

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Єфімова Миколи Олександровича

“Фізичні засади зміцнення сплавів алюмінію та покриттів,

що містять квазікристали систем Al-Fe-Cr і Al-Cu-Fe”,

представлену на здобуття наукового ступеня

доктора фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла

Відомо, що властивості твердих тіл визначаються не тільки їх хімічним складом, але і характером упорядкування в розташуванні атомів. Зміни в розташуванні атомів суттєво впливають на їх властивості: структурні, механічні, теплові, електричні, магнітні й оптичні. У 1984 р. Даніелем Шехтманом при дослідженні сплаву $\text{Al}_{0,86}\text{Mn}_{0,14}$, отриманого після швидкого загартування з рідкого стану, було відкрито новий клас твердих тіл, який згодом назвали «квазікристалами». В квазікристалах на відміну від кристалічних сполук існує чітка впорядкована упаковка атомів та далекий орієнтаційний порядок, але відсутня періодичність у розташуванні атомів. Саме таке нетривіальне впорядкування атомів в квазікристалах зумовлює поєднання рідкісних для металів властивостей: високу твердість і модуль пружності, високу зносостійкість та малий коефіцієнт тертя, низьку теплопровідність і корозійну стійкість при порівняно низькій густині. Водночас пластичність у квазікристалах за кімнатної температури практично не проявляється, а деформація зумовлена дислокаційними механізмами зі специфічним внеском фазонних дефектів, яких немає у кристалічних тілах.

Такі властивості квазікристалів ускладнюють створення об'ємних конструкційних матеріалів з квазікристалічною структурою. Тому найбільш перспективним на даний час є використання квазікристалів як зміцнюючих часток у композитах на основі алюмінію та його сплавів, а також в якості функціональних покриттів. Ключові фізичні проблеми, що стають на заваді створення матеріалів з квазікристалічною структурою, – це розуміння механізмів деформації, вивчення формування міжфазного зв'язку в композиційних матеріалах, в яких квазікристали виконують роль твердих зміцнюючих частинок.

Дисертаційна робота спрямована на розробку фізичних засад формування високоміцних станів у сплавах алюмінію, покриттях та композитних шарах із застосуванням квазікристалів систем Al-Fe-Cr та Al-Cu-Fe, що є важливим завданням як для теорії міцності складноорганізованих твердих тіл, так і для прикладних задач авіа- та машинобудування.

Виходячи з вищесказаного, дослідження, виконані в дисертаційній роботі М.О. Єфімова, є **актуальними**.

Для встановлення фізичних закономірностей структуроутворення та механізмів деформації ікосаедричних квазікристалів в системах Al-Fe-Cr та Al-Cu-Fe автором було вирішено наступні наукові завдання:

- досліджено механічну поведінку квазікристалів системи Al-Cu-Fe в температурному інтервалі із застосуванням методу локального навантаження;
- встановлено основні фізичні принципи міцності та пластичності сплавів алюмінію системи Al-Fe-Cr з наноквазікристалічним зміцненням та запропоновано фізичну модель процесів, що відбуваються при деформації сплавів такого типу;
- досліджено вплив типу кристалічної ґратки зміцнюючих нанорозмірних частинок на рівень механічних властивостей сплавів системи Al-Fe-Cr;
- визначено фізичні принципи формування квазікристалічних захисних покриттів системи Al-Cu-Fe, отриманих методом високошвидкісного повітряно-паливного напилення, зі збереженням квазікристалічної структури вихідного порошку;
- встановлено зв'язок фазового складу покриттів з адгезійною міцністю;
- розроблені фізичні основи формування зміцнених приповерхневих шарів в алюмінії та його сплавах з використанням стабільних квазікристалів Al-Cu-Fe методом ультразвукової ударної обробки.

Обґрунтованість і достовірність отриманих автором експериментальних даних підтверджується використанням широкого комплексу методів дослідження, який охоплює металографічні, рентгеноструктурні, СЕМ та ТЕМ дослідження, рентгенівську оцінку залишкових напружень, механічні випробування (розтяг, згин,

адгезійні випробування), визначення твердості та мікротвердості при локальному навантаженні пірамідальними інденторами різної геометрії. Такий інструментарій дозволяє повною мірою вирішити поставлену в роботі мету, а саме розвинути фундаментальні фізичні уявлення щодо механізму деформації квазікристалічних матеріалів на основі сплавів алюмінію як наукової основи для створення високоефективних сплавів, покриттів та композитних матеріалів з широким спектром службових характеристик.

Дисертація складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, додатка та переліку посилань з 316 джерел. Повний обсяг дисертації становить 372 сторінки із 188 рисунками та 45 таблицями. У вступі окреслено мету, задачі, зв'язок із науковими темами, новизну та прикладну значимість роботи. Далі послідовно подано: огляд літератури, присвячений квазікристалам; методи отримання квазікристалічних матеріалів Al-Cu-Fe і Al-Fe-Cr; методики структурно-механічного аналізу; механічна поведінка ікосаедричних квазікристалів Al-Cu-Fe; структура та властивості сплавів Al-Fe-Cr з наноквазікристалічним зміцненням; квазікристалічні покриття Al-Cu-Fe(Sc); зміцнені приповерхневі композитні шари частинками Al-Cu-Fe на чистому алюмінії та сплаві АМг6.

Автореферат коректно віддзеркалює зміст дисертації.

Основні положення дисертації оприлюднені у 68 публікаціях: 34 статті, 32 тези конференцій, а також 2 статті в Енциклопедії Сучасної України та Збірнику «Наука про матеріали: досягнення та перспективи», що додатково відображають зміст дисертації.

Наукова новизна. В результаті проведення досліджень автором одержано низку нових результатів:

1. В роботі вперше побудовано криві деформації масивних квазікристалів системи Al-Cu-Fe в діапазоні температур 20–720 °С та виявлено нетипову для звичайних кристалів стадію деформаційного розміцнення, яка існує до 400 °С.
2. Вперше для квазікристалів Al-Cu-Fe отримана математична залежність відносної величини модуля пружності (E/E_0) від гомологічної температури

(T/T_m) як полінома другого ступеня, яка корелює з залежністю $(E/E_0)=f(T/T_m)$ для ковалентних/іонно-ковалентних кристалів, боридів, карбідів, композитів і металів.

3. Вперше на основі аналізу зміни мікротвердості квазікристалів системи Al-Cu-Fe розраховано енергію активації руху дислокацій U та активаційний об'єм V .
4. Вперше на основі температурної залежності твердості, модуля пружності та коефіцієнта Пуассона отримана температурна залежність характеристики пластичності δ_H та показано, що при $T > 600^\circ\text{C}$ ($\approx 0,85 T_m$) квазікристали системи Al-Cu-Fe виявляють макропластичність.
5. В роботі вперше досліджено залежність рівня пластичності сплавів системи Al-Fe-Cr (з високою об'ємною часткою зміцнюючих нанорозмірних частинок 35–40 % об.) від їх структурного стану. Встановлено, що пластичність зазначених сплавів на рівні 5 – 8 % обумовлена саме їх квазікристалічною будовою. При зміцненні сплавів системи Al-Fe-Cr нанорозмірними частинками, що мають кристалічну будову, пластичність знижується та становить 0,7%. Висока пластичність сплавів, зміцнених квазікристалічними частинками, обумовлена особливими властивостями міжфазних границь між квазікристалічними частинками та матрицею $\alpha\text{-Al}$.
6. Вперше показано, що основними факторами, які забезпечують міцність сплавів системи Al-Fe-Cr, зміцнених наноквазікристалічними частинками, є висока твердість та високий модуль пружності квазікристалів; висока об'ємна частка наноквазікристалічних зміцнюючих частинок (до 40 % об.); формуванням в процесі гарячої екструзії дрібних зерен $\alpha\text{-Al}$ розміром до 200-500 нм та присутністю деякої кількості твердих оксидів Al_2O_3 .
7. Вперше на основі визначення особливостей високотемпературної деформації стабільних квазікристалів системи Al-Cu-Fe запропоновано при отриманні покриттів методом високошвидкісного повітряно-паливного напилення нагрівати порошинки до температури $0,85 T_m$, за якою у квазікристалах з'являється значна пластичність. При цьому структура покриттів, яка забезпечує високі показники твердості та адгезійної міцності, формується

завдяки високій швидкості та достатній пластичності частинок квазікристалів системи Al-Cu-Fe при температурі, вищій за 600 °С.

8. Вперше встановлено основні фактори зміцнення в модифікованих квазікристалічними частинками приповерхневих композитних шарах алюмінію та сплаву АМг6, а саме підвищена щільність дислокацій, утворення дислокаційних комірок в матриці, досить великий рівень внутрішніх стискаючих напружень, що забезпечує підвищену твердість і опір зносу модифікованої поверхні.

До змісту дисертаційної роботи Єфімова М.О. є певні зауваження та побажання, а саме:

1. Яке саме значення температури плавлення T_m для ікосаедричної фази було обрано для нормування (T/T_m) з огляду на склад квазікристалічного сплаву системи Al-Cu-Fe та його можливу неоднорідність? Як визначалось значення T_m – експериментально чи за літературними джерелами, та як це впливає на залежність відносної величини модуля пружності (E/E_0) від гомологічної температури (T/T_m) ?
2. В розділі 4 вказано, що при під дією тиску при індентуванні відбувається фазовий перехід у більш пластичну фазу. Але не вказано, чи є цей перехід зворотним, яка структура нової фази, і якими методами підтверджено її наявність?
3. Якою методикою кількісного фазового аналізу була визначена кількість квазікристалічної фази та яка величина похибки?
4. Автор згадує про присутність оксидів Al_2O_3 в структурі як сплавів системи Al-Fe-Cr, так і покриттів, але не був проаналізований їхній внесок у міцність.
5. В роботі показано, що при вимірюванні мікротвердості в покриттях Al-Cu-Fe-Sr спостерігається зменшення похибки при вимірюванні твердості зі збільшенням температури. З чим це пов'язано: зв'язування дефектів, інша кінетика фазових перетворень, зміна модуля Юнга від температури?

6. Автором показано, що після циклу нагрівання-охолодження під час вимірювання «гарячої твердості» рівень твердості зростає, а рентгенофазовий аналіз фіксує перехід до майже однофазного квазікристалічного стану в покритті. Чи є цей ефект зворотним, чи контролювався хімічний склад покриття та його пористість до і після циклу нагрівання-охолодження?
7. У висновках до розділу 6 автор стверджує, що введені квазікристалічні частинки є додатковими джерелами дислокацій та сприяють утворенню дислокаційних комірок. Чи є доказова база цього твердження, а саме прямі ТЕМ-свідчення зародження дислокацій на границі «частинка/матриця» у композитному шарі, і як це може бути пов'язано зі зміною твердості матеріалу?
8. В останньому пункті висновків розділу 6 стверджується, що запропонований метод модифікації поверхневого шару може поліпшувати властивості, важливі для довговічності виробів (знос, втома тощо). Проте в дисертаційній роботі втомна міцність не досліджувалась.

Однак вказані зауваження не стосуються основних положень, не є визначальними, не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів і не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи М.О. Єфімова.

Заклучна оцінка дисертаційної роботи

Дисертаційна робота М.О. Єфімова «Фізичні засади зміцнення сплавів алюмінію та покриттів, що містять квазікристали систем Al-Fe-Cr і Al-Cu-Fe» є завершеним, самостійним і високоякісним дослідженням, що робить вагомий внесок у фізику деформації квазікристалічних матеріалів і методологію зміцнення алюмінієвих сплавів. Отримані результати мають як фундаментальну, так і прикладну цінність, придатні до впровадження у виробничі практики. Матеріали дисертації повністю відображені в статтях, які відповідають вимогам до публікацій, а також пройшли належну апробацію на наукових конференціях.

Вважаю, що дисертація «Фізичні засади зміцнення сплавів алюмінію та покриттів, що містять квазікристали систем Al-Fe-Cr і Al-Cu-Fe», подана на здобуття

наукового ступеню доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла, відповідає вимогам «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах)», затвердженою постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. №261 (зі змінами і доповненнями, внесеними постановами Кабінету Міністрів України від 3 квітня 2019 року № 283 та від 19 травня 2023 року №502), а її автор – Єфімов Микола Олександрович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук із спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент

завідувач відділу фізики дисперсних систем
Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова
НАН України
доктор фізико-математичних наук, професор



Олександр РУДЬ

26.08.2025

Підпис д.ф.-м.-н., проф. Рудя О.Д. засвідчую.
Заступник директора з наукової роботи
ІМФ ім. Г.В. Курдюмова НАН України
доктор фізико-математичних наук, професор



Вячеслав ЛІЗУНОВ