

PACS: 81.40.-z

Л.Р. Саитова, И.П. Семенова, Г.И. Рааб, Р.З. Валиев

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА Ti-6Al-4V СПОСОБАМИ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Институт физики перспективных материалов,
Уфимский государственный авиационный технический университет
ул. К. Маркса, 12, г. Уфа, 450000, Россия

Исследованы пути повышения прочностных свойств в двухфазном титановом сплаве Ti-6Al-4V интенсивной пластической деформацией (ИПД) и термомеханической обработкой. Установлено, что интенсивное измельчение структуры в сплаве на стадии равноканального углового прессования (РКУП) дает основной вклад в его прочность. Показано, что изменение исходной микроструктуры перед РКУП оказывает значительное влияние на последующее структурообразование и механические свойства. Низкотемпературная экструзия РКУП-заготовок приводит к дополнительному измельчению структуры, накоплению дефектов кристаллической решетки, что обуславливает в итоге упрочнение сплава почти на 40% по сравнению с отожженным состоянием.

Введение

Титановый сплав Ti-6Al-4V широко применяется в различных отраслях промышленности в качестве конструкционного материала благодаря высоким значениям удельной прочности и коррозионной стойкости. Прочностные свойства сплава можно повысить за счет использования традиционных методов термической и термомеханической обработок. Однако материалы, подвергнутые упрочняющему воздействию, обычно обладают пониженной пластичностью, которая наряду с прочностью является одной из определяющих характеристик конструкционного материала.

Известно, что создание в сплаве специальной ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры с размером зерен менее 1 μm может привести к значительному повышению механических свойств [1,2]. Перспективным способом формирования УМЗ-структуры в металлах и сплавах без изменения исходных геометрических размеров заготовок является РКУП [1-3]. Но создание в двухфазном сплаве Ti-6Al-4V УМЗ-структуры – достаточно сложная задача. Это связано, во-первых, с его низкой деформируемостью, что требует

использования для РКУП повышенных температур, увеличенных углов оснастки [4,5]. Более того, существенное влияние на механическое поведение таких сплавов оказывают соотношение и размер фазовых составляющих, морфология выделяющихся в процессе обработки метастабильных фаз.

В настоящей статье представлены результаты исследований влияния РКУП и термомеханической обработки на особенности формирования микроструктуры в двухфазном сплаве медицинского назначения Ti–6Al–4V ELI (extra-low interstitial), ее взаимосвязи с механическими свойствами.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований были использованы заготовки из сплава Ti–6Al–4V ELI с пониженным содержанием кислорода диаметром 40 mm следующего состава, %: Ti – основа, Al – 6.0; V – 4.2; Fe – 0.2; C – 0.001; O₂ – 0.11; N₂ – 0.0025; H₂ – 0.002. Температура полиморфного превращения составляет 960°C. Заготовки подвергали РКУП на оснастке с углом пересечения каналов $\varphi = 120^\circ$ при температуре 600°C по маршруту Вс [4,5]. Многоцикловую экструзию заготовок проводили при 300°C с коэффициентом вытяжки $\lambda = 4.9$.

Структура сплава в состоянии поставки представляла собой смешанную структуру, состоящую из глобулярных выделений первичных зерен α -фазы в пластинчатой ($\alpha + \beta$) матрице (рис. 1,а). Размер зерен α -фазы в поперечном сечении заготовки составляет 5–10 μm , в продольном – 20–25 μm . Одну из заготовок подвергали термической обработке с целью получения однородной тонкопластинчатой структуры (рис. 1,б). Заготовку нагревали в β -области (1000°C) в течение 40 min с закалкой в воду, последующее старение проводили при 675°C в течение 4 h [6].

Микроструктуру заготовок исследовали методами оптической металлографии и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Механические испытания на растяжение проводили при комнатной (20°C) температуре на машине «Instron» со скоростью 1 mm/min. Образцы для испытаний с диаметром рабочей части 3 mm были вырезаны из центральной части прутка в направлении его продольной оси.

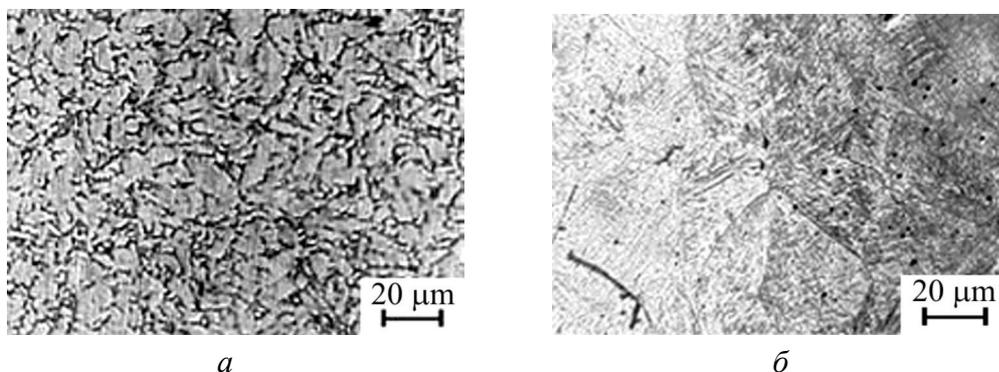


Рис. 1. Микроструктура сплава Ti–6Al–4V ELI: а – в состоянии поставки; б – после закалки при 1000°C и старения при 675°C в течение 4 h

Результаты исследования и их обсуждение

При РКУП целостность заготовок с исходной пластинчатой структурой была сохранена после 2 проходов с общей накопленной деформацией $e = 1.4$, а заготовки со смешанной структурой выдержали 4 прохода ($e = 2.8$), что связано с их более высокой пластичностью, обусловленной глобулярной составляющей α -фазы.

На рис. 2 представлена микроструктура сплава Ti-6Al-4V ELI после РКУП без предварительной термообработки. После деформации наряду с измельчением зерен α -фазы появляются тонкие (~ 50 nm) микродвойники. Отдельные зерна первичной α -фазы фрагментируются с образованием субзерен с малоугловыми разориентировками границ (рис. 2,б).

На рис. 3,а показана типичная микроструктура заготовок с исходной глобулярно-пластинчатой структурой после РКУП и теплой экструзии с $\lambda = 4.9$. Видно, что зеренно-субзеренная структура, сформировавшаяся после РКУП, претерпевает дополнительное измельчение. Размер зерен/субзерен α -фазы варьируется в пределах от 200 до 500 nm. В структуре присутствуют двойники, отдельные зерна имеют высокую плотность дислокаций, на дифракционных картинах увеличивается количество точечных рефлексов и их азимутальное размытие, что свидетельствует о высоких внутренних напряжениях.

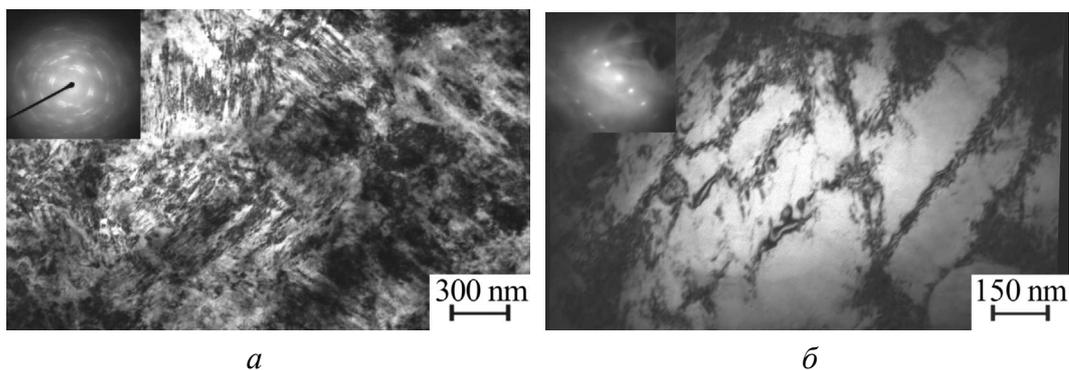


Рис. 2. Микроструктура сплава Ti-6Al-4V ELI с исходной глобулярно-пластинчатой структурой после РКУП: а – дробление пластин; б – образование субзерен α -фазы

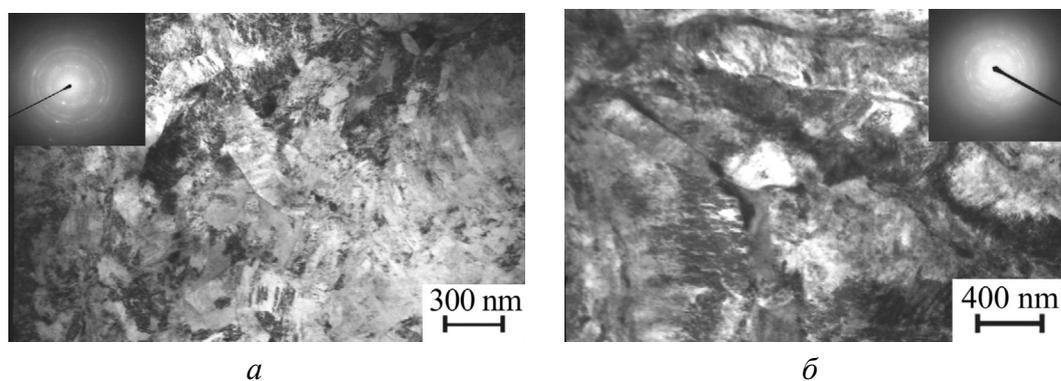


Рис. 3. Микроструктура сплава Ti-6Al-4V ELI с исходной глобулярно-пластинчатой (а) и пластинчатой (б) структурами после РКУП и экструзии

В заготовке с исходной пластинчатой структурой после РКУП и экструзии наблюдаются интенсивная фрагментация пластин α -фазы и их частичная глобуляризация. При этом структура преимущественно субзеренная с высокими внутренними напряжениями и большим количеством двойников (рис. 3,б).

Исследование механических свойств сплава показало, что после РКУП наблюдается упрочнение примерно на 20% за счет интенсивного измельчения структуры (табл. 1). Экструзия заготовок способствовала дополнительному упрочнению еще на 20% за счет фрагментации структуры, процессов скольжения, двойникования и увеличения плотности дислокаций.

Как известно, прочность металлических сплавов может быть охарактеризована пределом текучести $\sigma_{0,2}$, величину которого можно представить в виде суперпозиции нескольких механизмов упрочнения: $\sigma_{0,2} = \sigma_{s,s} + \Delta\sigma_b + \Delta\sigma_{def} + \Delta\sigma_{s,ph}$ (где $\sigma_{s,s}$, σ_b , σ_{def} , $\sigma_{s,ph}$ – соответственно твердорастворное, поликристаллическое (зернограничное), дислокационное и многофазное упрочнение) [8].

Оценка их количественного соотношения с некоторыми упрощениями [7,8] позволяет выявить роль действующих механизмов упрочнения сплава. Исходными данными для таких расчетов послужили химический состав сплава, количественные параметры структуры, соотношение фаз, полученные экспериментально (табл. 2).

Вклад твердорастворного упрочнения $\sigma_{s,s}$, обусловленный растворенными в сплаве легирующими элементами и примесями, можно считать величиной, постоянной для всех состояний сплава. Вклад зернограничного упрочнения

Таблица 1

Механические свойства сплава Ti-6Al-4V ELI в различных состояниях

Состояние	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Исходное	940	840	16	45
РКУП, 120°, 600°C, 4 прохода	1090	1030	9	40
РКУП, 120°, 600°C, 4 прохода + + экструзия 300°C, $\lambda = 4.9$	1300	1230	8	35
Предварительная термообработка + + РКУП, 120°, 600°C, 2 прохода + + экструзия 300°C, $\lambda = 4.9$	1360	1250	12	39

Таблица 2

Анализ компонентов упрочнения сплава Ti-6Al-4V ELI

Состояние	Теоретическое значение предела текучести $\sigma_{0,2}$, МПа				Экспериментальное значение предела текучести $\sigma_{0,2}$, МПа
	компоненты упрочнения				
	$\sigma_{s,s}$	$\Delta\sigma_b$	$\Delta\sigma_{def}$	$\Delta\sigma_{s,ph}$	
Исходное (отжиг)	550	150	–	130	830
РКУП		500	20		1200
РКУП + + экструзия		520	100		1300

составляет до 40% от общей прочности, он обусловлен образованием барьеров для движения дислокаций в виде новых границ зерен и субзерен в процессе РКУП [7,8]. Последующая экструзия за счет дислокационного механизма упрочнения вносит дополнительный вклад в повышение предела текучести сплава.

Заключение

По результатам проведенных исследований установлено, что использование РКУП в комбинации с термической и термомеханической обработками позволяет получить в сплаве Ti-6Al-4V ELI с пониженным содержанием кислорода УМЗ-структуру. При этом прочность достигает значений $\sigma_b = 1360$ МПа, что на 40% выше исходной величины, тогда как пластичность сплава составляет не менее 8%.

Показано, что предварительная термообработка исходных заготовок с образованием тонкопластинчатой микроструктуры позволяет улучшить как прочностные, так и пластические свойства за счет интенсивного двойникования, частичной глобуляризации пластин в процессе ИПД.

Работа была выполнена при поддержке гранта А03-3.17-15 Министерства образования Российской Федерации для поддержки научно-исследовательской работы аспирантов вузов.

1. R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov, Prog. Mater. Sci. **45**, 103 (2000).
2. R.Z. Valiev, Proc. NATO ARW (2000).
3. Y.G. Ko, W.S. Jung, D.H. Shin, C.S. Lee, Scripta Mater. **48**, 197 (2003).
4. I.P. Semenova, G.I. Raab, L.R. Saitova, Book of abstracts 13th International conference on the strength of materials (2003), p. 378.
5. I.P. Semenova, Y.T. Zhu, G.I. Raab, T.C. Lowe, R.Z. Valiev, Ultrafine Grained Materials III, TMS (The Minerals, Metals and Materials Society) (2004), p. 463–466.
6. Materials Properties Handbook: Titanium Alloys, R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings (eds.) (1998).
7. M.I. Goldshtein, V.S. Litvinov, M.F. Bronfin, Metallophysics of high-strength alloys, Metallurgia, Moscow (1986), p. 312.
8. A.A. Popov, Proceedings of the conference «Nanomaterials by severe plastic deformation – NANOSPD2» (2002), p. 817.

L.R. Saitova, I.P. Semenova, G.I. Raab, R.Z. Valiev

IMPROVEMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF Ti-6Al-4V ALLOY BY METHODS OF EQUAL-CHANNEL ANGULAR PRESSING FOLLOWED BY PLASTIC DEFORMATION

The methods of strength enhancement in two-phase titanium alloy Ti-6Al-4V using severe plastic deformation (SPD) and thermomechanical treatment have been investigated. It was established that structure refinement by ECAP enabled to enhance greatly the alloy

strength. The change of the initial structure before ECAP is shown to have a great effect on the consequent structure formation and mechanical properties. Low-temperature extrusion of ECAP-billets results in an additional structure refinement, accumulation of crystalline lattice defects, which enabled to increase the strength of the alloy by about 40% in comparison with the annealed state.

Fig. 1. Microstructure of Ti–6Al–4V ELI alloy: *a* – initial state; *b* – after water quenching at 1000°C and overaging at 675°C for 4 h

Fig. 2. Microstructure of Ti–6Al–4V ELI alloy of initial globular-plate structure after ECAP: *a* – breakage of plates; *b* – formation of α -phase subgrains

Fig. 3. Microstructure of Ti–6Al–4V ELI alloy of initial globular-plate (*a*) and plate-like (*b*) structure after ECAP and extrusion