**Звіт про науково-дослідну роботу: „ Розробка фізичних та технологічних основ отримання квазікристалічних високотемпературних корозійностійких матеріалів та покриттів”**

**Мета роботи** - розробка фундаментальних основ створення квазікристалічних матеріалів на основі алюмінію з комплексом унікальних властивостей та розвиток фундаментальних фізичних уявлень щодо механізму деформації та руйнування квазікристалічних матеріалів як наукової основи для створення високоефективних сплавів та покриттів.

Терміни виконання наукової роботи: початок І кв. 2012 р.

закінчення IV кв. 2016 р.

**Керівник роботи**: Мільман Юлій Вікторович, д.ф.-м.н., чл.-кор. НАНУ, ( E-mail: fsa@ipms.kiev.ua)

**Скорочений зміст висновків рецензентів.**

Рецензенти позитивно оцінюють значення роботи та отримані результати, підкреслюючи, що робота має велике наукове та практичне значення. Результати роботи вносять істотний вклад у встановлення закономірностей фізики деформування квазікристалічних та нано-квазікристалічних матеріалів. В роботі отримано ряд нових наукових результатів, важливих як з фізичної точки зору, так і з точки зору їх практичного використання. Завдяки розробленим фізико- технічним основам виробництва квазкристалічних матеріалів на основі водорозпилених порошків систем АL-Fе-Сr-Ті та АL-Сu-Fе, отримано жароміцні алюмінієві сплави, що мають рекордні характеристики міцності при температурах до 300 °С та захисні термобар’єрні покриття. Вперше було отримано та досліджено поверхневі композиційні матеріали, що представляли собою матрицю з алюмінію або сплаву АМгб, зміцнену дисперсними частками квазікристалу АL-Сu-Fе. авторами вперше встановлено, що у процесі навантаження в сплавах алюмінію, які зміцнені наноквазікристалічними частками, дислокації призводять до локальної деформації з фазовим переходом в тонкому поверхневому шарі наноквазікристалічної частки в апроксімантну кристалічну фазу, що релаксує напруги. Це надає можливість забезпечити високу пластичність наноструктурованому жароміцному сплаву алюмінію при наявності великої долі зміцнюючих часток (до 40 об. %), тоді як у випадку зміцнення алюмінієвого сплаву кристалічними частками, сплав стає крихким вже при 20 об. % твердої фази. Розроблені сплави мають найбільшу міцність серед алюмінієвих сплавів, що деформуються (ϭβ > 288 МП) при підвищеній до 300 °С температурі.

Звіт містить цінні наукові та практичні результати і є закінченою науково-дослідною роботою.

**Пропозиції про подальше використання результатів роботи.**

Отримані результати (хімічний склад сплавів, умови виготовлення високоміцних сплавів алюмінію, квазікристалічних покриттів та приповерхневих композитних шарів, зміцнених квазікристалічними частками) є фундаментальною основою для розробки технологічних схем виробництва розроблених матеріалів та наступного впровадження на підприємствах України.

Дані про реєстрацію роботи: № 0112U002300

**РЕФЕРАТ**

**Об’єкт дослідження** - квазікристалічні матеріали систем Аl-Fе-Сr-Ті та А1-Сu-Fе, що отримані з застосуванням технології розпилення розплаву водою під високим тиском. **Мета роботи** - розробка фундаментальних основ створення квазікристалічних матеріалів на основі алюмінію з комплексом унікальних властивостей та розвиток фундаментальних фізичних уявлень щодо механізму деформації та руйнування квазікристалічних матеріалів як наукової основи для створення високоефективних сплавів та покриттів. Отримано та досліджено екструдовані штаби алюмінієвого сплаву системи А1-Fе-Сr-Ті, з наноквазікрисгалічним зміцнням. Запропанован механізм деформації, що забезпечує високу пластичність наноструктурному жароміцному сплаву алюмінію при наявності великої долі зміцнюючих часток (до 40 об. %). Показано, що міцність сплавів системи А1-Fе-Сu-Ті забезпечується високою твердістю та високим модулем пружності квазікристалів, а також їхньою стабільністю до порівняно високих температур, пластичність - особливим механізмом деформації. Доведено, що у процесі навантаження в сплавах системи А1-Fе-Сu-Ті дислокації призводять до локальної деформації з фазовим переходом в тонкому поверхневому шарі в апроксімантну кристалічну фазу, що релаксує напруги. Це надає можливість забезпечити високу пластичність наноструктурному жароміцному сплаву алюмінію при наявності великої долі зміцнюючих часток (до 40 об. %), тоді як у випадку зміцнення алюмінієвого сплаву кристалічними частками, сплав стає крихким вже при 20 об. % твердої фази. Розроблені сплави системи А1-Fе-Сr-Ті спроможні тривалий час працювати при температурі до 300 °С при якій вони мають високу міцність, яка для напівфабрикатів у вигляді штаб дорівнює 282 МПа.Встановлено, що втрати ваги в морській воді сплавів системи АІ-Fе-Сr-Ті в 9, 5 разів менші порівняно з високоміцними сплавами типу А1-Cu-Мg-Сu. Рoзрoблен метод та підібрані режими отримання квазікристалічних покриттів на основі системи АІ-Сu-Fe методом високошвидкісного повітряно - паливного напилення. При виборі режиму отриманні покриттів було використано той факт, що вище 0,85ТПЛ квазікристалічні частки стають пластичними, що поряд з високою швидкістю переносу часток к поверхні основи дозволило сформувати квазікристалічне покриття, в якому було збережено структурний стан вихідних порошків, а не отримано його заново при затвердінні розплавлених частинок. На поршневому сплаву алюмінію отримано квазікристалічне покриття складу А16зСu25Fe12. Показано, що нанесення квазікристалічного покриття на сплав алюмінію дозволяє на ~ 250 ° С підвищити робочі температури експлуатації. Спільно з ІМФ НАНУ розроблена технологія отримання приповерхневих композитних шарів сплав АМг6 + квазікристал АІ-Сu-Fе за рахунок ультразвукової ударної обробки поверхні алюмінієвого сплаву. Товщина модифікованого шару склала 50-75 мкм. Показано, що така обробка істотно підвищує зносостійкість поверхні модифікованого матеріалу: знос зменшується на 20%. Розроблені квазікристалічні матеріали можуть бути використані в якості конструкційних та корозійностійких матеріалів в авіації, суднобудуванні та в інших галузях машинобудування. **Ключові слова**: КВАЗІКРИСТАЛИ, ВОДОРОЗПИЛЕНІ ПОРОШКИ, ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ПОКРИТТЯ, НАПІВФАБРИКАТИ.

**Публікації**

Ю.В. Мильман, М.О. Єфімов. Квазікристали - нова атомна структура твердого тіла і матеріали з комплексом незвичайних властивостей. Вісник НАН України, 2012, №1, с.41 - 48.

Б.Н.Мордюк, Г.И.Прокопенко, Н.А.Ефимов, А.В.Самелюк Свойства алюминиевого сплава АМгб с поверхностным слоем упрочненным квазикристаллическими частицами AlCuFe. Металлофиз.новейшие технол.т.34, №5, сс.671-685.

О.Д.Нейков, А.И.Сирко Н.П.Захарова, Н.А.Ефимов, Г.И.Васильева, Н.В.Семенов, А.О.Шаровский, А.В.Самелюк Влияние свойств исходных порошков на структуру и механические характеристики высокотемпературного сплава Al-8Fe-l,5Cr. Порошковая металлургия, 2012.

Ю.В.Мільман, Н.П.Захарова, М.О.Єфімов, А.О.Шаровський, М.І.Даниленко Наноструктурні сплави системи Al-Fe-Cr, що зміцнені квазікристалічними частками для використань при підвищених температурах. Электронная микроскопия и прочность материалов, Электронная микроскопия и прочность материалов, 2012, №18, с. 16-24.

Ю.В.Мильман, Н. А. Ефимов, И. В. Гончарова. Квазикристаллы - новый класс твердых тел с уникальными физическими свойствами. Электронная микроскопия и прочность материалов, 2012, №18, с.3-15.

Ю.В.Мильман Квазикристаллы - новая структура твердого тела и материалы с уникальными физическими свойствами «ПМ-2012: Порошкова металургія: її сьогодні і завтра» С.6-8.

Ю.В. Мильман, Н.А. Ефимов, Н.П.Захарова, А.О.Шаровский Сплавы системы Al-Fe-Cr, дополнительно легированные тугоплавкими металлами - V, Nb, Мо для работы при температурах 300-400°С «ПМ-2012: Порошкова металургія: її сьогодні і завтра» С. 171.

B.N.Mordyuk, G.I.Prokopenko, Yu.V.Milman, M.O.lefimov, A.V.Sameljuk Enhanced fatigue durability of Al-6Mg alloy by applying ultrasonic impact peening: Effects of surface hardening and reinforcement with AlCuFe quasicrystalline particles" Material Science and Engineering A, Materials Science & Engineering A 563 (2013) 138-146.

В.И. Кубич, Л.И. Ивщенко, Ю.В. Мильман, В.М. Кисель, Н.А. Ефимов, Н.П. Коржова, К.Э. Гринкевич, Ю.И. Евдокименко Применение квазикристалического покрытия для повышения жаростойкости поршневого алюминиевого сплава. Вісник двигунобудування №2 2013 с. 256-260.

Ю.В.Мильман, Н.А. Ефимов, Н.П.Захарова, А.О.Шаровский. Квазикристаллы - новый класс высокоэффективных конструкционных и функциональных материалов.

Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Сборник трудов Физико-технического института НАН Беларуси, 2013 С. 62-70.

О. D. Neikov, А. I. Sirko, N. Р. Zakharova, N. A. Efimov, G. I. Vasil’eva, А. О. Sharovskii, А. V. Samelyuk, V. A. Goncharuk, R. К. Ivashchenko Effect of starting powder properties on the structure and mechanical characteristics of Al-8Cr-1.5Fe alloy for high-temperature applications Powder Metallurgy and Metal Ceramics July 2013, Volume 52, Issue 3-4, pp 144-153.

Ю.В Мильман, Н.П.Захарова, H.А.Ефимов, H.И.Даниленко А.О.Шаровский, О.Д.Нейков Влияние структурного состояния упрочняющих наночастиц на механические свойства сплава Al94Fe2.5Cr2.5Ti1 Электронная микроскопия и прочность материалов, Киев-

1. вып. 19 С.36-43.

Ю.Н.Подрезов, Ю.В.Мильман, Я.И.Евич, Н.А.Ефимов, Н.П. Коржова, Т.Н.Легкая,

В.М.Кисель, Ю. Е.Евдокименко, В.X.Мельник Прочностные свойства квазикристаллического покрытия, нанесенного на литейный эвтектический сплав алюминия. Электронная микроскопия и прочность материалов, Киев-2013, вып. 19. С.44- 50.

В.И. Кубич, Л.И. Ивщенко, Ю.В. Мильман, В.М. Кисель, Н.А. Ефимов, Н.П. Коржова, К.Э. Гринкевич, Ю.Н. Евдокименко Применение квазикристалического покрытия для повышения жаростойкости поршневого алюминиевого сплава. XVIII Международный конгресс двигателестроителей п. Рыбачье, 2013 С.54.

Ю.В Мильман, Н.П.Захарова, Н.А.Ефимов, Н.И.Даниленко, А.О.Шаровский, А.В Самелюк, В.А. Гончарук, О.Д.Нейков Структура и механические свойства сплавов системы АІ-Fe-Cr для повышенных температур, упрочненных

наноквазикристаллическими частицами, дополнительно легированные Ті, Мо и Nb, Электронная микроскопия и прочность материалов 2014.

B.N. Mordyuk, G.I.Prokopenko, Yu.V.Milman, M.O.Iefimov, K.E.Grinkevych, A.V.Sameljuk, I. V.Tkachenko Wear assessment of composite surface layers in Al-6Mg alloy reinforced with AlCuFe quasicrystalline particles: Effects of particle size, microstructure and hardness. Wear3 19(2014)84-95.

Волочко A.T., Шегидевич А.А., Мильман Ю.В., Ефимов Н.А. Композит: алюминиевая матрица армированная квазикристаллическими частицами Al-Cu-Fe, структура и свойства. Сборник трудов Физико-технического института НАН Беларуси (материаловедение),

1. С. 426-435.

Н.А.Ефимов, В.Ю.Мильман, Н.П.Захарова, А.О.Шаровский, Н.И.Даниленко,

Н.В.Семенов Алюминиевые сплавы, упрочненные наноквазикристаллическими частицами для работы при температурах до 300°С. „Современные проблемы физики металлов и металлических систем», Киев, 25-27 мая 2016 г.

Ю.Н.Подрезов, Ю.В.Мильман, Я.И.Евич, Н.А.Ефимов, Н.П. Коржова, Т.Н.Легкая,

В.М.Кисель, Ю. Е.Евдокименко, В.X.Мельник Прочностные свойства квазикристаллического покрытия, нанесенного на литейный эвтектический сплав алюминия. Электронная микроскопия и прочность материалов, Киев-2013, вып. 19. С.44- 50.

В.И. Кубич, Л.И. Ивщенко, Ю.В. Мильман, В.М. Кисель, Н.А. Ефимов, Н.П. Коржова, К.Э. Гринкевич, Ю.Н. Евдокименко Применение квазикристалического покрытия для повышения жаростойкости поршневого алюминиевого сплава. XVIII Международный конгресс двигателестроителей п. Рыбачье, 2013 С.54.

Ю.В Мильман, Н.П.Захарова, Н.А.Ефимов, Н.И.Даниленко, А.О.Шаровский, А.В Самелюк, В.А. Гончарук, О.Д.Нейков Структура и механические свойства сплавов системы АІ-Fe-Cr для повышенных температур, упрочненных

наноквазикристаллическими частицами, дополнительно легированные Ті, Мо и Nb, Электронная микроскопия и прочность материалов 2014.

B.N. Mordyuk, G.I.Prokopenko, Yu.V.Milman, M.O.Iefimov, K.E.Grinkevych, A.V.Sameljuk, I. V.Tkachenko Wear assessment of composite surface layers in Al-6Mg alloy reinforced with AlCuFe quasicrystalline particles: Effects of particle size, microstructure and hardness. Wear3 19(2014)84-95.

Волочко A.T., Шегидевич А.А., Мильман Ю.В., Ефимов Н.А. Композит: алюминиевая матрица армированная квазикристаллическими частицами Al-Cu-Fe, структура и свойства. Сборник трудов Физико-технического института НАН Беларуси (материаловедение),

1. С. 426-435.

Н.А.Ефимов, В.Ю.Мильман, Н.П.Захарова, А.О.Шаровский, Н.И.Даниленко,

Н.В.Семенов Алюминиевые сплавы, упрочненные наноквазикристаллическими частицами для работы при температурах до 300°С. „Современные проблемы физики металлов и металлических систем», Киев, 25-27 мая 2016 г.

В.Ю.Мильман, Н.А.Ефимов, В.М.Кисель, Ю.Н.Евдокименко Квазикристаллические термобарьерные покрытия системы Al-Cu-Fe полученные высокоскоростным воздушно- топливным напылением. „Современные проблемы физики металлов и металлических систем», Киев, 25-27 мая 2016 г.