем на основі атомів великого розміру з використанням підходу Д. Петіфора і, зокрема, емпіричного параметру - номера Менделєєва, який характеризує властивості елементів в хімічному просторі. На жаль, фізичний зміст даного параметру не наведений. Крім того, незрозуміло, наскільки універсальною є така класифікація квазікристалічних систем?
3. В роботі показано (розділ 3, с. 143-145), що при осадженні пари зі складом $\text{Al}_{65}\text{Fe}_{20}\text{Fe}_{15}$ зниження температури підкладки до 543 K приводить до утворення наноструктурованої квазікристалічної фази і появи кристалічної кубічної B2 фази. В той же час, осадження покриття $\text{Al}_{63}\text{Cu}_{26}\text{Fe}_{11}$ при температурах 220°C (493 K) (розділ 3, с. 167-170) приводить до формування нанорозмірних кубічної $\beta\text{-Al}(\text{Cu},\text{Fe})$ і тетрагональної $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ фаз (без квазікристалічної фази). Чи можна зробити висновок, що формування квазікристалічної фази при температурі осадження нижче 493 K не відбувається? Чим обумовлений вибір хімічних складів $\text{Al}_{65}\text{Fe}_{20}\text{Fe}_{15}$ і $\text{Al}_{63}\text{Cu}_{26}\text{Fe}_{11}$ покриттів для утворення квазікристалічної структури безпосередньо із парової фази і шляхом твердофазних перетворень, відповідно?
4. У розділі 4 на с. 219 на основі розрахунку розподілу термічних напружень припускається, що у випадку осадження на підкладки із WC-Co або кремнію використання прошарку нікелю не дозволяє суттєво знизити рівень напружень, але може істотно покращити інтерфейсну в'язкість, що зменшує імовірність відокремлення покриття від

підкладки. Чи проводили кількісні оцінки адгезії квазікристалічних покриттів при використанні різних типів прошарків?

5. В дисертації показано (розділ 5, с. 258), що величина питомого електроопору квазікристалічних Al-Cu-Fe покриттів у 2-4 рази вище, ніж у сплава Al-Cu-Fe після загартування з рідкої фази і, в той же час, у 2,5-3 рази нижче, ніж у квазікристалічних сплавів у стані високого впорядкування ікосаедричної структури при оптимальному відпалі. На основі даного результату робиться висновок, що квазікристалічна фаза в покритті знаходиться в стані проміжного упорядкування, яке відповідає стану після неоптимального відпалу загартованих з рідкої фази зразків. Чи підтверджується даний висновок рентгенівськими даними?
6. У різних розділах роботи використовуються значення температури, вказані як у градусах Цельсія, так і в Кельвінах, що створює певні незручності у сприйнятті матеріалу.
7. Дисертант використовує посилання із згадуванням авторів деяких робіт як латиницею так і кирилицею. Наприклад:
с. 176. Для аналізу напружень в покриттях може бути використана модель Тсуї і Клайна [215], але:
с. 204. Розподіл термічних напружень може бути розрахований за допомогою моделі Y.C. Tsui & T.W. Clyne [215]

Наведені зауваження не знижують цінності одержаних у дисертаційній роботі результатів, не ставлять під сумнів достовірність та обґрунтованість основних положень, що виносяться на захист і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Загальні висновки по роботі

В дисертаційній роботі Поліщука С. С. наведено результати виконаного на високому науковому рівні дослідження, які мають науковий та практичний інтерес. У дисертаційній роботі розглянуто фізичні явища, пов'язані з формуванням квазікристалічних апроксимантних фаз при осадженні із

парової фази в системах сплавів Al-Cu-Fe, Al-Cr-Fe, та Al-Co або в процесі твердофазних реакцій в багатошарових фольгах Al/Cu. Встановлено закономірності утворення квазікристалічної структури із парової фази, визначено рівень залишкових напружень в квазікристалічних покриттях та механізм їх релаксації, а також комплекс дюрOMETричних, трибологічних та електрофізичних властивостей.

Висновок. Дисертаційна робота „Структура і фізико-механічні властивості покриттів на основі алюмінію з квазікристалічними та апроксимантними фазами” за актуальністю, ступенем обґрунтованості наукових положень, фундаментальною та практичною цінністю, обсягом та рівнем одержаних результатів, повнотою їх викладення в опублікованих працях є закінченою кваліфікаційною працею, яка відповідає вимогам ДАК МОН України щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук, а саме, пп. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р. (зі змінами, внесеними згідно з постановами Кабінету Міністрів України №656 від 19.08.2015, №1159 від 30.12.2015, №567 від 27.07.2016, №943 від 20.11.2019 та №607 від 15.07.2020). Робота включає раніше не захищені наукові положення і отримані автором нові науково-обґрунтовані результати в області фізики металів.

З урахуванням вищенаведеного вважаю, що її автор, Поліщук Сергій Станіславович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.13 — фізика металів.

Офіційний опонент

Доктор фізико-математичних наук, професор

Карпець Мирослав Васильович, завідувач кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

