

УДК 621.785.532

Вплив температури на структуру та механічні властивості композиційного квазікристалічного сплаву $Al_{94}Fe_3Cr_3$, консолідованого під тиском

О. І. Юркова, доктор технічних наук, професор
О. І. Кравченко

Національний технічний університет України імені І.Сікорського – “КПІ”, Київ

Методами фазового рентгеноструктурного аналізу, скануючої електронної мікроскопії та мікромеханічних випробувань досліджено вплив температури на еволюцію структури та формування механічних властивостей композиційного сплаву $Al_{94}Fe_3Cr_3$ з нанорозмірними частинками метастабільної ікосаедричної квазікристалічної фази (і-фази), консолідованого в умовах квазігідростатичного стиску (2,5 і 4,0 ГПа) при кімнатній температурі. Показано, що характеристики міцності сплаву зберігають високі значення до температури 400 °С, вище за яку починається розчинення квазікристалічних частинок і-фази з одночасним формуванням кристалічного метастабільного інтерметаліду Al_6Fe . Суттєве зниження міцності сплаву відбувається при підвищенні температури відпаалу до 600 °С, яке супроводжується перетворенням метастабільного інтерметаліду Al_6Fe в стабільні кристалічні u-фази $Al_{13}Cr_2$ та $Al_{13}Fe_4$.

Алюмінієві сплави є основою для створення легких інженерних конструкцій, насамперед, в авіації, аерокосмічній техніці, автотранспортній галузі, тощо. Серед низки цих сплавів значний інтерес вчених та інженерів викликають композиційні сплави на основі алюмінію, зокрема сплави на основі систем Al – Fe – Cr, зміцнені дисперсними частинками квазікристалічних фаз [1, 2]. Ці сплави відрізняються від крихких однофазних квазікристалічних сплавів, виявляючи необхідну для інженерної практики комбінацію високої міцності з достатньою пластичністю [1, 3]. Важливим є те, що низька щільність цих сплавів поєднується з їх високою міцністю в умовах підвищених температур завдяки уповільненню дифузійних процесів в квазікристалах [3 – 5], високою зносо- та корозійною стійкістю, низькою теплопровідністю [1, 4, 6]. Незважаючи на велику перспективу застосування в промисловості квазікристалічних сплавів на основі алюмінію в майбутньому завдяки їх цікавим й часом несподіваним властивостям, їх промислове виробництво залишається досить обмеженим і до тепер такі матеріали ще не знайшли свого широкого використання.

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'язано з певними труднощами, тому їх вибір потребує уваги зважаючи на метастабільну природу квазікристалічної фази, яка в системі Al – Fe – Cr може існувати тільки в рівновазі з твердим розчином α -Al [2, 3, 5]. Створення таких матеріалів, їх застосування в техніці визначає необхідність систематичного вивчення впливу технології отримання, структури, фазового складу на комплекс механічних властивостей.

Використання деформації для консолідації порошкових матеріалів є важливим для розробки нових технологій створення матеріалів з заданими властивостями. Певні можливості в цьому напрямку надає метод квазігідростатичного стиску, який може забезпечити нетривіальну комбінацію властивостей міцності та пластичності матеріалів. З цієї точки зору цей метод набуває особливого значення для формування зазначеного комплексу механічних властивостей для квазікристалічних сплавів на основі алюмінію. Застосування високого тиску для консолідації композиційних квазікристалічних порошків системи Al – Fe – Cr 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 екструзії при температурі 623 К, коли втрати квазікристалічної і-фази можуть досягати 23 % [7], та досягти більш високої міцності при збереженні достатньої пластичності.

Виходячи з того, що системні дослідження термостабільності квазікристалічного порошкового сплаву Al – Fe – Cr, консолідованого в умовах квазігідростатичного стиску, до сих пір не проводилися, метою цієї роботи було вивчення впливу температури на фазовий склад, структуру і механічні властивості зазначеного сплаву.

В дослідженнях використовували порошок сплаву номінального складу $Al_{94}Fe_3Cr_3$ (Al – 5,86Fe – 5,45Cr, мас. %) з розміром частинок ≤ 63 мкм, виготовлений диспергуванням розплаву з температурою 1300 °С струменями води високого тиску (10 МПа) з рН = 3,5 [8]. Об'ємний вміст квазікристалічної і-фази в порошку $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву не перевищував 30 % [9]. Консолідацію порошку виконували в умовах квазігідростатичного стиску у комірках високого тиску при 2,5 та 4,0 ГПа за кімнатної температури. Відпал зразків проводили у вакуумній печі в температурному інтервалі від 350 до 600 °С. Дослідження структури та фазового складу зразків після відпалу проводили за допомогою скануючого електронного мікроскопу РЕММА-101А у відбитих електронах та рентгенівського дифрактометра Ultima IV, Rigaku. Присутність квазікристалічної і-фази встановлювали за трьома найбільш інтенсивними дифракційними максимумами з індексами Кана (N, M) – (18,29), (20,32) і (52,84) [10]. Період решітки матричного твердого розчину α -Al розраховували відповідно до загальноприйнятої методики за положенням дифракційних максимумів (311).

Комплекс механічних властивостей зразків визначали в умовах мікроіндентування. Мікротвердість HV, характеристику пластичності δ_n ,

границю плинності $\sigma_{0,2}$ визначали при статичному вдавлюванні на приладі ПМТ-3, оснащеному стандартною пірамідою Віккерса та комплектом алмазних тригранних інденторів з різними кутами загострення (від 45° до 85°. Випробування проводили при навантаженні на індентор 1 Н. Умовну границю плинності $\sigma_{0,2}$ визначали за кривими «напруження-деформація», які будували за методикою [11]. Характеристику пластичності δ_n розраховували за величинами мікротвердості HV і модуля Юнга E відповідно до методики [12]. Модуль Юнга E визначали в умовах безперервного вдавлювання індентора (алмазної піраміди Берковича з кутом загострення 65°) на приладі «Мікрон-гама». Випробування проводили при навантаженні 1,5 Н у відповідності з міжнародним стандартом ISO 14577-1:2002 (E) [13]. Проведені випробування показали, що для дослідженого сплаву номінального складу $Al_{94}Fe_3Cr_3$, отриманого під тиском 2,5 та 4,0 ГПа, модуль Юнга E складає 85 ГПа та 71 ГПа, відповідно.

Дослідження змін у складі сплаву, які відбуваються в результаті відпалу при різних температурах, за даними рентгеноструктурного аналізу (табл. 1) виявили, що квазікристалічна і-фаза повністю зберігається в сплаві, консолідованому при тисках 2,5 і 4,0 ГПа, до температури 400 °С.

Таблиця 1

Вплив температури відпалу на фазовий склад та період решітки матричного α -Al твердого розчину квазікристалічного сплаву $Al_{94}Fe_3Cr_3$, консолідованого в умовах квазігідростатичного стискування

Температура відпалу, °С	Тиск, ГПа	Фазовий склад	Період решітки α -Al, нм
20	2,5	α -Al + і-фаза	0,40469
	4,0	α -Al + і-фаза	0,40469
350	2,5	α -Al + і-фаза	0,40474
	4,0	α -Al + і-фаза	0,40476
400	2,5	α -Al + і-фаза	0,40489
	4,0	α -Al + і-фаза	0,4049
450	2,5	α -Al + і-фаза + Al_6Fe	0,40464
	4,0	α -Al + і-фаза + Al_6Fe	0,40481
500	2,5	α -Al + Al_6Fe	0,40492
	4,0	α -Al + Al_6Fe	0,40491
550	2,5	α -Al + Al_6Fe + $Al_{13}Cr_2$ + $Al_{13}Fe_4$	0,40494
	4,0	α -Al + Al_6Fe + $Al_{13}Cr_2$ + $Al_{13}Fe_4$	0,40493
600	2,5	α -Al + $Al_{13}Cr_2$ + $Al_{13}Fe_4$	0,40493
	4,0	α -Al + $Al_{13}Cr_2$ + $Al_{13}Fe_4$	0,40492

Підвищення температури відпалу викликає поступове зникнення квазікристалічної ϵ -фази з одночасною появою кристалічного метастабільного інтерметаліду Al_6Fe , а потім стабільних інтерметалідних Θ -фаз: $\text{Al}_{13}\text{Cr}_2$ та $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$. В роботі [14] прямими електронномікроскопічними спостереженнями *in-situ* в процесі нагрівання спінінгованих стрічок показано, що фазові перетворення відбуваються за класичним механізмом, який полягає в розчиненні метастабільних квазікристалічних частинок ϵ -фази і одночасному виділенні з матричного твердого розчину α -Al більш стабільних інтерметалідних сполук.

Рентгеноструктурні дослідження щодо зміни ступеня легування матричного твердого розчину α -Al внаслідок відпалу показали, що період решітки твердого розчину α -Al квазікристалічного сплаву $\text{Al}_{94}\text{Fe}_3\text{Cr}_3$, консолідованого під тиском, змінюється немонотонно (табл. 1). Навпаки, період решітки α -Al вихідного порошку з підвищенням температури відпалу монотонно збільшується і при температурах вищих за 500 °C наближується до значень притаманних чистому алюмінію [7]. Так, період решітки твердого розчину α -Al в зразках, отриманому під тиском 2,5 та 4,0 ГПа, майже не змінюється з підвищенням температури відпалу до 350 °C, суттєво збільшується при досягненні 400 °C, після чого виявляє варіативний характер значень, досягаючи сталої величини в інтервалі температур від 500 до 600 °C, як і у вихідному порошку. Цей ефект безпосередньо пов'язаний з перетворенням квазікристалічних частинок ϵ -фази на кристалічні сполуки, включаючи метастабільний інтерметалід Al_6Fe та стабільні інтерметалідні сполуки $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ і $\text{Al}_{13}\text{Cr}_2$ (Θ -фази).

Збільшення періоду решітки матричного твердого розчину α -Al свідчить про його збіднення легуючими елементами (Fe, Cr), атоми яких мають на 12 % менші радіуси порівняно з атомами алюмінію, а зменшення періоду решітки, навпаки, пов'язано зі збагаченням матричної фази легуючими елементами, що може бути викликано, відповідно, підростанням частинок квазікристалічної ϵ -фази або їх розчиненням в матричній α -Al фазі. Варіативний характер значень періоду решітки твердого розчину α -Al сплаву $\text{Al}_{94}\text{Fe}_3\text{Cr}_3$, консолідованого під тиском 2,5 і 4,0 ГПа, в температурному інтервалі 400 – 500 °C відображує суперпозицію двох конкуруючих процесів, а саме, формування метастабільного інтерметаліду Al_6Fe і остаточного розчинення квазікристалічних частинок. При нагріванні сплаву до 500 °C зі збагаченого за рахунок розчинення квазікристалів легуючими елементами твердого розчину відбувається інтенсивне виділення частинок метастабільного інтерметаліду Al_6Fe , якій з підвищенням температури відпалу до 550 °C починає поступово розчинятися з одночасним формуванням стабільних інтерметалідних Θ -фаз: $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ та $\text{Al}_{13}\text{Cr}_2$. Метастабільний інтерметалід Al_6Fe повністю заміщується стабільними інтерметалідами $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ та $\text{Al}_{13}\text{Cr}_2$ при підвищенні температури відпалу до 600 °C (табл. 1).

Фазові перетворення у зразках, отриманих під тиском 2,5 та 4,0 ГПа, є дуже подібними (табл. 1). Єдиною відмінністю є те, що значення періоду кристалічної решітки твердого розчину α -Al у зразках, отриманих під тиском

4,0 ГПа при температурі відпалу 450 °С є більшим порівняно з тим, який реєструється у зразку, отриманому під тиском 2,5 ГПа. Зазначений факт може бути пов'язано з різницею кінетики розчинення квазікристалічної і-фази та формуванням метастабільного інтерметаліду Al_6Fe в зазначених зразках, різних за своєю дефектністю, яка є наслідком інтенсивної пластичної деформації матеріалу в умовах високого квазігідростатичного стиску за кімнатної температури.

Результати рентгеноструктурного аналізу добре узгоджуються з даними електронномікроскопічних досліджень структури (рис. 1 – 3), а саме, присутністю квазікристалів до 450 °С і поступовим зменшенням кількості полів зору з квазікристалами малих розмірів при підвищенні температури відпалу, що свідчить про їх розчинення.

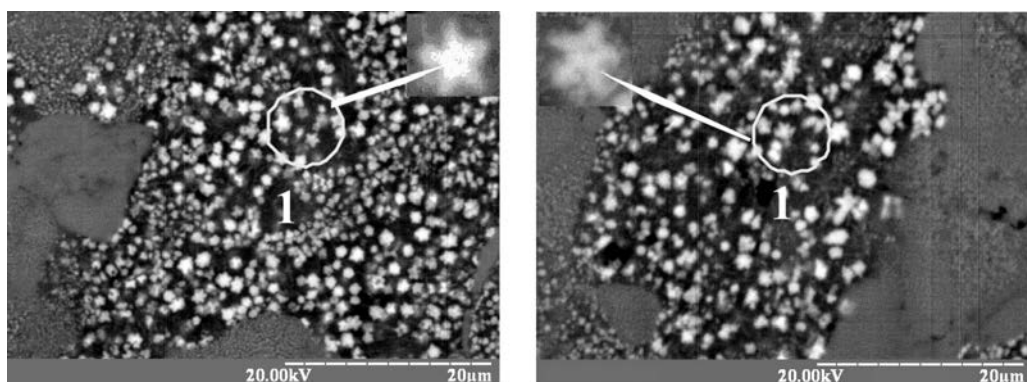


Рис. 1. Мікроструктури сплаву $Al_{94}Fe_3Cr_3$, отриманого за умов квазігідростатичного стиску при кімнатній температурі. 1 – квазікристалічні частинки.

Так само, як і у вихідному порошку сплаву $Al_{94}Fe_3Cr_3$ [7], в мікроструктурі зразків, консолидованих під високим тиском (рис. 1) та відпалених при температурі 350 °С (рис. 2 а, 3 а), в межах кожної порошкової частинки чітко виявляється велика кількість дрібних частинок, які на СЕМ зображенні мають світлий колір та деякі з них виявляють форму п'ятикутних зірочок, що свідчить про ротаційну симетрію 5-го порядку пакування атомів в ікосаедричному квазікристалі (і-фаза).

З підвищенням температури відпалу до 400 °С на електронно-мікроскопічних зображеннях мікроструктури у деяких порошинках, крім квазікристалічних частинок, спостерігаються частинки, форма яких вказує на їх кристалічну природу (рис. 2 б, 3 б), які за даними рентгено-структурного аналізу належать метастабільному інтерметаліду Al_6Fe (табл. 1). Відсутність в спектрах рентгенівської дифракції рефлексів від цих частинок пов'язано з їх малим вмістом в сплаві, що знаходиться за межами чутливості методу. Кількість таких частинок суттєво збільшується з підвищенням температури відпалу до 450 °С (рис. 2 в, 3 в).

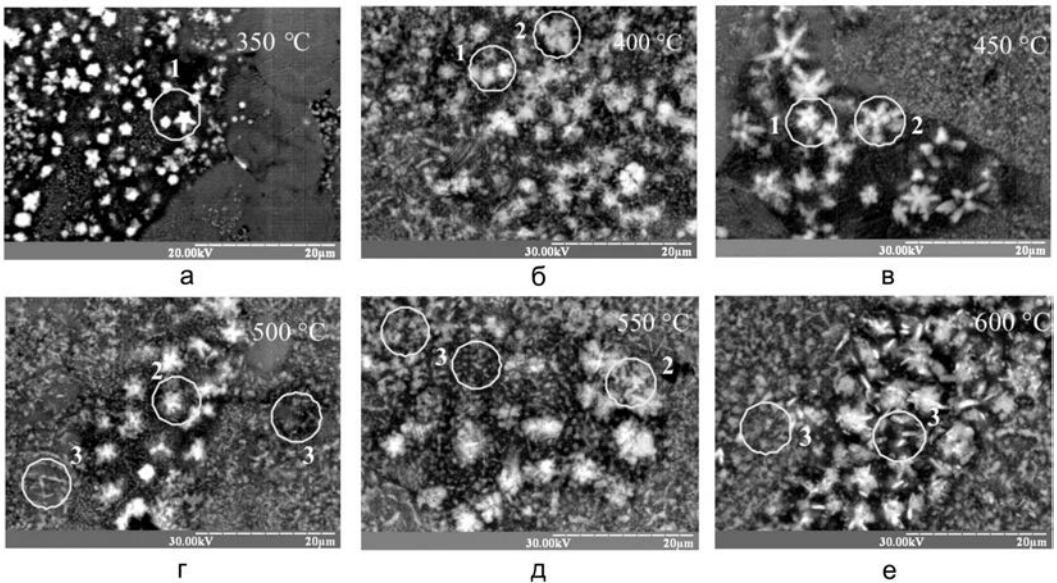


Рис. 2. Мікроструктури сплаву $\text{Al}_{94}\text{Fe}_3\text{Cr}_3$, отриманого під тиском 2,5 ГПа, після відпалу протягом 30 хв при температурах: а – 350 °С; б – 400 °С; в – 450 °С; г – 500 °С; д – 550 °С; е – 600 °С. 1 – квазікристалічні частинки; 2 – кристалічні частинки Al_6Fe ; 3 – кристалічні частинки $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ та $\text{Al}_{13}\text{Cr}_2$.

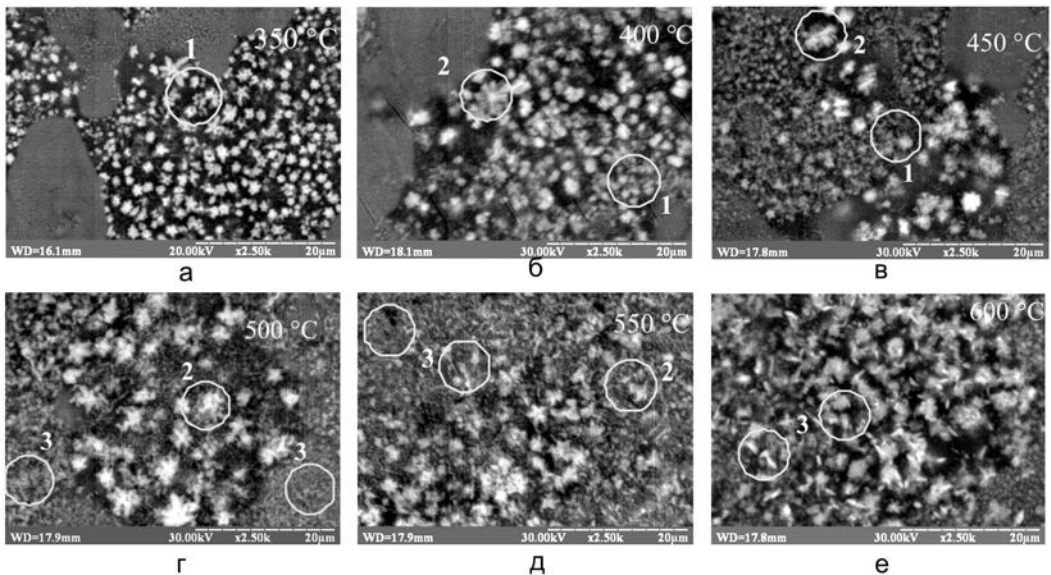


Рис. 3. Мікроструктури сплаву $\text{Al}_{94}\text{Fe}_3\text{Cr}_3$, отриманого під тиском 4,0 ГПа, після відпалу протягом 30 хв при температурах: а – 350 °С; б – 400 °С; в – 450 °С; г – 500 °С; д – 550 °С; е – 600 °С. 1 – квазікристалічні частинки; 2 – кристалічні частинки Al_6Fe ; 3 – кристалічні частинки $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ та $\text{Al}_{13}\text{Cr}_2$.

При підвищенні температури відпалу до 500 °С і вище на СЕМ зображеннях (рис. 2 г, д, 3 г, д) спостерігається поступове розчинення частинок метастабільного інтерметаліду Al_6Fe , яке супроводжується формуванням кристалів стрижнеподібної та голчастої форми і закінчується при температурі

600 °С (рис. 2 е, 3 е). За результатами фазового рентгеноструктурного аналізу ці частинки відповідають Θ -фазі: стабільним інтерметалідам $Al_{13}Fe_4$ та $Al_{13}Cr_2$ (табл. 1).

Заслуговує на увагу той факт, що у порівнянні з даними отриманими нами раніше для сплаву у вигляді порошку [7, 16], спінінгованих стрічок [15], покриттів, одержаних методом холодного газодинамічного напилення (ХГН) [16, 17], а також екструдованого сплаву [7], та даних опублікованих іншими авторами для спінінгованих стрічок [3, 5, 18, 19], інтенсивна пластична деформація матеріалу в умовах квазігідростатичного стиску при кімнатній температурі веде до зсуву інтервалу фазових та структурних перетворень в сплав в бік більш високих температур. Так, після консолідації під тиском температура початку фазового перетворення на 50° вище і квазікристалічної i -фази зберігається більше порівняно з консолідацією в умовах теплої екструзії [7].

Таким чином, нагрівання порошкового $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплаву після консолідації під високим тиском в температурному інтервалі 400 – 600 °С призводить спочатку до поступового зникнення квазікристалічної i -фази і виникнення кристалічного метастабільного інтерметаліду Al_6Fe , а при подальшому підвищенні температури (понад 500 °С) до формування стабільних інтерметалічних Θ -фаз: $Al_{13}Cr_2$ та $Al_{13}Fe_4$ (табл. 1), що добре узгоджується з результатами досліджень, опублікованих в [3, 4, 7, 15 – 18].

В табл. 2 наведено механічні характеристики, а саме, мікротвердість HV, границя плинності $\sigma_{0,2}$ та характеристика пластичності δ_n , композиційного сплаву $Al_{94}Fe_3Cr_3$, отриманого консолідацією в умовах квазігідростатичного стиску та відпаленого при різних температурах. Високий рівень властивостей міцності (мікротвердість HV, границя плинності $\sigma_{0,2}$) зразків квазікристалічного сплаву $Al_{94}Fe_3Cr_3$, отриманих в умовах квазігідростатичного стиску, майже не змінюють своїх значень до температури

Таблиця 2

Вплив температури відпалу на характеристики міцності та пластичності зразків сплаву $Al_{94}Fe_3Cr_3$, отриманих консолідацією в умовах квазігідростатичного стискування

Температура, °С	Тиск, ГПа					
	2,5 ГПа		4,0 ГПа		4,0 ГПа	
	Мікротвердість HV, ГПа		Границя плинності $\sigma_{0,2}$, ГПа		Характеристика пластичності δ_n	
20	1,76±0,05	1,67±0,04	0,436	0,426	0,85	0,83
350	1,71±0,03	1,62±0,04	0,430	0,420	0,86	0,84
400	1,67±0,036	1,60±0,03	0,424	0,416	0,86	0,84
450	1,62±0,03	1,56±0,02	0,410	0,402	0,86	0,84
500	1,52±0,03	1,48±0,02	0,384	0,376	0,87	0,85
550	1,38±0,04	1,36±0,03	0,350	0,342	0,88	0,86
600	1,19±0,03	1,17±0,03	0,316	0,312	0,90	0,88

відпалу 400 °С, до якої в структурі матеріалу зберігаються частинки квазікристалічної і-фази. При розчиненні квазікристалів та одночасному утворенні кристалічних частинок метастабільного інтерметаліду Al_6Fe з підвищенням температури вище за 400 °С властивості міцності поступово зменшуються. Подальше підвищення температури відпалу до 600 °С, яке за даними мікроструктурного та рентгеноструктурного аналізу викликає перетворення метастабільних інтерметалідів на стабільні $\Theta\text{-Al}_{13}\text{Fe}_4$ та $\Theta\text{-Al}_{13}\text{Cr}_2$ інтерметалідні фази, які утворюються за рахунок збіднення матричного твердого розчину $\alpha\text{-Al}$ на легуючі елементи (залізо та хром), період кристалічної решітки якого наближається до періоду решітки чистого алюмінію (табл. 1), супроводжується різким падінням характеристик міцності.

Навпаки, значення характеристики пластичності δ_n поступово підвищуються зі збільшенням температури відпалу (табл. 2). Важливо, що характеристика пластичності δ_n квазікристалічного сплаву після консолідації під високим тиском не зазнає істотних змін, залишаючись близькою до критичного значення $\delta_n = 0,90$, що свідчить про пластичну поведінку матеріалу в умовах стандартних випробувань на розтягування та вигин.

Встановлено, що структурний стан зразків квазікристалічного сплаву $\text{Al}_{94}\text{Fe}_3\text{Cr}_3$, отриманих під всебічним тиском, суттєво позначається на їх механічних властивостях в широкому температурному інтервалі. Термічна стабільність механічних властивостей сплаву $\text{Al} - \text{Fe} - \text{Cr}$, консолідованого під високим тиском, вища у порівнянні зі сплавом, компактованим екструзією, яка зумовлює часткову втрату квазікристалічної і-фази [7]. Механічні властивості подібні до аналогічних характеристик сплаву, отриманого холодним газодинамічним напиленням [16, 17].

Отримані результати дозволяють рекомендувати сплав $\text{Al}_{94}\text{Fe}_3\text{Cr}_3$, консолідований в умовах квазігідростатичного стиску при кімнатній температурі, для роботи в умовах нагріву до температур 400 °С. При цьому, допускається можливість короточасного перегрівання сплаву до температур 450 °С. Метод квазігідростатичного стискування також потенційно підходить для виготовлення виробів більш складної форми з квазікристалічного сплаву $\text{Al}_{94}\text{Fe}_3\text{Cr}_3$, який демонструє поєднання високої міцності з достатньою пластичністю, що важливо для використання в інженерній практиці.

Література

1. Asunciyn Garcna-Escorial, Eduardo Natale, Victoria J. Cremaschi, Iain Todd, Marcela Lieblich. Quasicrystalline $\text{Al}_{93}\text{Fe}_3\text{Cr}_2\text{Ti}_2$ alloys // *Revista de Metalurgia*. – 2015. – V. 51. – P. 24 – 29.
2. Dubois, J-M. Properties- and applications of quasicrystals and complex metallic alloys. *Chem.Soc.Rev.* – 2012. – V. 41. – P. 6760 – 6777.
3. Galano, M.; Audebert, F.; Garcia-Escorial, A.; Stone, I.C.; Cantor, B. Nanoquasicrystalline $\text{Al} - \text{Fe} - \text{Cr}$ -based alloys with high strength at elevated temperature. *J. Alloys Compd.* – 2010. – V. 495. – P. 372 – 376.

4. Kimura, H.; Sasamory, K.; Inoue, A. Al-Fe based bulk quasicrystalline alloys with high elevated temperature strength. *J. Mater. Res.* – 2000. – V. 15. – P. 2737 – 2744.
5. Inoue, A.; Kimura, H. High-strength aluminum alloys containing nanoquasicrystalline particles. *Mater. Sci. Eng., A.* – 2000. – V. 286. – P. 1 – 10.
6. Barthes-Labrousse, M-G.; Dubois, J-M. Quasicrystals and complex metallic alloys: Trends for potential applications. *Philos. Mag.* – 2008. – V. 88. – P. 2217 – 2225.
7. Юркова А.И., Бякова А.В., Власов А.А. Термостабильность структуры и механических свойств наноквазикристаллического $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплава, консолидированного экструзией // *Металлофизика и новейшие технологии.* – 2015. – Том 37. – № 7. – С. 933 – 950.
8. Neikov, O.D.; Kalinkin, V.G.; Lednyansky, A.F.; Vasilieva, G.I. Method for production of Al and Al-based alloys. Patent RU No 2078427, 1997.
9. Milman Yu.V., Sirko A.I., Iefimov M.O., and et al. High Strength Aluminum Alloys Reinforced by Nanosize Quasicrystalline Particles for Elevated Temperature Application. *High Temp. Mater. Processes (London).* – 2006. – V. 25. – P. 19 – 30.
10. Cahn J.W., Shechtman D., Gratias D. Indexing of icosahedral quasi periodic crystals // *Materials Research Society.* – 1986. – V. 1. – P. 13 – 26.
11. Galanov B.A., Milman Yu.V., Chugunova S.I., Goncharova I.V. Investigation of mechanical properties of high-hardness materials by indentation // *Superhard materials.* – 1999. – No 3. – P. 23 – 25.
12. Milman Yu.V., Galanov B.A., Chugunova S.I. Plasticity characteristic obtained through hardness measurement // *Acta Met. Mater.* – 1993. – V. 41, No 9. – P. 2523 – 2531.
13. ISO 14577-1:2015(E). Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. – 2015. – 46 p.
14. Kestenbach H.J., Bolfarini C., Kiminami C. S., Botta Filho W. J.. In-Situ Observation of the Dissolution of Quasicrystalline Particles in an Aluminum Alloy during Annealing // *J. Metastable Nanocryst. Mater.* – 2004. – Vols. 20 – 21. – P. 382 – 387.
15. Юркова А.И., Кравченко А.И., Бякова А.В., Власов А.А. Термостабильность структуры и механических свойств наноквазикристаллического $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплава // *Металлофизика и новейшие технологии (Metallofiz. Noveishie Tekhnol.)* – 2016. – Т. 38, – № 11. – С. 1463 – 1477.
16. Byakova A., Yurkova A. Structural Performance of Nanoquasicrystalline Composites Based on Al – Fe – Cr-alloy: Synthesis and Key Characteristics // *Proceeding of the 2017 IEEE 7th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties (NAP-2017).* 2017. Part 3, P. 03NNSA03-1– 03NNSA03-5.
17. Чередніченко В.В., Бякова О.В., Юркова О.І.. Еволюція структури та механічних властивостей квазікристалічних Al – Fe – Cr сплавів під дією температури та тиску // *Металлофизика и новейшие технологии.* – 2012. – Т. 34, № 2. – С. 331 – 341.
18. Galano M., Audebert F., Stone I.C., Cantor D., Nanoquasicrystalline Al – Fe – Cr-based alloys, Part I: Phase transformations // *Acta Materialia.* – 2009. – V. 57. – P. 5107 – 5119.
19. Inoue A., Kimura H. High-strength aluminum alloys containing nanoquasicrystalline particles // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2000. – V. 286. – P. 1 – 10.

References

1. Asunciyn Garcha-Escorial, Eduardo Natale, Victoria J. Cremaschi, Iain Todd, Marcela Lieblich. Quasicrystalline $Al_{93}Fe_3Cr_2Ti_2$ alloys // REVISTA DE METALURGIA. – 2015. – V. 51. – P. 24 – 29.
2. Dubois, J-M. Properties- and applications of quasicrystals and complex metallic alloys. Chem.Soc.Rev. – 2012. – V. 41. – P. 6760–6777.
3. Galano, M.; Audebert, F.; Garcia-Escorial, A.; Stone, I.C.; Cantor, B. Nanoquasicrystalline Al–Fe–Cr-based alloys with high strength at elevated temperature. *J. Alloys Compd.* – 2010. – V. 495. – P. 372-376.
4. Kimura,H.; Sasamory,K.; Inoue,A. Al–Fe based bulk quasicrystalline alloys with high elevated temperature strength. *J. Mater. Res.* – 2000. – V. 15. – P. 2737 – 2744.
5. Inoue,A.; Kimura,H. High-strength aluminum alloys containing nanoquasicrystalline particles. *Mater. Sci. Eng., A* – 2000. – V. 286. – P. 1-10.
6. Barthes-Labrousse, M-G.; Dubois, J-M. Quasicrystals and complex metallic alloys: Trends for potential applications. *Philos. Mag.* – 2008. – V. 88. – P. 2217–2225.
7. A.I. Yurkova,A.V. Byakova,A.A. Vlasov. Thermal stability of the structure and mechanical properties of the nanoquasicrystalline $Al_{94}Fe_3Cr_3$ alloy, consolidated by extrusion // *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* – 2015. – V 37, No 7. – P. 933-950.
8. Neikov, O.D.; Kalinkin, V.G.; Lednyansky, A.F.; Vasilieva, G.I. Method for production of Al and Al-based alloys. *Patent RU No 2078427*, 1997.
9. Yu.V. Milman, A.I. Sirko, M.O. Iefimov, and et al. High Strength Aluminum Alloys Reinforced by Nanosize Quasicrystalline Particles for Elevated Temperature Application. *High Temp. Mater. Processes (London)*. – 2006. – V. 25. – P. 19 – 30.
10. Cahn J.W.,Shechtman D.,Gratias D. Indexing of icosaedral quasi periodic crystals // *Materials Research Society*. – 1986. – V. 1. – P.13 – 26.
11. Galanov B.A., Milman Yu.V., Chugunova S.I., Goncharova I.V. Investigation of mechanical properties of high-hardness materials by indentation // *Superhard materials*. – 1999. – No 3. – P. 23-25.
12. Milman Yu.V., Galanov B.A., Chugunova S.I. Plasticity characteristic obtained through hardness measurement // *Acta Met. Mater.* – 1993. – V. 41,No 9. – P. 2523 – 2531.
13. ISO 14577-1:2015(E). Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. – 2015. – 46 p.
14. H.J. Kestenbach, C. Bolfarini, C. S. Kiminami, W. J. Botta Filho. In-Situ Observation of the Dissolution of Quasicrystalline Particles in an Aluminum Alloy during Annealing // *J. Metastable Nanocryst. Mater.* – 2004. – Vols. 20-21. – P. 382-387.
15. A.I. Yurkova, O.I. Kravchenko,A.V. Byakova,Thermal stability of the structure and mechanical properties of nanocrystalline $Al_{94}Fe_3Cr_3$ alloy // *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* – 2016. – V. 38, No 11. – P.1463 – 1477.
16. A. Byakova,A. Yurkova. Structural Performance of Nanoquasicrystalline Composites Based on Al-Fe-Cr-alloy: Synthesis and Key Characteristics // *Proceeding of the 2017 IEEE 7th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties (NAP-2017)*. 2017. Part 3, P. 03NNSA03-1– 03NNSA03-5.
17. V.V. Cherednichenko,A.V. Byakova,A.I. Yurkova. Evolution of the structure and mechanical properties of quasicrystalline Al-Fe-Cr alloys under the influence of temperature and pressure // *Metallofiz. Noveishie Tekhnol*, – 2012. - V. 34, No 2. – P. 331 – 341.

18. M. Galano, F. Audebert, I.C. Stone, D. Cantor, Nanoquasicrystalline Al-Fe-Cr-based alloys, Part I: Phase transformations // Acta Materialia. – 2009. – V. 57. – P. 5107 – 5119.
19. A. Inoue, H. Kimura. High-strength aluminum alloys containing nanoquasicrystalline particles // Mater. Sci. Eng. A. – 2000. – V. 286. – P. 1-10.

Одержано 24.04.18

А. И. Юркова, А. И. Кравченко

Влияние температуры на структуру и механические свойства композиционного квазикристаллического сплава $Al_{94}Fe_3Cr_3$, консолидированного под высоким давлением

Резюме

Методами фазового рентгеноструктурного анализа, сканирующей электронной микроскопии и микромеханических испытаний изучено влияние температуры на эволюцию структуры и формирование механических свойств композиционного $Al_{94}Fe_3Cr_3$ сплава с наноразмерными частицами метастабильной икосаэдрической квазикристаллической фазы (i-фазы), консолидированного в условиях квазигидростатического сжатия (2,5 и 4,0 ГПа) при комнатной температуре. Показано, что прочностные характеристики сплава сохраняют высокие значения до температуры 400 °С, выше которой начинается растворение квазикристаллических частиц i-фазы с одновременным формированием кристаллического метастабильного интерметаллида Al_6Fe . Существенное снижение прочности сплава происходит при повышении температуры отжига до 600 °С, которое сопровождается превращением метастабильного интерметаллида Al_6Fe в стабильные кристаллические интерметаллидные Θ -фазы: $Al_{13}Cr_2$ и $Al_{13}Fe_4$.

А. И. Yurkova, О. И. Kravchenko

Effect of temperature on structure and mechanical properties of composite quasicrystalline $Al_{94}Fe_3Cr_3$ alloy consolidated under high pressure

Summary

Consolidation of powdered Al-based alloy with nominal composition of $Al_{94}Fe_3Cr_3$, which was fabricated by water-atomisation technique using high-pressure water, was performed under quasi-hydrostatic pressure (2.5 and 4.0 GPa) at the room temperature. The annealing of the composite quasicrystalline $Al_{94}Fe_3Cr_3$ alloy was carried out in the temperature range 350 – 600 °C. The influence of temperature on the structure and mechanical characteristics (microhardness number, HV, and yield stress, $s_{0,2}$, plasticity characteristic d_{11}) of as-consolidated $Al_{94}Fe_3Cr_3$ alloy were characterized by XRD, SEM analysis and the test method procedures of indentation technique. It is shown that the strength characteristics of the alloy retain high values up to a temperature of 400 °C, at which quasicrystalline particles of i-phase dissolve in 6-Al matrix with the simultaneous formation of the crystalline metastable Al_6Fe intermetallic. A significant decrease in the strength of the alloy occurs when the annealing temperature increases to 600 °C, which is accompanied by the conversion of the metastable intermetallic Al_6Fe phase to stable crystalline intermetallic Θ -phases: $Al_{13}Cr_2$ and $Al_{13}Fe_4$.