УДК 621.785.532

СТРУКТУРА ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КВАЗІКРИСТАЛІЧНОГО $Al_{94}Fe_3Cr_3$ СПЛАВУ, КОНСОЛІДОВАНОГО В УМОВАХ КВАЗІГІДРОСТАТИЧНОГО СТИСКУ

аспірант О.І. Кравченко[1], д.т.н., проф. О.І. Юркова[1], д.т.н. О.В. Бякова[2], студент Д.В Гущик[1]

[1]Національний Технічний Університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Інженерно-фізичний факультет, кафедра ВТМ та ПМ

[2]Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

E-mail: kravchenko.kpi@yandex.ru

Досліджено вплив тиску на структуру та механічні властивості композиційного наноквазікристалічного $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву. За допомогою гідростату, який було зібрано у інституті проблем матеріалознавства (ІПМ), проведено компактування зразків. Завдяки комплексу високоінформативних методів фізичного матеріалознавства (електронної мікроскопії та мікромеханічних випробувань) досліджено структуру та механічні властивості порошкового квазікристалічного (КК) $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву під час консолідації в умовах високому тиску.

Квазікристалічні сплави на основі Al належать до класу найновітніших металевих матеріалів для застосування в легких інженерних конструкціях, насамперед, в авіації, аерокосмічній техніці, автотранспортній галузі [1, 2]. Зазначені матеріали найчастіше виготовляють у вигляді порошків, що обумовлено великою продуктивністю методів порошкової металургії. Отже, важливе значення у виготовленні виробів належить методам компактування порошків, але це пов'язане з певними труднощами, тому їх вибір потребує уваги зважаючи не тільки на схильність квазікристалів до крихкого руйнування, але і на метастабільну природу квазікристалічних фаз. Вважаючи на застосування матеріалів в якості конструкційних, першорядне значення набувають їх механічні характеристики, але, як відомо авторам, систематичні дослідження впливу деформації на їх механічні властивості досі не проводилися.

Використання деформації не тільки для зміни форми, але і консолідації порошкових матеріалів є важливим для розробки новітніх технологій створення матеріалів з заданими властивостями. Певні можливості в цьому напрямку надає метод квазігидростатичного стиску [3] , який може забезпечити нетривіальну комбінацію властивостей міцності та пластичності матеріалів. З цієї точки зору цей метод набуває особливого значення для формування комплексу механічних властивостей для квазікристалічних сплавів на основі алюмінію. Застосування для консолідації композиційних квазікристалічних порошків системи Al-Fe-Cr високого тиску ґрунтується на демонстрації в умовах квазігідростатичного стиску високої пластичності матеріалів. Такий підхід забезпечує зниження температури процесу та створює умови для повного збереження метастабільної квазікристалічної фази на відміну від теплої та гарячої екструзії. Нетривіальність такого підходу базується на тому, що в умовах одночасної дії температури та тиску нами раніше встановлена часткова втрата квазікристалічної фази, і як наслідок, зменшення зміцнення сплаву в цілому після компактування екструзією [4].

Робота присвячена дослідженню структури та механічних властивостей композиційного порошкового $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву, консолідованого шляхом пластичної деформації в умовах квазігідростатичного стиску.

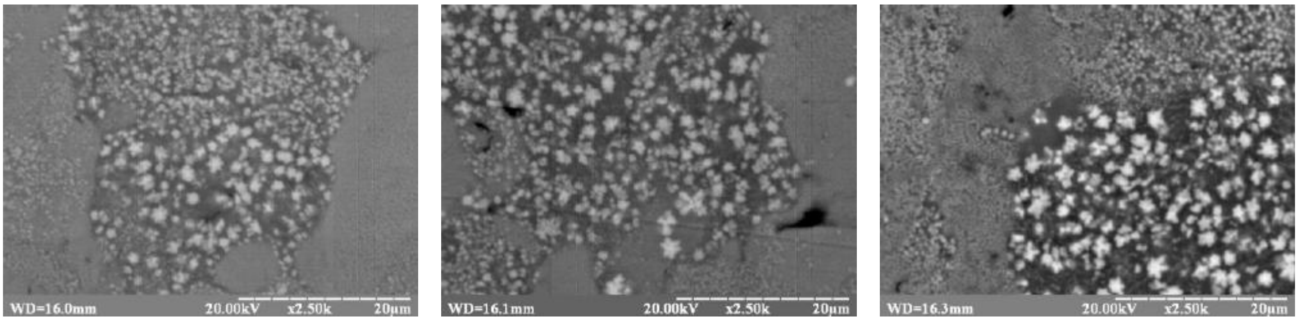
В роботі використовували порошок $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву, виготовлений методом диспергування розплаву струменями води з високим тиском, з розміром частинок ≤ 40 мкм. Компактні зразки виготовляли в умовах квазігідростатичного стискання у комірках високого тиску при кімнатної температурі (без нагрівання) під тиском 2,5; 4 та 6 ГПа.

Дослідження структури консолідованих зразків проводили за допомогою скануючого електронного мікроскопу РЕММА-101А у відбитих електронах. Мікротвердість HV

визначали в умовах індентування при статичному вдавлюванні на приладі ПМТ-3, оснащеному стандартною пірамідою Віккерса, при навантаженні на індентор 1 Н. Умовну границю плинності $\sigma_{0,2}$ та границю пружності σ_e визначали за кривими «напруження-деформація», які будували за методикою [5] із застосуванням комплекту з алмазних тригранних інденторів з різними кутами загострення γ_1, а саме, 45°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70°, 75°, 80°, 85°. Вважаючи на те, що деформація під індентором в напрямку прикладеного навантаження головним чином визначається кутом $\varepsilon \approx -\ln \sin \gamma_1$ [5], такий підхід дозволяв проводити випробування в широкому інтервалі величин деформації ε (від 0,04 до 0,35). Модуль Юнга E визначали в умовах безперервного вдавлювання, в основу якого покладений метод Олівера і Фарра [6]. Характеристику пластичності δ_H розраховували за величинами мікротвердості HV, модуля Юнга E та коефіцієнта Пуассона ν відповідно до методики [7, 8] за формулою:

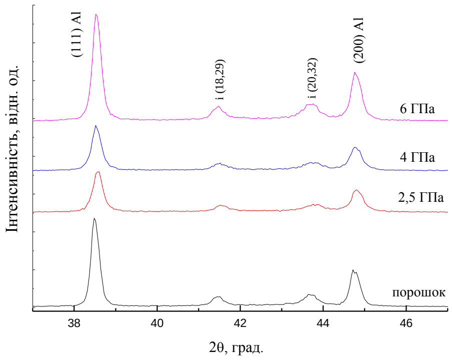
$$\delta_H = 1 - 14.3\left(1 - \nu - 2\nu^2\right)\frac{HV}{E}$$

В мікроструктурі компактованого в умовах високого тиску сплаву спостерігається велика кількість нано- та субмікророзмірних частинок, які на СЕМ зображенні мають світлий колір (рис. 1). Деякі з частинок мають форму п’ятикутних зірочок, що, очевидно, є виявленням симетрії 5-го порядку пакування атомів в ікосаедричному квазікристалі. За даними електрономікроскопічних досліджень (рис. 1) розмір частинок квазікристалічної і–фази знаходився в межах 50–200 нм. Слід зазначити, що внаслідок різних умов охолодження водяних струменів під час розпилення розплаву розмір квазікристалічних частинок виявився неоднаковим (рис. 1), досягаючи в деяких випадках розміру 1,0-1,5 мкм. При збільшенні тиску пресування від 2,5 до 6 ГПа спостерігається більш щільне розташування частинок квазікристалічної фази (рис 1 б, в).



а б в

Рис. 1. СЕМ зображення структури $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву після компактування під тиском: а – 2,5; б – 4; в – 6 ГПа



Наявність в сплаві квазікристалічної фази (і-фази), розташованої в матричної α-Al фазі порошкового $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву, підтверджується рентгенівськими дослідженнями. За даними фазового рентгеноструктурного аналізу (рис. 2) зазначені в мікроструктурі (рис. 1) світлі частинки мають квазікристалічну природу.

Рис. 2. Фрагменти спектрів рентгенівської дифракції $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву у вигляді порошку та після компактування під тиском: а – 2,5; б – 4; в – 6 ГПа

В спектрах рентгенівської дифракції, крім дифракційних максимумів (111) та (200) від твердого розчину α-Al реєструються дифракційні піки від квазікристалічної і-фази, які відповідають індексам Кана (6,9), (18, 29) [9]. Важливим є те, що інтегральні інтенсивності дифракційних піків від метастабільної квазікристалічної і-фази в консолідованих під тиском (2,5; 4; 6 ГПа) при кімнатній температурі зразках $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву є тотожними для цієї фази в вихідному порошку (рис. 2), засвідчуючи повне збереження її вмісту в структурі матеріалу після компактування на відміну від консолідації в умовах екструзії при температурі 623 К, коли втрати і-фази досягають 23% [4].

Криві «напруження – деформація», побудовані методом індентування, для $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву після компактування в умовах квазігідростатичного стиску при різних тисках (2,5; 4 і 6 ГПа) наведено на рис. 3. Визначення напружень σ здійснювали за величинами мікротвердості *HM* у наближенні Тейбора $\frac{HM}{\sigma_s} = 3$ [10]. Оскільки твердість за Мейером *HM* є середнім контактним тиском і може бути перерахована на границю плинності σ_s або умовну границю плинності $\sigma_{0,2}$ при стисканні, криві «*HM* – ε» є аналогом кривих деформації [5, 7]. Таким чином, індентування різними за кутом біля вершини піраміди інденторами є ефективним підходом (методом) до побудови кривих «напруження – деформація». Характеристику $\sigma_{0,2}$ екстрагували за побудованими кривими «напруження – деформація» при ступені пластичної деформації ε = 0,2 %. а параметр σ_e. при ступені пластичної деформації ε=0,05 % Границю пружності σ_e визначають, як напруження, при якому пластична (залишкова) деформація досягає 0,005-0,05 %.

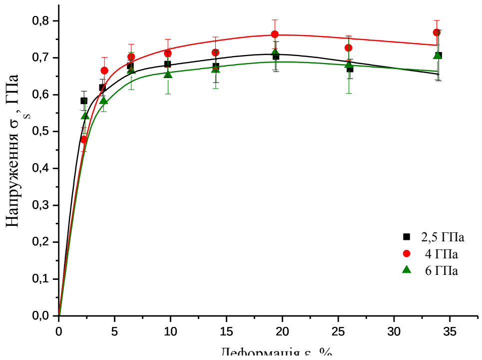


Рис. 3. Криві «напруження – деформація» $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву після компактування під тиском 2,5; 4; 6 ГПа

Результати мікромеханічних випробувань наведено в табл. 1. Мікротвердість $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву, компактованого при різних тисках, майже однакова і змінюється в межах похибки, але вона значно вище (в 2 рази) мікротвердості сплаву у вигляді порошку (табл. 1).

Таблиця 1

Механічні характеристики порошкового $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву до та після консолідації в умовах високого тиску

Параметр / Матеріал	Модуль Юнга *E*, ГПа	Мікротвердість HV, ГПа	Характеристи-ка пластичності δ_H	умовна границя плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	границя пружнос-ті σ_e, МПа
Порошок	–	0,91±0,3	0,92	–	–
Консолідований при 2,5 ГПа	85	1,84±0,21	0,85	565	315
Консолідований при 4 ГПа	71	2,00±0,19	0,81	578	327
Консолідований при 6 ГПа	69	1,94±0,2	0,80	585	330
Екструдований [4]	72	1,62±0,04	0,87	360	–

Аналіз результатів мікромеханічних випробувань в умовах індентування свідчить про те, що, незважаючи на однакову кількість квазікристалічної і-фази у вихідному порошку та після його компактування в умовах високого тиску, деформаційне зміцнення $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву призводить до істотного збільшення його мікротвердості *HV* (табл. 1). Крім того, завдяки повному збереженню квазікристалічної і-фази у складі сплаву після компактування, його характеристики міцності (мікротвердість HV та границя плинності $\sigma_{0,2}$) перевищують аналогічні характеристики сплаву, компактованого екструзією (табл. 1), яка здійснюється при комплексному впливі підвищеної температури 653 К і тиску, який в поздовжньому та поперечному напрямку досягає P_l = 1,42 ГПа і P_t = 3,30 ГПа, відповідно, та викликає часткову втрату квазікристалічної і-фази [4].

Незважаючи на значне деформаційне зміцнення матеріалу, яке характеризується високими значеннями мікротвердості та умовної границі плинності $\sigma_{0,2}$, характеристика пластичності δ_H $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву, консолідованого в умовах високого тиску, не зазнає істотних змін, виявляється дещо (~ на 8 %) меншою від цього параметру для вихідного порошку (δ_H = 0,92), залишаючись наближеною до критичного значення (δ_H = 0,90), що свідчить про пластичну поведінку матеріалу в умовах стандартних випробувань на розтягнення та згину, і достатньою для ефективного функціонування поверхневих шарів без руйнування під навантаженням.

Застосуванням методу компактування в умовах високого (квазігідростатичного) тиску показана можливість отримання композиційного нанноквазікристалічного $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву з повним збереженням частинок метастабільної квазікристалічної і-фази в алюмінієвої матриці та високим рівнем міцності та достатньої пластичності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Dubois, J-M. Properties- and applications of quasicrystals and complex metallic alloys. *Chem.Soc.Rev.* **2012**, *41*, 6760–6777.

2. Asunción García-Escorial, Eduardo Natale, Victoria J. Cremaschi, Iain Todd, Marcela Lieblich. Quasicrystalline $Al_{93}Fe_3Cr_2Ti_2$ alloys // REVISTA DE METALURGIA. – 2015. – № 51. – С. 2 4–29.

3. Глезер А. М. Аморфно-нанокристаллические сплавы / А. М. Глезер, М. А. Шурыгина. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 452 с. – (ISBN 978-5-9221-1547-6).

4. А.И. Юркова, А.В. Бякова, А.А. Власов. Термостабильность структуры и механических свойств наноквазикристаллического Al94Fe3Cr3 сплава, консолидированного экструзией // Металлофизика и новейшие технологии. - 2015. – Том 37. - № 7. – С. 1001-1018.

5. Галанов Б.А., Мильман Ю.В., Чугунова С.И., Гончарова И.В., Исследование механических свойств сверхтвердых материалов при индентировании // Сверхтвердые материалы. –1999. – Т. 21, № 3. – С. 23-35.

6. Oliver W. C., Pharr G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. – 1992. – 7, No. 6. – P. 1564–1583.

7. О. В. Бякова, О. І. Юркова, Ю. В. Мільман, О. В. Білоцький Теоретичні основи і методи визначення механічних властивостей матеріалів та покриттів при індентуванні на макро- та макрорівнях –Київ: Гаран-Сервіс. – 2010. – 144 с.

8. Yu.V. Milman. Plasticity characteristic obtained by indentation // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2008. – V.41. – 074013.

9. J.W. Cahn, D. Shechtman, D. Gratias. Indexing of icosaedral quasiperiodic crystals // Materials Research Society. – 1986. – V.1. – P.13-26.

10. D. Tabor. The Hardness of Metals. – Oxford: Clarendon Press, 1951, 2000. – 130 p.