

УДК 539.382, 539.4.015.1
PACS number(s): 62.20.Fe, 62.25.+g

МІЦНІСТЬ І ПЛАСТИЧНІСТЬ УЛЬТРАДРІБНОЗЕРНИСТОГО СПЛАВУ Ti-6Al-4V ELI

А. Подольский, М. Бідило

*Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України
пр. Леніна, 47, 61103, Харків, Україна
e-mail: podolskiy@ilt.kharkov.ua*

Вивчено низькотемпературні механічні властивості грубозернистого й двох ультрадрібнозернистих станів сплаву Ti-6Al-4V ELI, виготовлених методом рівноканального кутового пресування (РККП) з різною термомеханічною обробкою. Вимірювання виконували за температур 300, 77 і 4,2 К у режимі одноосьового розтягання зі швидкістю відносної деформації $\sim 4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Отримано криві деформації “напруження–пластична деформація”, виміряні межі плинності, міцності, величини однорідної пластичної деформації та деформації до руйнування. Також виміряно активаційні об’єми для руху дислокацій методом релаксації деформуючого напруження. Зроблено порівняння мікроструктур і механічних характеристик ультрадрібнозернистих станів сплаву Ti-6Al-4V ELI, які відрізняються середнім розміром зерен і розподілом фаз.

Ключові слова: сплав Ti-6Al-4V ELI, ультрадрібнозернисті структури, РККП, одноосьове розтягання.

Активний інтерес дослідників до сплаву Ti-6Al-4V зумовлений його унікальними фізичними властивостями: високим співвідношенням міцність-вага, достатньою пластичністю, здатністю витримувати високі температури та високою корозійною стійкістю [1]. Сплав Ti-6Al-4V і його модифікація Ti-6Al-4V ELI, що має знижений зміст домішок впровадження (O, N, C) і підвищену корозійну стійкість, знаходять широке застосування в авіаційній і аерокосмічній техніці, а також для виготовлення хірургічних імплантантів, криогенних ємностей високого тиску тощо. З огляду на це, збільшення міцності цього сплаву є важливим науковим і прикладним завданням.

За кімнатної температури полікристалічний сплав Ti-6Al-4V складається із ГЦУ α -зерен і розподіленої уздовж границь зерен ОЦК β -фази. Добре відомо, що механічні властивості цього сплаву залежать від його мікроструктури, особливо від форми й розміру α -зерен та розподілу β -фази.

Ефективним технологічним методом, що забезпечує збільшення міцності за умови збереження пластичності, є рівноканальне кутове пресування. Використавши цей метод [2] для сплаву Ti-6Al-4V при 700°C після термічної обробки (при 950°C) для одержання глобулярних зерен α -фази, ми одержали

ультрадрібнозернистий (УДЗ) стан із середнім розміром зерна $\sim 0,5$ мкм і поліпшеною міцністю.

Вивчення механічних характеристик УДЗ сплаву Ti-6Al-4V за низьких температур, що проведено при одноосьовому стиску в роботі [3], засвідчило, що зменшення розмірів зерен за допомогою РККП зумовлює збільшення міцності на $\sim 25\%$ у разі збереження достатньої пластичності в інтервалі температур 300–4,2 К.

На сьогодні вплив ультрадрібнозернистої структури сплаву Ti-6Al-4V на його низькотемпературні механічні характеристики детально не вивчено. Тому, метою статті є дослідження впливу різних УДЗ структур сплаву Ti-6Al-4V на його низькотемпературні механічні властивості при одноосьовому розтяганні.

Дослідження виконане з використанням полікристалічних прутків сплаву Ti-6Al-4V ELI (Titanium Grade 23), вироблених Intrinsic Devices Company. Заготовки у вихідному стані мали діаметр 40 мм і склад домішок (у вагових відсотках): Al – 6,0%; V – 4,2%; Fe – 0,2%; C – 0,001%; O – 0,11%; N – 0,0025%; H – 0,002%.

Механічні характеристики досліджували при одноосьовому розтяганні зі швидкістю відносної деформації близько $4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ на жорсткій деформаційній машині за температур 300, 77 К (у рідкому азоті) і 4,2 К (у рідкому гелії). Зразки для випробувань мали довжину робочої частини 5,5 мм і прямокутний поперечний перетин $0,75 \times 2,4 \text{ мм}^2$. З отриманих кривих деформування $\sigma(\epsilon)$ (напруження–пластична деформація) визначали такі характеристики зразків: умовна межа плинності $\sigma_{0,2}$, межа міцності σ_u , гранична однорідна деформація ϵ_{unif} (пластична деформація до початку утворення шийки), деформація до руйнування ϵ_f .

Активаційний об'єм для руху дислокацій визначали методом релаксації деформуючого напруження. З релаксаційної кривої $\sigma(t)$ (t – час від початку релаксації), активаційний об'єм V обчислювали за формулою $V = kT d \ln(-\dot{\sigma}(t)) / d\sigma(t)$, де k – постійна Больцмана, T – температура. Виміри активаційного об'єму проводилися при температурах 300 і 77 К.

Сплав Ti-6Al-4V ELI був вивчений у трьох структурних станах:

Стан 1: вихідний полікристалічний сплав, α -зерна мають подовжену форму із середніми розмірами 5–10 мкм і 20–25 мкм, відповідно. β -фаза становить приблизно 12% та є прошарком між α -зернами.

Стан 2: Заготовки довжиною 150 і діаметром 40 мм були піддані чотирьом проходам РККП при 600°C. В ході дослідження мікроструктури сплаву, суттєво зменшилися розміри α -зерен з формуванням зеренно-субзеренної структури складної морфології. Середній розмір зерен α -фази становив 0,5 – 1 мкм, частина α -зерен мала коміркову структуру з розміром комірок ~ 200 нм, у яких практично немає граткових дислокацій. Кількість β -фази зменшується після РККП до 8% унаслідок її розпаду під час деформації. Особливістю цієї структури є наявність колоній двійників, товщина яких від 100 до 50 нм, а довжина така як розміри зерен.

Стан 3: З метою зменшення загальної частки глобулярних зерен α -фази до 10% було проведено термообробку вихідних заготовок, що полягала в загартуванні від температури 950°C у воду і подальшому старінні. Після термообробки основний об'єм у структурі зразка займають колонії пластин α -фази (структура Відманштеттена), товщина й довжина яких становить у середньому 0,5 і 15 мкм, відповідно [4, 5]. Потім прутки піддавалися 2 проходам РККП і 6 циклам екструзії.

Така комбінована обробка привела до утворення дуже дисперсної мікроструктури, що характеризується наявністю великокутових границь між зернами α -фази, середній розмір α -зерен становить від 200 до 400 нм. Об'ємна частка β -фази при цьому зменшилася до 5% порівняно з вихідним станом.

Величини межі плинності $\sigma_{0,2}$, межі міцності σ_u , граничної однорідної деформації ϵ_{unif} і деформації до руйнування ϵ_f для всіх досліджених структурних станів і температур показано у табл. 1.

Таблиця 1

Механічні характеристики сплаву Ti-6Al-4V ELI у вихідному грубозернистому структурному стані і двох ультрадрібнозернистих станах при одноосьовому розтяганні

Температура	Структурний стан сплаву Ti-6Al-4V ELI	Механічні характеристики			
		$\sigma_{0,2}$, ГПа	σ_u , ГПа	ϵ_{unif}	ϵ_f
300 К	Вихідний стан 1	0,80	0,91	0,10	0,17
	УДЗ стан 2	0,98	1,03	0,04	0,07
	УДЗ стан 3	1,23	1,30	0,04	0,08
77 К	Вихідний стан 1	0,99	1,08	0,15	0,19
	УДЗ стан 2	1,49	1,57	0,03	0,06
	УДЗ стан 3	1,76	1,90	0,03	0,07
4,2 К	Вихідний стан 1	1,59	1,66	0,06	0,06
	УДЗ стан 2		1,69		
	УДЗ стан 3		1,5		

За температури 4,2 К усі зразки сплаву Ti-6Al-4V ELI в ультрадрібнозернистих структурних станах 2 і 3 зруйнувалися до початку пластичної деформації, у табл. 1 для цих випадків наведено значення прикладених напружень, при яких відбувалося руйнування.

Як видно з даних табл. 1, зміна мікроструктури й зменшення розмірів зерен у результаті РККП спричинює значне збільшення межі плинності в УДЗ стані 2 порівняно з вихідним грубозернистим станом 1 (20 при 300 К і 50% при 77). Термообробка вихідного сплаву до РККП і екструзія стимулюють подальше здрібнювання зерен Ti-6Al-4V ELI (стан 3) і зумовлює додаткове збільшення характеристик міцності сплаву відносно стану 2 (на 22,5% при 300 К та на 18% при 77 К).

Перехід від структурного стану 1 до стану 2 призводить до зменшення величин граничної однорідної деформації ϵ_{unif} з 10 до 4 % при 300 К та з 15 до 3% при 77 К, також пропорційно зменшуються значення деформації до руйнування. У станах 2 і 3 пластичні характеристики сплаву практично збігаються при температурах 300 і 77 К.

Встановлено, що значення активаційного об'єму V для руху дислокацій, що отримані з даних по релаксації напружень, практично не залежать від структурного стану сплаву. Зокрема, на межі плинності за температур 300 і 77 К $V \approx 3,5 \cdot 10^{-28}$ і $V \approx 0,9 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3$, відповідно.

Добре відомо, що механічні властивості сплаву Ti-6Al-4V, підданого РККП, суттєво залежать від структурного стану матеріалу до РККП. Наприклад, у сплаві зі структурою Відманштеттена, простежено локалізацію деформації в ході РККП

[6]. Водночас у сплаві з рівноосьовою мікроструктурою не спостерігається локалізації деформації, формуються рівноосьові ультрадрібні зерна, і досить складну дислокаційну і двійникову мікроструктуру простежено в α -зернах [6].

У цій роботі УДЗ стан 2 має рівноосьову мікроструктуру, а стан 3 отримано РККП і екструзією сплаву, який має структуру Відманштеттена, що дає змогу порівняти ефективність цих методів одержання ультрадрібнозернистого стану сплаву.

Простежене для стану 2 збільшення межі плинності і зменшення пластичності порівняно із грубозернистим станом 1 пояснюють наявністю додаткових бар'єрів для руху дислокацій у вигляді більшої кількості границь зерен і наявністю колоній двійників в ультрадрібнозернистому стані 2.

Подальше збільшення $\sigma_{0,2}$ на 20% у стані 3 порівняно зі станом 2, очевидно, зумовлено зменшенням середнього розміру α -зерен – збільшенням кількості міжзеренних границь, які є ефективними бар'єрами для дислокацій.

Цікаво зазначити, що пластичні характеристики (гранична однорідна деформація і деформація до руйнування) майже збігаються для станів 2 і 3. Таке поведіння може бути пояснено відносно схожим характером мікроструктур: границі колоній двійників у стані 2 і границі α -зерен у стані 3 можуть розглядатися як ефективні бар'єри для скочвання дислокацій. Це також може бути причиною досить малих значень пластичної деформації для станів 2 і 3 при 300 і 77 К.

За температури 4,2 К для станів 2 і 3 руйнування відбувалося при досить малих навантаженнях (див. табл. 1) і без пластичного деформування, що є ознаками крихкого руйнування, однак потрібно виконати проведені додаткові фрактографічні дослідження для з'ясування характеру руйнування сплаву на мікрорівні й встановлення особливостей деформації УДЗ сплаву при 4,2 К.

Простежена відсутність залежності величини активаційного об'єму від структурного стану сплаву може означати, що механізмом, який контролює рух дислокацій у зернах, є термоактивоване подолання дислокаціями домішкових атомів.

Механічні характеристики сплаву Ti-6Al-4V ELI суттєво залежать від мікроструктури сплаву, яка може бути змінена за допомогою РКУП, а також відповідною обробкою сплаву як до РККП, так і після.

Визначено, що здрібнювання сплаву Ti-6Al-4V ELI унаслідок РККП приводить до значного збільшення його міцності відносно вихідного стану (20 при 300 К, 50% при 77 К).

Термообробка вихідного сплаву перед РККП та екструзія призводять до значного зменшення розмірів зерен сплаву Ti-6Al-4V ELI (стан 3), що дає високу міцність (1,3 ГПа при 300 К та 1,9 ГПа при 77 К) і достатню пластичність при 300 і 77 К.

Автори висловлюють подяку Е.Д. Табачниковій і В.З. Бенгусу за участь у виконанні роботи, а також Р. З. Валієву, Л. Р. Саїтовій, І. П. Семеновій (інститут фізики нових матеріалів, УГАТУ, Уфа, Росія) за надані для досліджень зразки наноструктурного й грубозернистого сплаву Ti-6Al-4V ELI і структурні дослідження.

Робота виконана за часткової підтримки проекту № 38/05-Н програми НАНУ “Наносистеми, наноматеріали і нанотехнології”.

1. Weiss I., Semiatin S. L. Thermomechanical processing of alpha titanium alloys-an overview // *Mat. Sci. and Engng. A*. 1999. Vol. A263. P. 243–256.
2. Stolyarov V.V., Zhu Y.T., Alexandrov I.V., Lowe T.C., Valiev R.Z. refinement and properties of pure Ti processed by warm ECAP and cold rolling // *Mater. Sci. and Engng. A*. 2003. Vol. A343. P. 43–50.
3. Tabachnikova E., Bengus V., Natsik V., Csach K., Miskuf J. et al. Nanostructured titanium anomalies of plasticity under cooling from 300 down to 4.2 K // Final Program of NATO Advanced Research Workshop (Donetsk, Ukraine, September 22–26, 2004. Directors Y. T. Zhu and V. Varyukhin). 2004. P. 28–33.
4. Semenova I.P., Saitova L.R., Raab G.I., Valiev R.Z. Effect of severe plastic deformation on mechanical properties and structure of Ti alloys // *Proceedings of the 8th ESAFORM Conference on Material Forming*, Cluj-Napoca, Romania. 2005. Vol. II. P. 661–664.
5. Semenova I.P., Saitova L.R., Raab G.I., Korshunov A.I. et al. Microstructural features and mechanical properties of the Ti-6Al-4V ELI alloy processed by severe plastic deformation // *Proceedings of the International conference “Nanomaterials by severe plastic deformation”*, (Fukuoka, Japan, September 22–26, 2005). 2005. P. 757–762.
6. Kim S.M., Kim J., Ko Y.G., Lee C.S., Shin D.H. Microstructure Development and Segment Formation during ECA pressing of Ti-6Al-4V Alloy // *Scripta Mater.* 2004. Vol. 50. P. 927–930.

**STRENGTH AND PLASTISITY
OF Ti-6Al-4V ULTRA-FINE GRAINED ALLOY**

A. Podolskiy, M. Bidylo

*B. Verkin Institute for Low Temperature Physics & Engineering
47, Lenin Ave., 61103 Kharkov, Ukraine
e-mail: podolskiy@ilt.kharkov.ua*

Mechanical properties have been studied of the coarse-grained and two ultra-fine grained states of Ti-6Al-4V ELI alloy, produced by the equal channel angular pressing (ECAP), with different heat treatment. Measurements have been carried out at 300, 77, and 4,2 K under the uniaxial tension with $\sim 4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ constant strain-rate. The “stress-plastic strain” curves have been obtained; yield stress, ultimate stress, ultimate plastic strain, and deformation to failure values have been measured. Activation volumes for dislocation motion have also been measured by stress relaxation method. Microstructures and mechanical characteristics of ultra-fine grained states of Ti-6Al-4V ELI, distinguished by the average grain size and phases’ distribution, have been compared.

Key words: Ti-6Al-4V ELI alloy, ultra-fine grained structures, ECAP, uniaxial tension.

Стаття надійшла до редколегії 17.05.2006
Прийнята до друку 09.06.2008