

## Наноструктурні сплави системи Al—Fe—Cr, зміцнені квазікристалічними частинками для використання при підвищених температурах

Ю. В. Мільман, Н. П. Захарова, М. О. Єфімов,  
А. О. Шаровський, М. І. Даниленко

*Досліджено особливості структуроутворення та механічні властивості наноструктурних сплавів системи Al—Fe—Cr, додатково легованих Ti і Zr та зміцнених квазікристалічними частинками. Нاپівфабрикати з цих сплавів отримано без спікання компактуванням порошків, виготовлених методом розпилення розплаву водою високого тиску і подальшої екструзії компактів у попередньо вакуумованих та герметизованих капсулах. Методи дослідження: просвічувальна електронна мікроскопія, в тому числі високої роздільної здатності, рентгеноструктурний аналіз, механічні випробування на розтягування, вимірювання мікро- та макротвердості. Дослідження виконані при температурі 20 °С та після тривалого відпау при 300 °С. Показано, що в прутках сплавів на базі системи Al—Fe—Cr, які отримані з водорозпилених порошків за розробленою технологією, формується Al матриця з зернами розміром  $\leq 500$  нм, зміцнена квазікристалічними частинками розміром 40—200 нм. Визначено хімічний склад квазікристалічних частинок. Доведено, що пластичність напівфабрикатів сплавів системи Al—Fe—Cr практично не залежить від терміну відпау і знаходиться на рівні 7,0—8,4%, міцність і твердість децю знижуються. Так, для сплаву  $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti_1$   $\sigma_6$  при  $T_{випр} = 300$  °С складає 345 МПа, після витримки 1000 год — 296 МПа. Твердість змінюється від 1980 до 1930 МПа відповідно. Таким чином, досягнутий комплекс механічних властивостей розроблених сплавів перевищує сучасні вимоги авіаційної промисловості.*

**Ключові слова:** алюмінієві сплави, наноструктура, квазікристалічні зміцнюючі частинки, механічні властивості, структура, фазовий склад.

### Вступ

Квазікристали (КК) мають цілу низку унікальних властивостей, але застосування квазікристалів у вигляді масивних виробів не має поширення через їх крихкість. Однак квазікристалічні дисперсні частинки можуть бути з успіхом використані для зміцнення сплавів [1—8].

Наноквазікристали (НКК) — окремий клас речовин, які за своєю механічною поведінкою суттєво відрізняються як від нанокристалів, так і від КК. Зменшення розміру зерна і особливо створення нанорозмірних зерен призводить до більш різкого зниження енергії дислокації в КК, ніж у кристалі. У НКК порівняно з КК суттєво зростає рухливість дислокацій і зменшується енергія їх утворення. У той же час у НКК, на відміну від нанокристалів, рухливість дислокацій все ж нижче, тому не всі дислокації виходять на границі зерен. Ці особливості поведінки дислокацій в НКК призводять до того, що НКК, на відміну від КК, мають деяку пластичність при кімнатній температурі [9]. Це дозволяє при наявності в алюмінієвій матриці до 30—40% (об.) НКК зміцнюючих частинок зберігати достатню

© Ю. В. Мільман, Н. П. Захарова, М. О. Єфімов, А. О. Шаровський,  
М. І. Даниленко, 2012

пластичність цього матеріалу [5, 6]. Фізика деформування наноквазікристалів є принципово новим напрямком матеріалознавства. Найбільш поширена система, в якій НКК виконують роль зміцнюючих частинок в алюмінієвій матриці, є система Al—Fe—Cr. Такі сплави мають найвищі для алюмінієвих сплавів механічні властивості при температурах до 300 °С.

Питання кореляції хімічний склад → технологія виробництва → структура → механічні властивості наноструктурованих алюмінієвих сплавів на базі системи Al—Fe—Cr, зміцнених нанорозмірними квазікристалічними частинками, вивчено недостатньо і потребує детального дослідження структури із застосуванням сучасних методів, чому й присвячена ця робота.

### Матеріали та методи дослідження

Для дослідження обрано хімічний склад найбільш перспективних жароміцних сплавів алюмінію, зміцнених квазікристалічними частинками системи Al—Fe—Cr з вмістом 94% (ат.) Al. У роботі [5] встановлено, що при цій концентрації Al спостерігається найкраще співвідношення характеристик міцності та пластичності. Як показано у роботі [10], для поліпшення механічних властивостей матеріалів на основі системи Al—Fe—Cr в якості додаткових легуючих елементів доцільно використовувати Ti та Zr. Склади сплавів, що досліджували, наведено в табл. 1.

Прутки  $\varnothing 6$ —9 мм з коефіцієнтом витяжки  $\mu = 12,8$  з досліджуваних сплавів отримано консолідацією порошків, виготовлених розпиленням розплаву струменем води під високим тиском [11, 12]. Консолідацію порошків фракції 0—40 мкм здійснено без спікання шляхом екструзії їх у попередньо вакуумованих та герметизованих капсулах  $\varnothing 25$  мм, температура вакуумування та екструзії — 350 °С.

Дослідження тонкої структури прутків провадили методами просвічуальної електронної мікроскопії; рентгеноструктурний аналіз виконували на дифрактометрі ДАРТ-УМ1. Механічні випробування на розтягування отриманих прутків було виконано на стандартних п'ятикратних зразках на машині 1246 типу INSTRON зі швидкістю переміщення захватів 1 мм/хв із записом кривої деформації при 20 та 300 °С. Границі міцності  $\sigma_B$ , плинності  $\sigma_{0,2}$  та подовження до руйнування  $\delta$  розраховували по кривим деформації. Твердість зразків визначено на приборі Віккерса при навантаженні 10 кг, мікротвердість — на приборі ПМТ-3 при навантаженні 20 г.

### Результати та їх обговорення

Рентгеноструктурним аналізом встановлено, що в усіх отриманих порошках сплавів алюмінію системи Al—Fe—Cr фіксується наявність тільки квазікристалічної ікосаедричної фази (*i*-фази) і  $\alpha$ -Al, домішок кристалічних інтерметалідів не виявлено. Завдяки обраному режиму виготовлення екструдованих напівфабрикатів в усіх прутках було збережено двофазний стан Al + КК (рис. 1, *a*, *б*). Встановлено, що твердість прутків у порівнянні з мікротвердістю порошків є вищою (табл. 2). На рис. 2 наведено структуру прутка сплаву  $Al_{94}Fe_{2,5}Cr_{2,5}Ti_1$ , яка складається з частинок квазікристалів та алюмінієвої матриці, що має комірчасту структуру. Саме зміцненням матриці (здрібнення нанозерен в результаті деформації [1, 13, 14]) можна пояснити факт суттєвого підвищення

**Т а б л и ц я 1.** Склади сплавів системи Al—Fe—Cr

Вміст легуючих елементів	
% (мас.)	% (ат.)
Al—5,86Fe—5,45Cr	Al <sub>94</sub> Fe <sub>3</sub> Cr <sub>3</sub>
Al—4,89Fe—4,55Cr—1,68Ti	Al <sub>94</sub> Fe <sub>2,5</sub> Cr <sub>2,5</sub> Ti <sub>1</sub>
Al—4,86Fe—4,52Cr—0,83Ti—1,59Zr	Al <sub>94</sub> Fe <sub>2,5</sub> Cr <sub>2,5</sub> Ti <sub>0,5</sub> Zr <sub>0,5</sub>

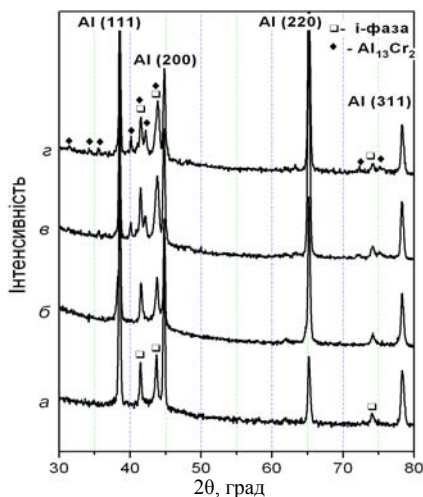


Рис. 1. Рентгенограми зразків порошкових сплавів Al<sub>94</sub>Fe<sub>3</sub>Cr<sub>3</sub> у вихідних станах та після відпалу при 300 °C: *a* — водорозпилений порошок; *б* — пруток; *в* — пруток, відпал 500 год; *г* — пруток, відпал 1000 год.

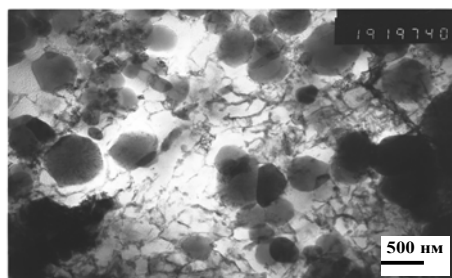
твердості екструдованих прутків у порівнянні з твердістю окремих порошків сплавів системи Al—Fe—Cr, що містять наноквазі-частинки та нанозерна алюмінієвої матриці.

Встановлено, що тонка структура напівфабрикатів є нерівно-

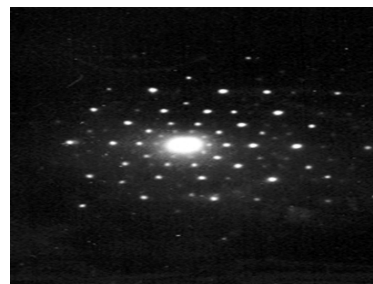
**Т а б л и ц я 2.** Твердість частинок порошку та прутків одержаних сплавів

Хімічний склад, % (ат.)	HV, МПа	
	Порошок	Прутки
Al <sub>94</sub> Fe <sub>3</sub> Cr <sub>3</sub>	810	1660
Al <sub>94</sub> Fe <sub>2,5</sub> Cr <sub>2,5</sub> Ti <sub>1</sub>	965	1730
Al <sub>94</sub> Fe <sub>2,5</sub> Cr <sub>2,5</sub> Ti <sub>0,5</sub> Zr <sub>0,5</sub>	895	1990

мірною — спостерігаються ділянки з різним розміром як зміцнюючих КК частинок, так і зерен алюмінієвої матриці, що є наслідком різниці у розмірах структурних порошків, які, в свою чергу, залежать від розміру вихідних порошків (рис. 3). В усіх отриманих прутках сплавів системи Al—Fe—Cr розмір наночастинок квазікристалів знаходився в межах 40—150 нм, а розмір зерна α-Al дорівнював 100—200 нм. Аналіз одержаних авторами результатів дає підстави вважати, що різнозеренність Al матриці та наявність КК



*a*



*б*

Рис. 2. Структура прутка сплаву Al<sub>94</sub>Fe<sub>2,5</sub>Cr<sub>2,5</sub>Ti<sub>1</sub> у вихідному стані (*a*) та електронна мікродифракція квазікристалічної частинки (*б*); зразок для дослідження виготовлено з поверхні, перпендикулярної напрямку екструзії.

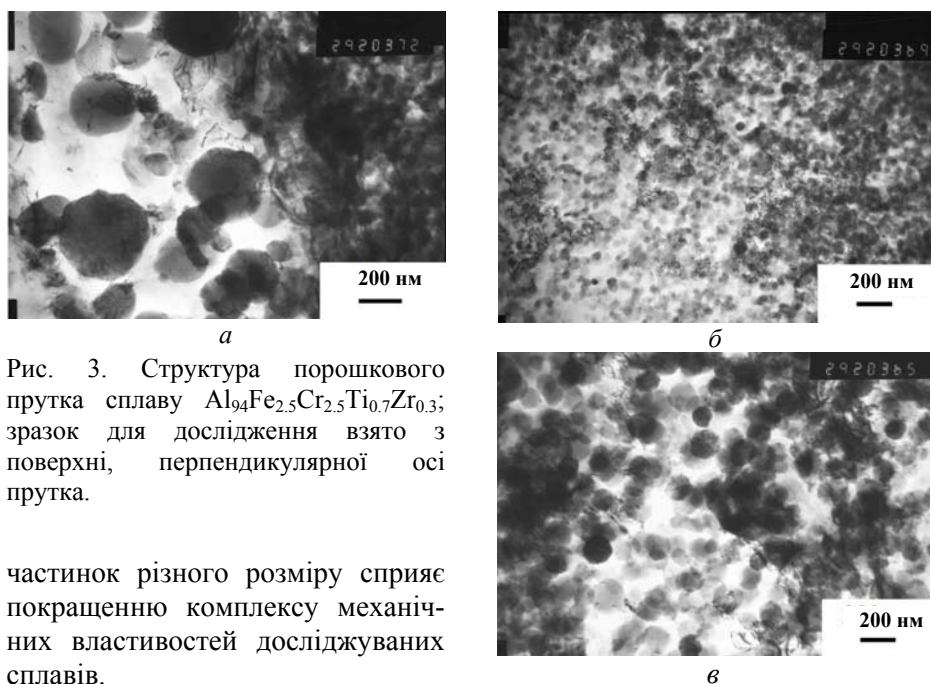


Рис. 3. Структура порошкового прутка сплаву  $\text{Al}_{94}\text{Fe}_{2.5}\text{Cr}_{2.5}\text{Ti}_{0.7}\text{Zr}_{0.3}$ ; зразок для дослідження взято з поверхні, перпендикулярної осі прутка.

частинок різного розміру сприяє покращенню комплексу механічних властивостей досліджуваних сплавів.

Визначено об'ємну долю НКК частинок в структурі порошків сплавів та в напівфабрикатах (прутки), що були виготовлені методом екструзії з залученням даних, отриманих методами як кількісного рентгеноструктурного аналізу, так і електронної мікроскопії (ПЕМ дослідження структури прутків). Доля КК частинок в вивчених сплавах складає 35—40%. Розрахунок, зроблений за даними ПЕМ (2—3 зображення на зразок), в межах похибки співпадає зі значеннями, що отримані методом рентгеноструктурного аналізу.

При дослідженні сплаву  $\text{Al}_{94}\text{Fe}_{2.5}\text{Cr}_{2.5}\text{Ti}_1$  в електронному мікроскопі високої роздільної здатності JEM-2100F встановлено, що структура сплавів системи Al—Fe—Cr складається з Al матриці та НКК зміцнюючих частинок складу  $\text{Al}_{88}\text{Fe}_{4.6}\text{Cr}_{5.7}\text{Ti}_{1.7}$  (рис. 4, спектри 2, 4, 6). Дані хімічного складу різних ділянок сплаву  $\text{Al}_{94}\text{Fe}_{2.5}\text{Cr}_{2.5}\text{Ti}_1$  наведено в табл. 3. Спектри 1 та 5 належать до областей твердого розчину  $\alpha\text{-Al}$ .

Для вивчення процесів деформації досліджуваних алюмінієвих сплавів, що містять НКК зміцнюючі частинки, проведено осадку прутка  $\varnothing 3$  мм і довжиною 12 мм при кімнатній температурі. З метою зменшення тертя торець зразка було відполіровано та використано фторопластові прокладки. Кінцева висота — 4 мм, таким чином досягнуто деформацію зразка 66%. Досліджено структуру матеріалу в центрі та з бокової поверхні до та після деформації (рис. 5).

ПЕМ зображення, наведене на рис. 5, свідчить, що при обраних умовах деформації деякі частинки КК руйнуються. Розмір більшості КК частинок та їх форма при деформації залишаються

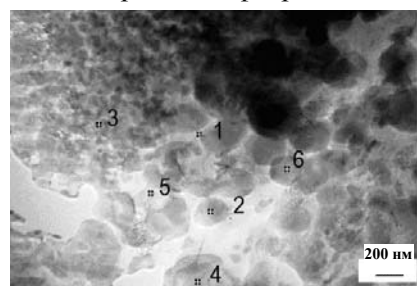


Рис. 4. Структура прутка зі сплаву  $\text{Al}_{94}\text{Fe}_{2.5}\text{Cr}_{2.5}\text{Ti}_1$ .

**Т а б л и ц я 3.** Вміст елементів (% (ат.)) у структурних складових, що позначені крапками на рис. 4, в сплаві  $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti_1$

Ділянка	Al	Fe	Cr	Ti
Спектр 1	97,7476	1,64124	0,3942	0,2169
Спектр 2	87,7169	4,580373	5,6858	1,0168
Спектр 3	94,69854	2,27688	2,130069	0,89455
Спектр 4	85,73631	5,503608	6,520668	2,2394
Спектр 5	98,4574	0,6295039	0,3956215	0,51746
Спектр 6	90,40404	3,420174	4,572779	1,603

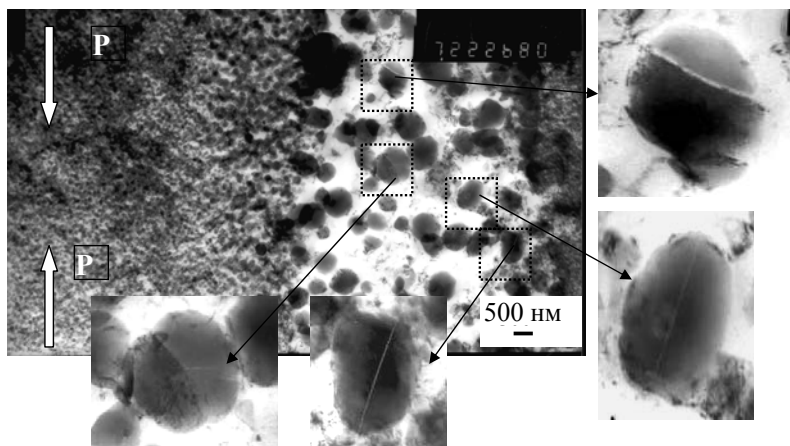


Рис. 5. Структура прутка зі сплаву  $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti_1$  після осадки прутка при кімнатній температурі; зразок для дослідження зроблено з перерізу, що був вздовж дії сил стискання, біля бокової поверхні прутка.

практично незмінними. Але на світлопольному зображенні (рис. 6) по краях КК зміцнюючих частинок помітно області зі зміненим контрастом (на рис. 6 вони вказані стрілками). Можливо, в КК системи Al—Fe—Cr, як і в системі Al—Cu—Fe [15], при деформації також відбувається фазовий перехід в кристалічну апроксимантну фазу, яка і забезпечує деяку пластичність.

Для визначення термічної стабільності сплавів системи Al—Fe—Cr виконано відпал при 300 °C впродовж 1000 год. Досліджено структурні перетворення та зміну механічних властивостей. Після 500 год витримки при 300 °C на рентгенограмах усіх досліджених сплавів поряд з дифракційними лініями Al та КК з'являються лінії від кристалічних інтерметалідів. Після подальшої витримки до 1000 год при 300 °C інтенсивність ліній кристалічних інтерметалідів дещо зростає. Їх інтегральна інтенсивність найменша в сплаві  $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti_1$ . Типові спектри наведено на рис. 1, в, з.

Після відпалу при 300 °C в прутках ознак огрубіння структури на мікрорівні не спостерігається, тобто рекристалізація сплавів не відбувається. Розмір зерен матриці та НКК частинок після відпалу не зазнає значних змін (рис. 7).

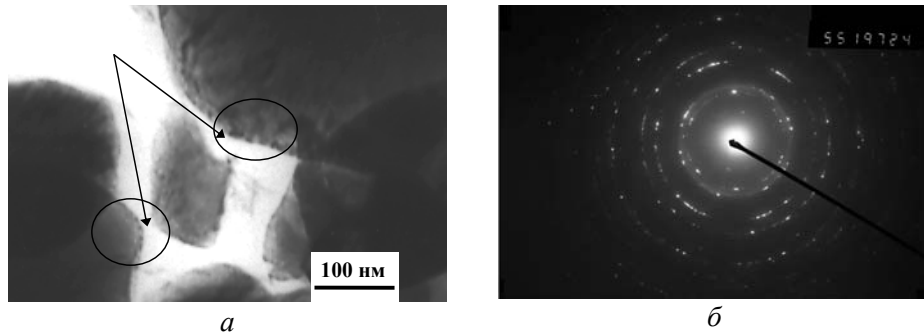


Рис. 6. Тонка структура прутка порошкового екструдованого сплаву  $\text{Al}_{94}\text{Fe}_{2.5}\text{Cr}_{2.5}\text{Ti}_1$  після деформації стисканням 50%: *a* — світле поле; *б* — електронна мікродифракція.

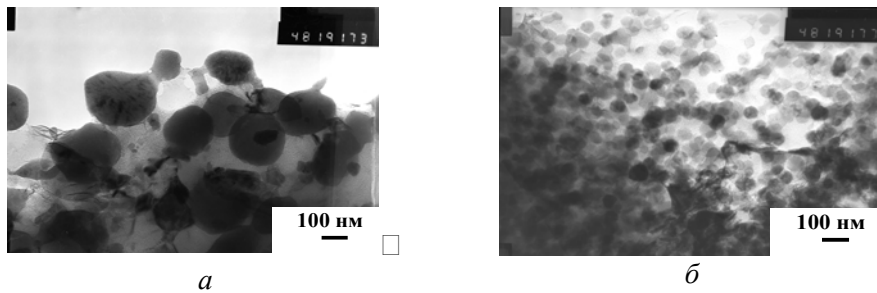


Рис. 7. Структура прутка зі сплаву  $\text{Al}_{94}\text{Fe}_{2.5}\text{Cr}_{2.5}\text{Ti}_{0.7}\text{Zr}_{0.3}$  після відпалу при  $300\text{ }^\circ\text{C}$  впродовж 1000 год; зразок для дослідження взято перпендикулярно осі прутка.

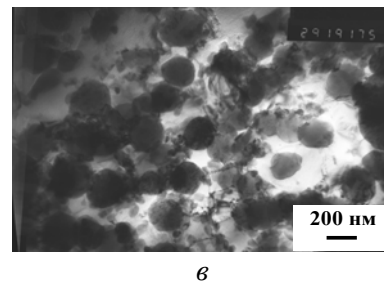
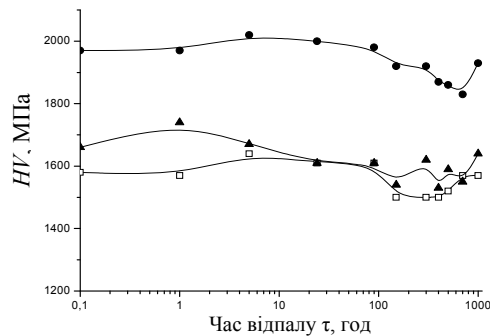


Рис. 8. Залежність твердості прутків зі сплавів  $\text{Al}_{94}\text{Fe}_3\text{Cr}_3$  ( $\circ$ ),  $\text{Al}_{94}\text{Fe}_{2.5}\text{Cr}_{2.5}\text{Ti}_1$  ( $\blacktriangle$ ) та  $\text{Al}_{94}\text{Fe}_{2.5}\text{Cr}_{2.5}\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}$  ( $\bullet$ ) від часу відпалу при температурі  $300\text{ }^\circ\text{C}$ .

Пластичність всіх досліджених сплавів практично не залежить від терміну відпалу, а міцність і твердість дещо знижуються (на 5—10%) (рис. 8, 9).

Механічні властивості при розтягуванні прутків з досліджуваних алюмінієвих сплавів системи  $\text{Al—Fe—Cr}$  наведено в табл. 4. Завдяки застосованій технології отримання прутків зі сплавів  $\text{Al—Fe—Cr}$ , зміцнених НКК частинками, досягнуто високий комплекс механічних властивостей. Для сплаву  $\text{Al}_{94}\text{Fe}_{2.5}\text{Cr}_{2.5}\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}$  отримано наступні механічні характеристики: при кімнатній температурі —  $\sigma_{02} = 675$  і  $\sigma_B = 698$  МПа,  $\delta = 5\%$ ; при  $300\text{ }^\circ\text{C}$  —  $\sigma_{02} = 356$  і  $\sigma_B = 376$  МПа,  $\delta = 2\%$ ; при  $400\text{ }^\circ\text{C}$  —  $\sigma_{02} = 170$  і  $\sigma_B = 183$  МПа,  $\delta = 4\%$ .



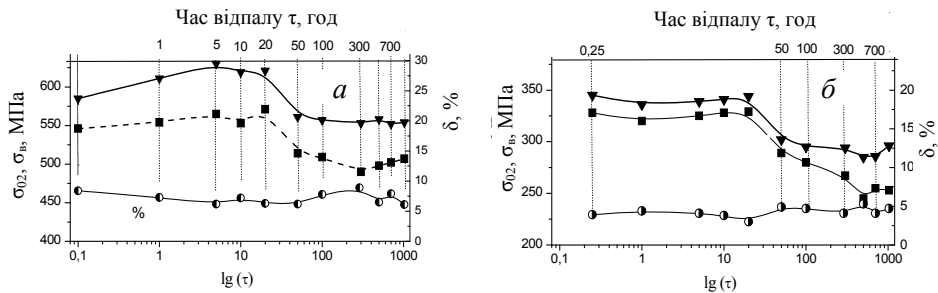


Рис. 9. Залежність механічних властивостей ( $\sigma_{0,2}$  (■),  $\sigma_B$  (▼),  $\delta$  (○)) прутків зі сплаву  $Al_{94}Fe_{2,5}Cr_{2,5}Ti_1$  від часу відпалу при 300 °С при температурах випробування на розтягування 20 (а) та 300 °С (б).

**Т а б л и ц я 4. Механічні властивості, отримані при випробуваннях на розтягування прутків алюмінієвих сплавів системи Al—Fe—Cr при різних температурах**

Сплав, % (ат.)	$\sigma_{0,2}$ , МПа		$\sigma_B$ , МПа		$\delta$ , %	
	20 °С	300 °С	20 °С	300 °С	20 °С	300 °С
$Al_{94}Fe_3Cr_3$	485	283	542	297	7,0	3,5
$Al_{94}Fe_{2,5}Cr_{2,5}Ti_1$	546	328	585	345	8,4	3,9
$Al_{94}Fe_{2,5}Cr_{2,5}Ti_{0,5}Zr_{0,5}$	648	331	677	351	7,0	1,8

**Висновки**

В прутках сплавів на базі системи Al—Fe—Cr, отриманих з водорозпиленних порошків за розробленою технологією, при підвищених температурах формується дуже мале зерно  $\alpha$ -Al —  $\leq 500$  нм. Розмір КК частинок в екструдованих напівфабрикатах змінювався від 40 до 200 нм. Підвищення твердості прутків у порівнянні з твердістю частинок відповідного порошку пояснюється здрібненням нанозерен матриці в результаті деформації при температурі не вище 350 °С.

В сплаві  $Al_{94}Fe_{2,5}Cr_{2,5}Ti_1$ , за даними локального хімічного аналізу, КК зміцнюючі частинки мають склад  $Al_{88}Fe_{4,6}Cr_{5,7}Ti_{1,7}$ . Встановлено, що тонка структура напівфабрикатів є нерівномірною (спостерігаються ділянки з різними розмірами КК частинок та зерен алюмінію). Це є наслідком різниці в швидкості охолодження порошків при їх виготовленні. Аналіз отриманих результатів свідчить, що це не перешкоджає отриманню оптимального співвідношення міцності та пластичності у цих сплавах.

Показано, що навіть після 1000 год відпалу при 300 °С розмір зерен Al матриці та КК частинок не зазнає значних змін.

Пластичність напівфабрикатів сплавів, що було досліджено при 20 °С, практично не залежить від терміну відпалу і знаходиться на рівні 7,0—8,4%, а міцність і твердість дещо знижуються. Так, для сплаву  $Al_{94}Fe_{2,5}Cr_{2,5}Ti_1$   $\sigma_B$  при  $T_{випр} = 300$  °С складає 345 МПа, після витримки 1000 год — 296 МПа, твердість змінюється від 1980 до 1930 МПа відповідно. Така зміна механічних характеристик обумовлена появою в структурі матеріалу після довготривалого відпалу кристалічного інтерметаліду  $Al_{13}Cr_2$ .

Таким чином, завдяки застосованій технології отримання прутків зі сплавів Al—Fe—Cr, зміцнених НКК частинками, досягнуто комплекс механічних властивостей, що перевищує вимоги Аерокосмічного

агентства США щодо механічних властивостей сплавів для авіа- та ракетобудівництва ( $\sigma_B = 350$  МПа при  $300^\circ\text{C}$ ).

1. *Swygenhoven H. V., Weertman J. R.* Deformation in nanocrystalline metals // *Materials Today*. — 2006. — **9**, Issue 5. — P. 24—31.
2. *Kimura H. M., Sasamori K., Inoue A.* Al—Fe based bulk quasicrystalline alloys with high elevated temperature strength // *J. Mater. Res.* — 2000. — **15**, No. 12. — P. 2737—2744.
3. *Galano M., Audebert F., Garcia-Escorial A. et al.* Nanoquasicrystalline Al—Fe—Cr—based alloys with high strength at elevated temperature // *J. Alloys Comp.* — 2010. — **495**. — P. 372—376.
4. *Inoue A., Kimura H.* High-strength aluminum alloys containing nanoquasicrystalline particles // *Mater. Sci. & Eng.* — 2000. — **A286**, No. 1. — P. 1—10.
5. *Milman Yu. V., Lotsko D. V., Neikov O. D. et al.* Processing, structure and mechanical behaviour of rapidly solidified aluminum alloys containing quasicrystalline particles // *Mater. Sci. Forum.* — 2002. — **396—402**. — P. 723—728.
6. *Мильман Ю. В., Лоцко Д. В., Ульшин С. В. и др.* Влияние размера зерна на механическое поведение квазикристаллических материалов на основе системы Al—Cu—Fe // *Доп. НАН України. Математика. Природознавство. Технічні науки*. — 2005. — № 6. — С. 93—98.
7. *Milman Yu. V.* Mechanical behaviour of nanostructured aluminum alloys containing quasicrystalline phase // *Mater. Sci. Forum.* — 2005. — **482**. — P. 77—82.
8. *Мильман Ю. В.* Квазикристаллические материалы // *Неорганическое материаловедение. Основы науки о материалах*. — К.: Наук. думка, 2008. — Т. 1. — С. 382—404.
9. *Milman Yu. V., Lotsko D. V., Dub S. N. et al.* Mechanical properties of quasicrystalline Al—Cu—Fe coatings with submicron-sized grains // *Surface & Coat. Techn.* — 2007. — **201**. — P. 5937—5943.
10. *Milman Yu. V., Sirko A. I., Iefimov M. O. et al.* High-strength aluminum alloys reinforced by nanosize quasicrystalline particles for elevated temperature application // *High Temperature Mater. and Proc.* — 2006. — **25**, No. 1—2. — P. 19—29.
11. *Пат. 66588 А України.* Спосіб виготовлення напівфабрикатів із алюмінієвих сплавів / О. Д. Нейков, О. В. Крайніков, Ю. В. Мильман та інші. // *Опубл.* 17.05.2004, Бюл. № 5.
12. *Пат. 2238172 С1 РФ.* Способ получения полуфабрикатов из алюминиевых сплавов / О. Д. Нейков, А. В. Крайніков, Ю. В. Мильман и др. // *Опубл.* 20.10.2004, Бюл. № 29.
13. *Носкова Н. И., Муслиюков Р. Р.* Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы. — Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2003. — 277 с.
14. *Васильев Л. С., Ломаева С. Ф.* К анализу механизмов, ограничивающих дисперсность порошков, полученных методом механического измельчения // *Физика металлов и материаловедение*. — 2002. — **93**, № 2. — С. 66—74.
15. *Мильман Ю. В., Голубенко А. А., Чузунова С. И. и др.* Исследование влияния температуры на механическое поведение квазикристаллов системы Al—Cu—Fe методом индентирования // *Электронная микроскопия и прочность материалов*. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2009. — Вып. 16. — С. 60—67.

### **Наноструктурные сплавы системы Al—Fe—Cr, упрочненные квазикристаллическими частицами для применения при повышенных температурах**

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

*Исследованы особенности структурообразования и механические свойства наноструктурных сплавов системы Al—Fe—Cr, дополнительно легированных Ti*



и Zr и упрочненных квазикристаллическими частицами. Полуфабрикаты из этих сплавов получены без спекания компактированием порошков, изготовленных методом распыления расплава водой высокого давления с последующей экструзией компактов в предварительно вакуумированных и герметизированных капсулах. Методы исследования: просвечивающая электронная микроскопия, в том числе высокого разрешения, рентгеноструктурный анализ, механические испытания на растяжение, измерения микро- и макротвердости. Исследования выполнены при температуре 20 °С и после длительного отжига при 300 °С. Показано, что в прутках сплавов на базе системы Al—Fe—Cr, полученных из водораспыленных порошков по разработанной технологии, формируется Al матрица с зернами размером  $\leq 500$  нм, упрочненная квазикристаллическими частицами размером 40—200 нм. Определен химический состав квазикристаллических частиц. Доказано, что пластичность полуфабрикатов сплавов системы Al—Fe—Cr практически не зависит от времени отжига и находится на уровне 7,0—8,4%, прочность и твердость несколько снижаются. Так, для сплава  $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti_1$   $\sigma_8$  при  $T_{исп} = 300$  °С составляет 345 МПа, после выдержки 1000 ч — 296 МПа. Твердость уменьшается с 1980 до 1930 МПа соответственно. Таким образом, полученный комплекс механических свойств разработанных сплавов превышает современные требования авиационной промышленности.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, наноструктура, квазикристаллические частицы, механические свойства, структура, фазовый состав.

### **Nanostructure Al—Fe—Cr alloys reinforced by quasicrystalline particles for high temperatures application**

Yu. V. Milman, N. P. Zakharova, M. O. Iefimov, A. O. Sharovsky,  
M. O. Danilenko

*The features of structure and mechanical properties of nanostructured Al—Fe—Cr alloys with Ti and Zr alloying strengthened by quasicrystalline particles were studied. Semi-finished products from these alloys were obtained without sintering by compacting powders produced by atomization of the melt by water under high pressure and subsequent extrusion of compacts in pre-evacuated and hermetic capsules. Methods of investigation: transmission electron microscopy including high-resolution, X-ray structural analysis, mechanical tensile testing measurement of micro- and macrohardness. Investigations were carried out at 20 °C and after prolonged annealing at 300 °C. It was shown that Al matrix with grains  $\leq 500$  nm reinforced by quasicrystalline particles with size from 40 to 200 nm are formed in the rods of alloys on Al—Fe—Cr base obtained from wateratomized powders by developed technology. Chemical composition of Quasicrystalline particles were determined. It is proved that plasticity of semi-finished alloys Al—Fe—Cr are practically independent from annealing time and have the level of 7,0—8,4%. Strength and hardness are some reduced. Thus, for  $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti_1$  alloy at  $T_{test} = 300$  °C, UTS = 345 MPa; after aging at 1000 hours — 296 MPa, hardness decreases from 1980 MPa to 1930 MPa, respectively. Thus, the developed alloys exceed the requirements of modern aviation industry.*

**Keywords:** aluminum alloys, nanostructures, quasicrystalline particles, mechanical properties, structure, phase composition.