

Закономірності впливу квазігідростатичного стиску на структуру та механічні властивості кристалічних металоподобних речовин та квазікристалічних металевих матеріалів

Закономерности влияния квазигидростатического сжатия на структуру и механические свойства кристаллических металоподобных веществ и квазикристаллических металлических материалов

Regularities of quasihydrostatic compression influence on structure and mechanical properties of crystalline metal-like substances and quasicrystalline metallic materials

- 1. Номер державної реєстрації теми – 0115U000405.**
- 2. Науковий керівник–д.т.н., проф. Юркова О.І., Юркова А.И., Yurkova Alexandra I.**

3. Суть розробки, основні результати (укр.)

Вперше розвинуто фізичні уявлення і теоретичні положення щодо закономірностей впливу квазігідростатичного стиску, як найбільш жорстких умов деформації, на склад, фазові перетворення, структуру, властивості міцності та пластичності кристалічних металоподобних та квазікристалічних металевих фаз, включаючи висоководневий гідрид титану та композиційний сплав алюмінію системи Al-Fe-Cr з дрібнодисперсними частинками квазікристалічних фаз. Науково обґрунтовано основи керування складом, фазовими та структурними перетвореннями, рівнем характеристик міцності та пластичності зазначених матеріалів за рахунок оптимізації параметрів обробки в умовах квазігідростатичного стиску. Це надає змогу розвинути концептуально нові підходи щодо створення перспективних конструкційних гідридних матеріалів для захисту від радіаційного та нейтронного опромінення та композиційних квазікристалічних сплавів алюмінію з підвищеною термостабільністю. Обґрунтовані умови отримання високоміцних станів гідридних матеріалів та 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 гідридних матеріалів та квазікристалічних сплавів алюмінію для роботи в умовах підвищених температур.

Відмінною рисою отриманих результатів від вітчизняних та зарубіжних аналогів є вперше в світовій практиці експериментально обґрунтована можливість консолідації порошків крихкого гідриду титану та композиційного квазікристалічного сплаву на основі алюмінію в умовах квазігідростатичного стиску для суттєвого зниження температури процесу як для збереження високого вмісту водню в гідриді титану без застосування захисних оболонок при збереженні його біозахисних властивостей від радіаційного та нейтронного опромінення та температур експлуатації, так і збереження квазікристалічної фази в сплаві Al-Fe-Cr для досягнення більш високої міцності при збереженні достатньої пластичності у порівнянні з існуючими світовими аналогами – більш дорогими сучасними порошковими сплавами алюмінію з інтерметалідними сполуками (сплави FVS, США), які можуть ефективно застосовуватись для роботи при температурах до 300-400° С.

(рос.)

Впервые развиты физические представления и теоретические положения о закономерностях влияния квазигидростатического сжатия, как наиболее жестких условий деформации, на состав, фазовые превращения, структуру, прочностные и пластические свойства кристаллических металоподобных и квазикристаллических металлических фаз, включая гидрид титана с высоким содержанием водорода и композиционный сплав Al-Fe-Cr с мелкодисперсными частицами квазикристаллических фаз. Научно обоснованы основы управления составом, фазовыми и структурными превращениями, уровнем прочности и пластичности указанных материалов за счет оптимизации параметров

обработки в условиях квазигидростатического сжатия. Это дает возможность развитию концептуально новых подходов к созданию перспективных конструкционных гидридных материалов для защиты от радиационного и нейтронного облучения и композиционных квазикристаллических сплавов алюминия с повышенной термостабильностью. Обоснованы условия получения высокопрочных состояний гидридных материалов и квазикристаллических сплавов на основе алюминия, существенно развиты физические основы их прочности и пластичности, заложены научно-технические основы для совершенствования существующих технологических вариантов и разработки новых подходов к изготовлению конкурентоспособных на мировом уровне высококачественных гидридных материалов и квазикристаллических сплавов алюминия для работы в условиях повышенных температур.

Отличительной особенностью полученных результатов от отечественных и зарубежных аналогов является впервые в мировой практике экспериментально обоснованная возможность консолидации порошков хрупкого гидроксида титана и композиционного квазикристаллического сплава на основе алюминия в условиях квазигидростатического сжатия для существенного снижения температуры процесса как для сохранения высокого содержания водорода в гидриде титана без применения защитных оболочек при сохранении его биозащитных свойств от радиационного и нейтронного облучения и температур эксплуатации, так и сохранения квазикристаллической фазы в сплаве Al-Fe-Cr для достижения более высокой прочности при сохранении достаточной пластичности по сравнению с существующими мировыми аналогами – более дорогими современными порошковыми сплавами алюминия с интерметаллидными соединениями (сплавы FVS, США), которые могут эффективно применяться для работы при температурах до 300-400° С.

(англ.)

For the first time physical representations and theoretical assumptions about the regularities of the influence of quasi-hydrostatic compression, as the most stringent conditions of deformation, on the composition, phase transformations, structure, strength and plastic properties of crystalline metal-like and quasicrystalline metal phases, including titanium hydride with a high hydrogen content and Al-Fe-Cr alloy with finely dispersed particles of quasicrystalline phases. The fundamentals of controlling the composition, phase and structural transformations, the level of strength and plasticity of these materials are scientifically justified by optimizing processing parameters under conditions of quasi-hydrostatic compression. This enables the development of conceptually new approaches to the creation of promising structural hydride materials for protection against radiation and neutron irradiation and composite quasicrystalline aluminium alloys with enhanced thermal stability. The conditions for obtaining high-strength states of hydride materials and quasicrystalline aluminium-based alloys are substantiated, the physical foundations for their strength and plasticity are substantiated, scientific and technical bases for improving existing technological options and developing new approaches to manufacturing world-class competitive high-quality hydride materials and quasi-crystalline aluminium alloys for work in high temperatures conditions.

A distinctive feature of the obtained results from domestic and foreign analogues is for the first time in the world practice an experimentally grounded possibility of consolidating powders of brittle titanium hydride and a composite quasicrystalline aluminium-based alloy under quasi-hydrostatic compression conditions for a significant reduction in the process temperature, both for maintaining a high hydrogen content in titanium hydride without the use of protective shells while maintaining its biosecurity properties from radiation and neutron and maintenance of the quasicrystalline phase in the Al-Fe-Cr alloy to achieve a higher strength while maintaining sufficient ductility in comparison with existing world analogue – more expensive modern powder aluminium alloys with intermetallic compounds (FVS alloys, USA), which can be effectively used for operation at temperatures up to 300-400 °C.

4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності

Юркова О.І., Кравченко О.І., Гущик Д.В. Формування структури та механічних властивостей квазікристалічного сплаву Al-Fe-Cr в умовах квазігідростатичного стиску. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір наукового характеру № 73261 від 23.06.2017 р.

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Результати роботи відповідають світовому рівню, а застосування консолідації порошків висоководневого гідриду титану та квазікристалічного сплаву Al-Fe-Cr в умовах квазігідростатичного стиску для суттєвого зниження температури процесу не має аналогів у світовій практиці та дозволяють забезпечити як збереження водню без застосування захисних оболонок при збереженні більш високих, у порівнянні з наповненими полімерами, біозахисних властивостей від радіаційного та нейтронного опромінення та температур експлуатації, так і збереження квазікристалічної фази та досягти більш високої міцності при збереженні достатньої пластичності у порівнянні з більш дорогими сучасними порошковими сплавами алюмінію з інтерметалідними сполуками (сплави FVS, США), які можуть ефективно застосовуватись для роботи при температурах до 300-400° С.

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 висоководневих гідридних матеріалів з підвищеними біозахисними властивостями від радіаційного та нейтронного опромінення для застосування в атомній енергетиці та сплавів з підвищеними фізико-механічними характеристиками на основі композиційних наноквазікристалічних сплавів Al-Fe-Cr, які мають перспективи застосування в легких інженерних конструкціях для заміни деталей із нержавіючої сталі та титанових сплавів.

Використання результатів розробки надасть можливість:

- заміни ексклюзивного матеріалу RX-277 (США) на висоководневий гідридний матеріал вітчизняного виробництва для захисту від нейтронного опромінювання в контейнерах для зберігання ядерних відходів АЕС;

- забезпечення більш високих, у порівнянні з наповненими полімерами (борований поліетилен), біозахисних властивостей від радіаційного та нейтронного опромінення при більш високих температурах експлуатації, зокрема, ядерно-енергетичних установок (ЯЕУ) нового покоління, контейнерів для зберігання відходів ядерного палива АЕС, а також може застосовуватися в реакторах-перетворювачах для космічної галузі. У порівнянні з наповненими полімерами гідрид титану має більш високі температури експлуатації та припустимий флюенс нейтронів.

- зменшення ваги та собівартості елементів конструкцій; підняти температуру стабільності структури та механічних властивостей квазікристалічних сплавів алюмінію на 50-70 ° у порівнянні з більш дорогими сучасними порошковими сплавами алюмінію з інтерметалідними сполуками (сплави FVS, США), які можуть ефективно застосовуватись для роботи при температурах до 300-400°С;

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

- підвищити в 2 рази зносостійкість в умовах статичного та динамічного навантаження при кімнатній температурі та температурі 300°С 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).

Атомна енергетика, 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».

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

Розроблено наукові принципи керування 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. Форма участі інвестора (яка краща форма участі в реалізації результатів проекту інвестора: частка в проект і%, частка від прибутку %, інше)

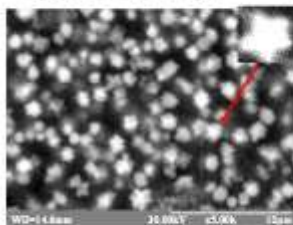
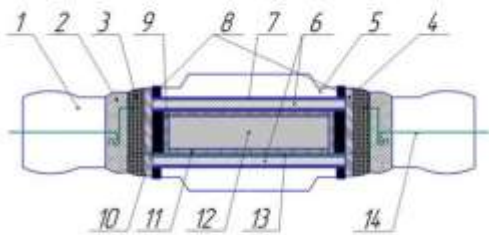
Кращою формою участі інвестора в реалізації результатів проекту є дольова участь у розмірі 50 %.

11. Назва підрозділу, телефон, e-mail.

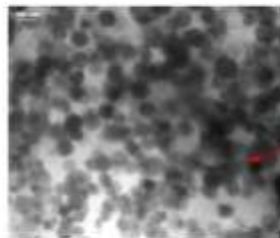
КПІ імені Ігоря Сікорського, інженерно-фізичний факультет, кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії, (044)204-83-79, yurkova@iff.kpi.ua.

12. Фото розробки

Рис. 1. Схема комірки високого тиску: 1 – торойдне кільце; 2 – зовнішня втулка; 3 – внутрішня втулка; 4 – теплоізоляційна втулка; 5 – теплоізоляційний диск; 6 – композиційний дисковий нагрівач; 7 – графітовий диск; 8 – струмопровідне кільце; 9 – ізоляційна втулка; 10 – трубчатий нагрівач; 11 – ізоляційний внутрішній диск; 12 – пресовка з порошку; 13 – графітовий диск; 14 – термонара



SEM зображення структури сплаву $\text{Al}_{94}\text{Fe}_3\text{Cr}_3$



ТЕМ зображення структури сплаву $\text{Al}_{94}\text{Fe}_3\text{Cr}_3$



Картина мікродифракції, що відповідає окремої квазікристалічної частинці

13. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки

1. Юркова А.И., Бякова А.В., Власов А.А. Термостабільність структури і механічних властивостей наноквазікристалічного $\text{Al}_{94}\text{Fe}_3\text{Cr}_3$ сплаву, консолідованого екструзією // *Металлофізика і новітні технології (Metallofiz. Noveishie Tekhnol.)*. - 2015. – Том 37. - № 7. – С. 1001-1018.
2. Юркова А.И., Кравченко А.И., Бякова А.В., Власов А.А. Термостабільність структури і механічних властивостей наноквазікристалічного $\text{Al}_{94}\text{Fe}_3\text{Cr}_3$ сплаву // *Металлофізика і новітні технології (Metallofiz. Noveishie Tekhnol.)* – 2016, т. 38, № 11, сс.1463—1477.
3. Biba Ye. G., P. I. Loboda. Effect of Mechanical Vibration on the Kinetics of Dehydrogenation and Structure Formation of TiH_2 Powder Compacts During Electron Beam Sintering // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. March 2015, Volume 53, Issue 11, pp 628–633.
4. Byakova A., Yurkova A. Structural Performance of Nanoquasicrystalline Composites Based on Al-Fe-Cr-alloy: Synthesis and Key Characteristics // *Proceedings of the 2017 IEEE 7th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties*. – 2017. – Part 3. – P. 03NNSA03-1-03NNSA03-5.
5. B.A. Galanov, Yu.V. Milman, S.I. Chugunova, I.V. Voskoboinik. Application of the improved inclusion core model of the indentation process for the determination of mechanical properties of materials // *Crystals (2073-4352)*. – 2017. – Vol. 7, Issue 3. – P. 1-13.
6. Yurkova A.I., Chernyavskii V.V., Gorban V.F. Structure and Mechanical Properties of High-Entropy AlCuNiFeTi and AlCuNiFeCr Alloys Produced by Mechanical Activation Followed by Pressure Sintering // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. July 2016, Vol. 55, Issue 3, pp 152–163.
7. Yurkova A., Chernyavsky V., Scheretskiy O. Structural evolution during mechanical alloying and subsequent annealing of high-entropy AlCuNiFeTi alloy // *Material Science. Nonequilibrium Phase Transformation*. – 2015. – №. 1. – P. 32-35.
8. Мильман Ю.В., Голубенко А.А., Дуб С.Н. Определение нанотвердости при фиксированном размере отпечатка твердости для устранения масштабного фактора // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*, 2015. № 2 (96)., с. 171-176.
9. Юркова А.И., Чернявский В.В., Горбань В.Ф. Структура и механические свойства высокоэнтропийных AlCuNiFeTi и AlCuNiFeCr сплавов, полученных механическим

- легированием с последующим спеканием под давлением // Порошковая металлургия. - 2016. - № 3/4. - С.37-52.
10. Биба Є.Г., Лобода П.І. Вплив механічних коливань на кінетику дегідрування і формування структури пресовок із порошку TiH_2 під час електронно-променевого спікання // Порошкова металлургія. – 2014, № 11-12, с. 15-21
11. B.A. Galanov, Yu.V. Milman, S. A. Ivakhnenko and et al. Improved Core Model of Indentation and Its Application to Measure Diamond Hardness // Journal of Superhard Materials, 2016, Vol. 38, No. 5, pp. 289-305
12. Юркова О.І., Кравченко О.І., Бякова О.В., Гущик Д.В. (студент). // Структура та механічні властивості наноквазікристалічного $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву, консолідованого в умовах квазігідростатичного стиску // "Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2017. – № 6. – С. 81-89.
13. Кравченко О.І., Гущик Д.В. (студент). Структура та фазовий склад квазікристалічного $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву, консолідованого в умовах квазігідростатичного стиску // Металознавство та обробка металів. – 2016. – № 2. – С. 65-66.
14. Богук Ю.О. (студент), Кравченко О.І., Биба Є.Г. Термостабільність структури швидкогартованого наноквазікристалічного $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву // Металознавство та обробка металів. – 2016. – № 2. – С. 50-52.
15. Юркова А.И., Чернявський В.В., Ю.М. Романенко. Структура та фазовий склад високоентропійного $AlCuNiFeTi$ сплаву, отриманого методом механічного легування // Металознавство та обробка металів. – 2015.- № 1. – С. 11-18.
16. Yurkova A.I., Chernyavsky V.V., Scheretskiy O.A., Voichenko A.V. (студент), Matveev O.M. (студент). Phase and structural evolution during mechanical alloying, subsequent annealing and pressure sintering of $AlCuNiFeCr$ high-entropy alloy // Металознавство та обробка металів. - 2015. - № 4. - С. 17-23.
17. Ю.В Мильман, Н.А.Ефимов, Н.П.Захарова, и др. Структура и прочностные характеристики деформируемых сплавов алюминия легированных скандием, цирконием и ниобием // Электронная микроскопия и прочность материалов. – 2015. – Вып. 21. – С. 23-29.
18. Большаков О.Є. (студент), >Чернявський В.В.< Структура та механічні властивості високоентропійних сплавів, отриманих механічним легуванням та спіканням під тиском // Металознавство та обробка металів. – 2016. – № 2. – С. 57-59.
19. Юркова О.І., Чернявський В.В., Матвеев О.М. (студент), Гандзюк С.Ю. (студент). Багатокомпонентні $AlSiNiCoFeCr$ і $AlSiNiCoFeCrTi$ високоентропійні покриття на сталі // "Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2017. – № 2. – С. 81-88
20. Ю.В Мильман, Н.А.Ефимов, Н.П.Захарова, и др. Структура и прочностные характеристики деформируемых сплавов алюминия легированных скандием, цирконием и ниобием // Электронная микроскопия и прочность материалов. – 2015. – Вып. 21. – С. 23-29.
21. Yurkova A., Byakova A., Kravchenko A. Structural evolution and phase transformation in nanoquasicrystalline $Al-Fe-Cr$ alloy // International Scientific-Methodological Conference “How to teach material sciences: new approaches and experiences from the MMATENG project”, July 23, 2015: conference proceedings. – Krakow, 2015. – P. 83-88.
22. Yurkova A., Chernyavsky V. Phase and Structural evolution during mechanical milling and subsequent annealing of high-entropy $AlCuNiFeCr$ alloy // International Scientific-Methodological Conference “How to teach material sciences: new approaches and experiences from the MMATENG project”, July 23, 2015 : conference proceedings. – Krakow, 2015. – P. 89-94.

14. Ключові слова: квазігідростатичний стиск, гідрид титану, квазікристалічний сплав, деформація, структура, механічні властивості