

**Фазові та структурні перетворення в композиційних наноструктурованих квазікристалічних сплавах алюмінію під дією тиску, інтенсивної пластичної деформації та температури**

**Фазовые и структурные превращения в композиционных наноструктурных квазикристаллических сплавах алюминия под влиянием интенсивной пластической деформации, давления и температуры**

**Phase and structural transformations in the composite nanostructural quasicrystalline aluminium alloys under severe plastic deformation, pressure and temperature**

1. **Номер державної реєстрації теми – 0112U001485, НТУУ «КПІ» - 2508-ф..**
2. **Науковий керівник – д.т.н., проф.. Юркова О.І., Юркова А.И., Yurkova A.I.**
3. **Суть розробки, основні результати**

**(укр.)**

На підставі результатів досліджень із застосуванням комплексу сучасних методів фізичного матеріалознавства вперше розвинуті наукові уявлення щодо закономірностей комбінованого впливу інтенсивної пластичної деформації та температури на дифузійні процеси, фазові перетворення, еволюцію структури та термічну стабільність механічних властивостей композиційних наноструктурованих сплавів алюмінію з дрібнодисперсними частинками метастабільних квазікристалічних фаз. Встановлено температурно-концентраційні інтервали існування квазікристалічних та кристалічних фаз, досліджена їх морфологія, а також обговорені особливості формування деформаційної субструктури та складу алюмінієвої матриці в залежності від діючого тиску та моди деформації.

Науково обґрунтовані основи керування фазовим складом, структурою, рівнем характеристик міцності та пластичності порошкових композиційних квазікристалічних сплавів алюмінію системи Al-Fe-Cr за рахунок оптимізації способу та технологічних параметрів їх консолідації. Це дозволить розвинути концептуально нові підходи щодо створення високоміцних та жароміцних сплавів алюмінію з підвищеною термостабільністю структури та властивостей. Обґрунтовані умови отримання високоміцних станів квазікристалічних сплавів на основі алюмінію, суттєво розвинуті фізичні основи міцності та пластичності цих сплавів і закладені науково-технічні підвалини для вдосконалення існуючих технологічних варіантів та розробки нових підходів до виготовлення конкурентоспроможних на світовому рівні високоякісних квазікристалічних сплавів алюмінію для роботи в умовах підвищених температур. Вперше в світовій практиці експериментально обґрунтована можливість консолідації порошку алюмінієвого сплаву системи Al-Fe-Cr в умовах адіабатичної деформації зсувом при повному збереженні вмісту квазікристалічної фази внаслідок застосування інноваційної техніки холодного газодинамічного розпилення (ХГН).

**(рос.)**

На основе результатов исследований с применением комплекса современных методов физического материаловедения впервые развиты научные представления относительно закономерностей комбинированного влияния интенсивной пластической деформации и температуры на диффузионные процессы, фазовые превращения, эволюцию структуры и термическую стабильность механических свойств композиционных наноструктурированных сплавов алюминия с мелкодисперсными частицами метастабильных квазикристаллических фаз. Установлены температурно-концентрационные интервалы существования квазикристаллических и кристаллических фаз, изучена их морфология, а также обсуждены особенности формирования деформационной субструктуры и состава алюминиевой матрицы в зависимости от действующего давления и моды деформации.

Научно обоснованы основы управления фазовым составом, структурой, уровнем характеристик прочности и пластичности порошковых композиционных квазикристаллических сплавов алюминия системы Al-Fe-Cr за счет оптимизации способа и технологических параметров их консолидации. Это позволит развить концептуально новые

підходи відносно створення високопрочних і жаропрочних сплавів алюмінія з підвищеною термостабільністю структури і властивостей. Обосновані умови отримання високопрочних станів квазикристалічних сплавів на основі алюмінія, суттєво розвинуті фізичні основи прочності і пластичності цих сплавів, закладено науково-технічний фундамент для удосконалення існуючих технологічних варіантів і розробки нових підходів до виготовлення конкурентоспроможних на світовому рівні високоякісних квазикристалічних сплавів алюмінія для роботи в умовах підвищених температур. Вперше в світовій практиці експериментально обосновано можливість консолідації порошку алюмінієвого сплаву системи Al-Fe-Cr в умовах адиабатическої деформації сдвигом при повному збереженні вмісту квазикристалічної фази в результаті застосування інноваційної техніки холодного газодинамічного напылення (ХГН).

(англ.)

On the base of the results determined by using modern physical material science methods scientific principles referred to relationships for combined effect of severe plastic deformation and temperature on diffusive processes, phase transformation, evolution of structure and thermal stability of mechanical properties of nanostructured composite Al alloys reinforced by ultra fine particles of metastable quasicrystalline phases has been developed for the first time. The temperature-concentration intervals for existence of quasicrystalline and crystalline phases have been justified and proper morphology of those phases has been investigated. Furthermore, characteristic features of deformation substructure and composition of aluminium matrix depending on operating pressure and temperature have been found.

Principles for control of phase composition and structure as well as strength and plasticity characteristics of powdered composite quasicrystalline Al-Fe-Cr alloys have been justified during optimization of processing parameters. This would be valuable for development of conceptually new approaches used for creation of high-strength and heat-resistant Al-based alloys of increased thermostability of structure and properties. Process conditions for creation of high-strength quasicrystalline Al-based alloys have been justified and physical principles of strength and plasticity of the above alloys have been developed. This is thought to be scientific and technical foundation for improvement of conventional technological processes as well as for design of novel technical approaches for production of high-quality quasicrystalline Al-based alloys used at elevated temperatures, making them competitive all around the world. Consolidation of powdered nanoquasicrystalline  $Al_{94}Fe_3Cr_3$  alloy due to adiabatic shear instability provided with cold-spray (CS) technique has been justified for the first time in engineering practice. The main benefit of CS process is that the fraction volume of quasicrystalline phase was found to be retained in the structure of as-sprayed alloy.

#### 4. **Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності (заявка на патент, патент, свідоцтво на авторське право).**

Степанчук А.М., Шевчук А.М., Сахненко О.В. Патент на корисну модель України № UA58207 Спосіб отримання композиційного зносостійкого товстошарового покриття. Опубл.: Бюл.№ 7, 2012 р.

Степанчук А.М., Шевчук А.М., Бутримов Р.М. Патент на корисну модель України № 58208. Композиційний матеріал для отримання виробів та товстошарових покриттів для роботи в умовах інтенсивного абразивного зносу та ударних навантажень. Опубл.: Бюл.№ 7, 2012 р.

Биба Е. Г., Лобода П. И. Патент України на корисну модель №2725, МПК В22F 3/16. Спосіб отримання виробів з титанового сплаву ВТ1-00 з використанням механічних коливань / - № u201306286; заявлений 21.05.13.

#### 5. **Порівняння зі світовими аналогами.**

Результати роботи відповідають світовому рівню. Оптимізація термобаричних параметрів, швидкості та моди деформації при компактуванні порошкового сплаву дозволяє

підняти температуру стабільності структури та механічних властивостей квазікристалічних сплавів алюмінію на 50-70 градусів у порівнянні з більш дорогими сучасними порошковими сплавами алюмінію з інтерметалідними сполуками (сплави FVS, США), які можуть ефективно застосовуватись для роботи при температурах до 573-6783 К.

#### **6. Економічна привабливість для просування на ринок**

Отримані наукові результати мають практичний інтерес для розробки нових та вдосконалення існуючих технологічних варіантів виготовлення конкурентоспроможних на світовому рівні нових перспективних сплавів та покриттів з підвищеними фізико-механічними характеристиками на основі композиційних наноквазікристалічних сплавів системи Al-Fe-Cr, які мають перспективи застосування в легких інженерних конструкціях, працюючих при температурах 573–673 К, для заміни деталей із нержавіючої сталі та титанових сплавів.

Використання результатів розробки надасть можливість:

- зменшення ваги та собівартості елементів конструкцій; підняти температуру стабільності структури та механічних властивостей квазікристалічних сплавів алюмінію на 50-70 К у порівнянні з більш дорогими сучасними порошковими сплавами алюмінію з інтерметалідними сполуками (сплави FVS, США), які можуть ефективно застосовуватись для роботи при температурах до 572-673 К;

- підвищити в 1,5-2 рази показники властивостей міцності;

- та підвищити в 2 рази зносостійкість в умовах статичного та динамічного навантаження при кімнатній температурі та температурі 573 К у порівнянні з найбільш розповсюдженими та опанованими у виробництві промислових підприємств багатьох країн світу сплавами, що деформуються: АК4-1Ч (Україна, Росія), 2618 (США) та ливарними сплавами ВАЛ1 та АЛ21 (Україна, Росія), 201.0 та 354 (США), які рекомендують для експлуатації в умовах робочих температур відповідно до 425-473 К та до 525-573 К.

#### **7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, відомства, підприємства, організації).**

Авіаційна та аерокосмічна галузі; автотранспортна галузь; виробничі підприємства суднобудівного та машинобудівного профілю; Державне підприємство “Київський авіаційний завод «АВІАНТ»”; Державне підприємство «Завод 410 цивільної авіації»; Харківське державне авіаційне виробниче підприємство (ХДАВП); ЗАЗ (м. Запоріжжя); Бориспільський автозавод «Богдан»; вищі заклади освіти, зокрема НТУУ “КПІ”, інженерно-фізичний факультет, для використання у відповідних навчальних курсах та науковій роботі; наукові установи НАН України та інші науково-дослідні установи матеріалознавчого профілю.

#### **8. Стан готовності розробки (лабораторний або промисловий зразок, технічна документація, бізнес-план, готова до впровадження).**

Розроблено наукові принципи керування фазовим складом, структурою, рівнем характеристик міцності та пластичності порошкових композиційних квазікристалічних сплавів алюмінію системи Al-Fe-Cr за рахунок оптимізації параметрів обробки. Це дозволяє розвинути концептуально нові підходи щодо створення високоміцних та жароміцних сплавів алюмінію з підвищеною термостабільністю. Обґрунтовано умови отримання високоміцних станів квазікристалічних сплавів на основі алюмінію, суттєво розвинуто фізичні основи міцності та пластичності цих сплавів та закладено науково-технічні підвалини для вдосконалення існуючих технологічних варіантів та розробки нових підходів до виготовлення конкурентоспроможних високоміцних квазікристалічних сплавів алюмінію для роботи в умовах підвищених температур.

#### **9. Існуючі результати впровадження.**

Результати роботи впроваджено в навчальний процес: розроблено новий розділ «Композиційні квазікристалічні матеріали» в лекційному курсі «Композиційні матеріали»; новий розділ «Дисперсні системи з нано- та субмікроквазікристалічними частинками» в курсі «Хімія і фізика дисперсних систем»; новий розділ «Ідентифікація квазікристалічних

фаз методами фазового рентгеноструктурного аналізу» при викладанні курсу «Рентгенівський аналіз дисперсних матеріалів»; новий розділ «Отримання наноматеріалів методами інтенсивної пластичної деформації» з дисципліни: «Нанотехнології та наноматеріали»; нові лабораторні роботи: «Визначення температур фазових переходів та змін у кількісному складі квазікристалічних сплавів за даними диференціальної скануючої калориметрії»; «Визначення комплексу механічних властивостей матеріалів в умовах локального навантаження жорсткими пірамідальними інденторами» (курс «Фізичні методи дослідження»).

#### 10. Назва підрозділу, телефон, e-mail.

НТУУ «КПІ», інженерно-фізичний факультет, кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії, 406-83-79, [yurkova@iff.kpi.ua](mailto:yurkova@iff.kpi.ua).

#### 11. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки:

1. Білоцький О.В. Високотемпературна рентгенографія фазових перетворень у металевих матеріалах. *Монографія*. Київ: Міжнародна асоціація «Зварювання», 2012. – 222 с.

2. . Vyakova A.V., Yurkova A.I., Cherednichenko V.V., Scheretskiy A.A., Vlasov A.A. Structural Evolution and Phase Transformation in Nanoquasicrystalline Al-Fe-Cr Alloy: DSC Analysis // Proceedings of the International Conference «Nanomaterials: Application and Properties». – 2012. – Vol. 1, № 1. P. 01PCN19-1–01PCN19-4.

3. О.І. Юркова, О.В. Бякова, М.Г. Гриценко. Вплив пластичної деформації на структуру порошкового квазікристалічного Al-Fe-Cr сплаву // "Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2012. – № 3. – С. 94-98.

4. О.І. Юркова, В. В. Чередніченко, О.В. Бякова. Еволюція структури та механічних властивостей квазікристалічних Al-Fe-Cr сплавів під дією температури та тиску // *Металлофізика и новейшие технологии*, – 2012. - Т. 34, № 2. – С. 331-341.

5. О.В. Бякова, А.О. Власов, О.А. Щерецький. Дослідження фазових та структурних перетворень в наноквазікристалічних Al-Fe-Cr сплавах методом синхронного термічного аналізу // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2012. – Том 13, № 4. – С. 53-62.

6. 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.

7. Ю.В. Мильман, Н.А. Ефимов, И.В. Гончарова. Квазикристаллы – новый класс твердых тел с уникальными физическими свойствами // *Электронная микроскопия и прочность материалов*. – 2012, вып. 18, с. 3-15.

8. A.I. Yurkova, Yu.V. Milman, A.V. Vyakova. Structure and Mechanical Properties of Iron Resulted from Surface Severe Plastic Deformation by Friction with Simultaneous Nitrogen Saturation: I. Structure formation. // *Metally*. – 2012. – Vol. 2012, No. 4. – PP. 274–281.

9. A.I. Yurkova, Yu.V. Milman, A.V. Vyakova. Structure and Mechanical Properties of Iron Resulted from Surface Severe Plastic Deformation by Friction with Simultaneous Nitrogen Saturation: II. The mechanical properties of nano- and submicrocrystalline iron saturated with nitrogen during deformation // *Metally*. – 2012. – Vol. 2012, No. 4. – PP. 282-289.

10. A.V. Vyakova, A.I. Yurkova, V.V. Cherednichanko, A.I. Sirko. Cold-spray Technique as Efficient Alternative Process for Consolidation of Powdered Al-Fe-Cr alloys Reinforced by Nanoquasicrystalline Particles // Proceedings of the International Conference «Nanomaterials: Application and Properties». – 2012. – Vol. 2, Part II. – P. 270-278.

11. Yurkova A.I. , Vyakova A.V. Mechanical properties of nano- and submicrocrystalline iron subjected to severe plastic deformation by friction // Proceedings of the International Conference «Nanomaterials: Applications and Properties». – 2012. – Vol. 1, № 3. P. 03PCS106-1–. 03PCS106-4.

12. Ю.В.Мильман, Н.П.Захарова, М.О.Єфімов, А.О.Шаровський, М.І.Даниленко Наноструктурні сплави системи Al-Fe-Cr, зміцнені квазікристалічними частинками для використання при підвищених температурах // *Электронная микроскопия и прочность материалов*. – 2012, вып.18, с.16-24.

13. А.И. Юркова, А.В. Бякова, А.А. Власов. Термостабильность структуры и механических свойств наноквазикристаллического  $Al_{94}Fe_3Cr_3$  сплава, консолидированного экструзией // *Металлофизика и новейшие технологии*. - 2014. – Том 36. - № 2. – С. 184-196.

14. Byakova A., Gnyloskurenko S., Nakamura T. The role of foaming agent and processing route in the mechanical performance of fabricated aluminum foams // *Metals*. - 2012. – 2. – P. 95-112.

15. Alexandra Byakova, Iegor Kartuzov, Svyatoslav Gnyloskurenko, and Takashi Nakamura. The Role of Foaming Agent and Processing Route in Mechanical Performance of Fabricated Aluminum Foams // *Advances in Materials Science and Engineering*. – Volume 2014, P. 1-9. Article ID 607429.

16. Alexandra Byakova, Svyatoslav Gnyloskurenko, Yuriy Bezimyanniy and Takashi Nakamura. Closed-Cell Aluminum Foam of Improved Sound Absorption Ability: Manufacture and Properties // *Metals* 2014, 4, 445-454; doi:10.3390/met4030445.

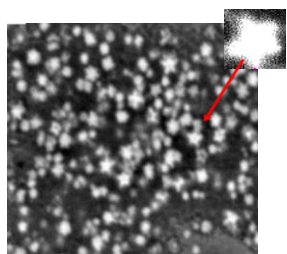
17. Alexandra Byakova, Yuriy Bezimyanniy, Svyatoslav Gnyloskurenko and Takashi Nakamura. Fabrication method for closed-cell aluminium foam with improved sound absorption ability // *Procedia Materials Science* 2014, V. 4, pp. 13–18.

18. Alexandra Byakova, Iegor Kartuzov, Takashi Nakamura, Svyatoslav Gnyloskurenko. The role of foaming agent and processing route in mechanical performance of fabricated aluminum foams // *Procedia Materials Science* 2014, V. 4, pp. 104 – 109.

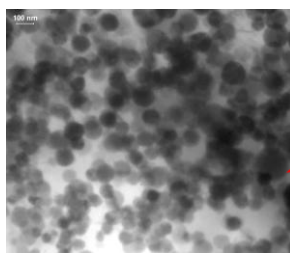
19. М.О.Єфімов, Ю.В. Мильман, Н.П.Захарова, Н.А.Ефимов, Н.И.Даниленко, А.О.Шаровский, О.Д.Нейков. Влияние структурного состояния упрочняющих наночастиц на механические свойства сплава  $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti_1$  // *Электронная микроскопия и прочность материалов*. –2013, вып. 19, с. 36-43.

38 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

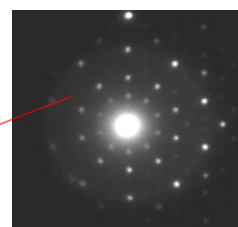
12. **Фото або слайди (декілька з фото) презентації розробки в електронному вигляді (рекламного характеру).**



СЕМ зображення структури сплаву  $Al_{94}Fe_3Cr_3$



ТЕМ зображення структури сплаву  $Al_{94}Fe_3Cr_3$



Картина мікродифракції, що відповідає окремій квазікристалічній частинці

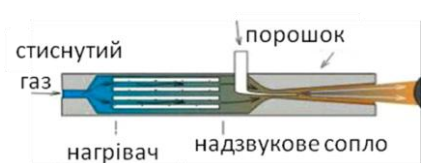


Схема напилювача

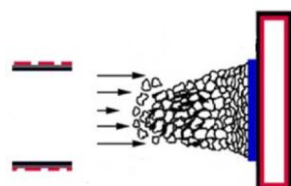


Схема нанесення ХГК покриття



ХГК покриття зі сплаву  $Al_{94}Fe_3Cr_3$