

УДК 669. 295: 621.785

Comparative analysis of VT6 titanium alloy in structural states with enhanced mechanical properties

Сравнительный анализ структурных состояний и повышенных механических свойств титанового сплава ВТ6

*E. V. Safin*¹, *S. P. Malysheva*², *R. M. Galeev*³, *D. V. Belyaeva*⁴
*Э. В. Сафин*¹, *С. П. Малышева*², *Р. М. Галеев*³, *Д. В. Беляева*⁴

^{1,4} Ufa State Aviation Technical University, Marx str. 12, Ufa, 450008, Russia

^{2,3} Institute of Metal Superplasticity Problems, Russian Academy of Sciences, Khalturin str. 39, Ufa, 450001, Russia

¹ edsafin@ufamail.ru, ^{2,3} svufa@mail.ru

^{1,4} Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, 450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12

^{2,3} Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Россия, 450001, Уфа, ул. Халтурина, 39

¹ edsafin@ufamail.ru, ^{2,3} svufa@mail.ru

ABSTRACT

The paper describes the results of comparative studies of the mechanical properties of VT6 titanium alloy (Ti-6Al-4V) with a standard equiaxial microcrystalline structure (MC) with an average grain size of the α phase of 5-15 μm , a homogeneous submicrocrystalline structure (SMC) with an average grain size (fragments) 0.5 μm and a bimodal submicro-micrograin structure consisting of a matrix with an average grain size (fragments) of 0.8-1.5 μm with inclusion of α -phase grains of about 5 μm in size under static, dynamic and cyclic loading. It is shown that an alloy with a homogeneous SMC structure has increased hardness, strength, and fatigue resistance in comparison with MC, however, the toughness in the SMC state is significantly lower than in the MC state, which reduces the prospects for using an alloy with such a structure. Of practical value is an alloy with a bimodal structure, which, with comparable hardness, strength, and fatigue resistance characteristics comparable to the SMC state, has a markedly higher ductility and impact strength, the value of which for specimens with induced fatigue crack (CTF) is 0.15 MJ / m², which is significantly higher than in an alloy with an SMC structure - 0.08 MJ / m², which allows us to predict high survivability in parts made of an alloy with a bimodal structure, which is technologically easier to form than an SMC. The performed assessment of the mechanical properties allows us to develop general recommendations regarding the formation of the microstructure type and the size of the structural components in the VT6 alloy, depending on the magnitude and conditions of loading, the expected operating temperature of the parts.

KEYWORDS

VT6 two-phase titanium alloy; microstructure; mechanical properties; tensile tests; impact bending tests; fatigue tests.

АННОТАЦИЯ

Описаны результаты сравнительных исследований механических свойств титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V) со стандартной равноосной микрокристаллической структурой (МК) со средним размером зерен α -фазы 5-15 мкм, однородной субмикрокристаллической структурой (СМК) со средним размером зерен (фрагментов) 0,5 мкм и бимодальной субмикро-микроструктурой, состоящей из матрицы со средним размером зерен (фрагментов) 0,8-1,5 мкм с включением в нее зерен α -фазы размером порядка 5 мкм, при статическом, динамическом и циклическом нагружении. Показано, что сплав с однородной СМК-структурой обладает по сравнению с МК повышенными твердостью, прочностью и сопротивлением усталости, однако ударная вязкость в СМК-состоянии существенно ниже, чем в МК, что уменьшает перспективы применения сплава с такой структурой. Практическую ценность представляет сплав с бимодальной структурой, который при сопоставимых с СМК-состоянием сплава характеристиках твердости, прочности, сопротивления усталости обладает заметно большей пластичностью и ударной вязкостью. Значение последней у образцов с наведенной усталостной трещиной (КТ) составляет 0,15 МДж/м², что значительно выше, чем в сплаве с СМК структурой 0,08 МДж/м². Это позволяет прогнозировать высокие показатели живучести у деталей из сплава с бимодальной структурой, которую технологически сформировать легче, чем СМК-структуру. Выполненная оценка механических свойств позволяет выработать общие рекомендации, касающиеся формирования типа микроструктуры и размеров структурных составляющих в сплаве ВТ6 в зависимости от величины и условий нагружения, предполагаемой температуры эксплуатации деталей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Титановый сплав ВТ6; микроструктура; механические свойства; испытания на растяжение; испытания на ударный изгиб; испытания на усталость.

Введение

Существенный прогресс в развитии науки и техники в последние годы связан с созданием и использованием ультрамелкозернистых (УМЗ), субмикроструктурных (СМК) и наноструктурных материалов, обладающих повышенными механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками [1–8]. Применять стали и сплавы с такими микроструктурами предполагается, в частности, в качестве конструкционных материалов для изготовления высоконагруженных деталей двигателей летательных аппаратов. Проведенные многочисленные исследования показывают, что формирование СМК структур в полуфабрикатах из обычных конструкционных сталей и сплавов позволяет значительно повысить их прочность, сопротивление усталости, износостойкость. Однако практическое применение материалов со сверхмелким зерном сдерживает ряд недостатков. К ним относятся пониженные пластичность, термостабильность [4, 5], ударная вязкость, циклическая трещиностойкость, повышенная чувствительность к концентраторам напряжений, а также порообразование при циклических нагрузках в зоне наибольших напряжений (приповерхностной зоне). В этой связи при выборе материала деталей машин следует учитывать разнонаправленное изменение различных характеристик механических свойств при статическом, динамическом и циклическом нагружениях. Для решения вопроса повышения характеристик механических свойств сплава ВТ6 при ударном нагружении по сравнению с СМК-состоянием представляется перспективным применение сплава с бимодальной субмикро-микроструктурой [9–13], в случае с которой при повышенных показателях прочности сохраняются приемлемые характеристики пластичности и ударной вязкости [20, 21].

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа механических свойств титанового сплава ВТ6 с субмикроструктурной, микроструктурной и бимодальной субмикро-микроструктурами при статическом, динамическом и циклическом нагружениях для определения состояния с наиболее высоким комплексом механических свойств.

1. Материал и методика исследования

В работе исследовали двухфазный титановый сплав ВТ6 (6,5%Al; 5,1%V; 0,1%Fe; 0,03%Si; 0,02%C; 0,01%N) с температурой полиморфного превращения $\alpha \rightarrow \beta$ $T_{пп} = 980$ °С. Для сравнения были использованы три состояния сплава: 1) микроструктурное (МК) со средним размером зерен α -фазы 5–15 мкм; 2) субмикроструктурное (СМК) со средним размером зерен (фрагментов) 0,5 мкм; 3) бимодальное с субмикро-микроструктурной структурой, состоящей из матрицы со средним размером зерен (или их фрагментов) 0,8–1,5 мкм с включением в нее зерен α -фазы размером порядка 5 мкм. Образцы с МК структурой были получены горячей прокаткой при температуре 880 °С и последующим рекристаллизационным отжигом при температуре 840 °С в течение 2 ч. Образцы с СМК структурой были изготовлены методом всесторонней изотермическойковки с постепенным понижением температуры от этапа к этапу. Температура последнего этапа деформации была 630 °С, скорость деформации – около 10^{-3} с⁻¹ [4–6]. Образцы с бимодальной структурой были получены всесторонней ковкой при температуре 750 °С и последующим отжигом при 720 °С в течение 3 ч.

Структурные исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе Tescan LYRA 3. Микротвердость поверхности образцов по Виккерсу определяли на микротвердомере Struers Duramin. Исследования выполняли на микрошлифах с размерами 15×15×2 мм. Измерения механических свойств сплава ВТ6 в различных состояниях проводили на динамометре и копуре фирмы Instron. Механические характеристики определяли в соответствии с ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 9495-78. Испытания на ударную вязкость проводили по ГОСТ 9454-78 на образцах с U-образным концентратором (КСУ) и с наведенной усталостной трещиной (КСТ). Испытания на усталость проводили методом «лестницы». Консольные образцы с МК и СМК структурами испытывали на вибростенде ВЭДС-400А при температуре $T = 20$ °С на базе $N = 2 \times 10^7$ циклов с частотой порядка 500 Гц. Амплитуда цикла находилась в диапазоне $0 - \sigma_{max}$, где максимальные напряжения цикла σ_{max} составляли 500÷740 МПа.

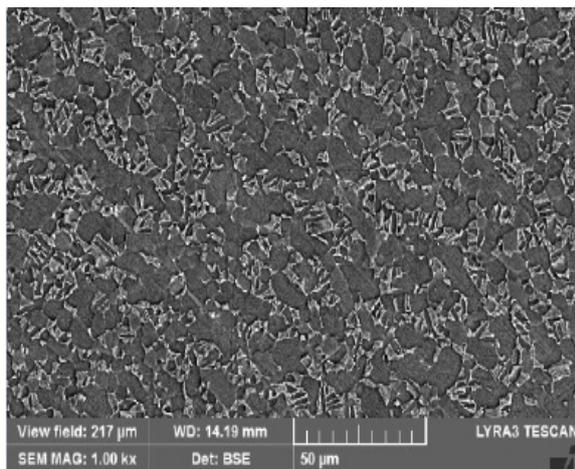
Гладкие образцы круглого сечения с бимодальной структурой испытывали по схеме изгиб с вращением при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на базе $N = 1 \times 10^7$ циклов с частотой 50 Гц.

2. Результаты и их обсуждение

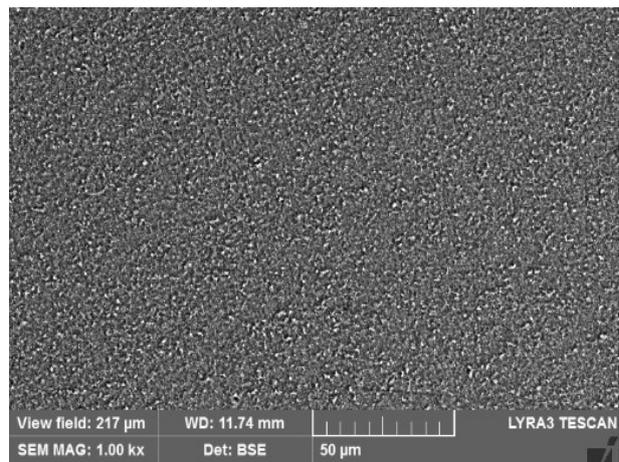
На рис. 1 представлена микроструктура сплава ВТ6 в исследованных состояниях.

Видно, что после горячей прокатки (состояние 1, рис. 1, а) сформировалась глобулярная МК структура с размером α -зерен 5 мкм и с дисперсной смесью α - и β - фаз с размерами частиц фаз около 1 мкм. После все-

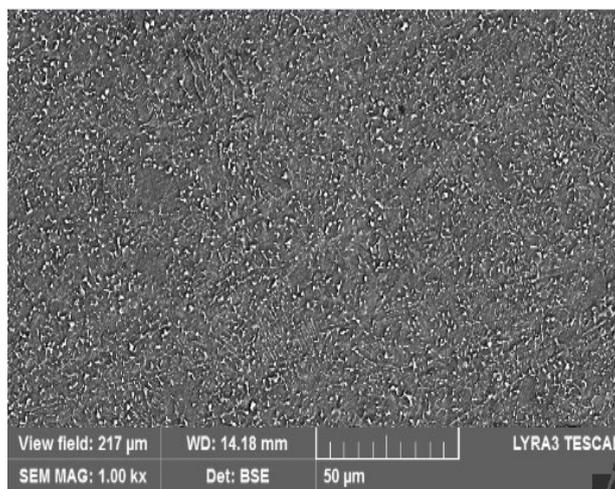
стороннейковки с понижением температуры в сплаве ВТ6 (рис. 1, б) сформировалась однородная глобулярная СМК микроструктура со средним размером микрофрагментов α - и β -фаз 0,5 мкм (состояние 2). В бимодальном состоянии 3 (рис. 1, в) микроструктура менее однородна по сравнению с СМК (состояние 2), здесь имеются остатки непроработанных при ковке пластин α -фазы размером порядка 5 мкм и дисперсная смесь α - и β - фаз с размерами частиц фаз менее 1 мкм. В табл. 1 представлены механические свойства сплава ВТ6 в исследованных состояниях.



а



б



в

Рис. 1. Микроструктура сплава ВТ6 (сканирующая электронная микроскопия): микрокристаллическая со средним размером зерен α -фазы 5–15 мкм (состояние 1) (а), субмикрокристаллическая со средним размером зерен (фрагментов) 0,5 мкм (состояние 2) (б), бимодальная с размером зерен 0,8–5 мкм (состояние 3) (в)

Fig. 1. Microstructure of VT6 alloy (scanning electron microscopy): microcrystalline with an average size grains of the α phase 5–15 μm (condition 1) (a), submicrocrystalline with an average grain size (fragments) of 0.5 μm (condition 2) (b), bimodal with an grain size of 0.8–1.5 μm (condition 3) (c)

Механические свойства сплава ВТ6 в исследованных состояниях

Mechanical properties of the VT6 alloy in the studied states

Состояние	σ_B , МПа / MPa	$\sigma_{0,2}$, МПа / MPa	δ , %	ψ , %	Микротвердость, НВ	КСУ, МДж/м ² / MJ / m ²	КСТ, МДж/м ² / MJ / m ²	σ_{-1} , МПа / MPa
Состояние 1 – МК (5–15 мкм) / Condition 1 – MC (5–15 μm)	1064	950	18,9	42,9	334,5	0,45	0,24	527
Состояние 2 – СМК (0,5 мкм) / Condition 2 – SMC (0.5 μm)	1302	1178	7,4	60,1	362,0	0,37	0,08	688
Состояние 3 – бимодальное (0,8–5 мкм) / Condition 3 – bimodal (0.8–5 μm)	1112	1089	19,4	55,3	354,2	0,38	0,15	720

У сплава ВТ6 в состоянии 2 по сравнению с состоянием 1 наблюдается заметный рост характеристик прочности и твердости. Прочность сплава в состоянии 1 почти на 250 МПа выше прочности сплава в состоянии 1. Относительное удлинение в состоянии 2 ниже, чем в состоянии 1, но, с другой стороны, относительное сужение материала в состоянии 2 почти в 1,5 раза больше, чем в состоянии 1. Однако ударная вязкость в состоянии 2 существенно ниже, хотя по параметру КСУ она остается в пределах требований технических условий к сплаву ВТ6 (КСУ более 0,35). Наведение усталостной трещины (КСТ) снижает величину ударной вязкости во всех трех состояниях.

В литературе предложен подход к повышению характеристик вязкости и трещиностойкости, пластичности, который заключается в использовании структуры бимодального типа, состоящей из микронного размера частиц α -фазы в УМЗ смеси α - и β -фаз [9–13]. В этой связи практический интерес представляет сплав с бимодальной субмикро-микроструктурой в состоянии 3, микротвердость которого по Виккерсу составляет 354 НВ, это лишь немного ниже, чем в состоянии 2, но существенно выше, чем в состоянии 1. Кроме того, сплав с бимодальной структурой

(состояние 3) обладает заметно большей пластичностью [20, 21].

Значения ударной вязкости сплава с бимодальной структурой (состояние 3), полученные на образцах с U-образным концентратором (КСУ), чуть выше, чем у СМК образцов (состояние 2), а у образцов с наведенной усталостной трещиной (КСТ) значения значительно выше, чем в сплаве с однородной СМК структурой, но ниже, чем в МК состоянии (состояние 1). При этом разница в значениях ударной вязкости между бимодальным и МК состоянием также увеличивается с повышением остроты надреза. Одной из причин повышенной ударной вязкости является высокая объемная доля границ зерен и ламельный характер микроструктуры, которые являются барьерами для распространения трещин [19]. Наиболее очевидным способом увеличения области пластической деформации в вершине трещины и тем самым повышения работы, затрачиваемой на продвижение трещины, является отжиг материала, снимающий внутренние напряжения, но не приводящий к росту зерен.

Значение предела выносливости образцов с МК микроструктурой в состоянии 1 составило $\sigma_{-1} = 527$ МПа. Значение предела вынос-

ливости образцов с СМК микроструктурой в состоянии 2 – $\sigma_{-1} = 688$ МПа. То есть с повышением характеристик прочности отмечается повышение предела выносливости [5]. Расчетное значение предела выносливости для образцов с бимодальной микроструктурой (состояние 3) составило $\sigma_{-1} = 720$ МПа, что сопоставимо с СМК-состоянием 2. Однако здесь следует учесть, что испытания на усталость в бимодальном состоянии 3 проводились на базе $N = 1 \times 10^7$ циклов нагружения, а в состояниях 1 и 2 – на базе $N = 2 \times 10^7$ циклов [21].

Технологически в сплаве ВТ6 сформировать бимодальное состояние 3 легче, чем СМК-состояние 2, поскольку всесторонняяковка осуществляется при одной достаточно высокой температуре (в нашем случае 750 °С) и при этом не требуется больших усилий прессового оборудования [20, 21].

С другой стороны, в состоянии 3 наблюдаются фрагменты исходной пластинчатой микроструктуры, которые разбились на мелкие частицы преимущественно глобулярной формы, размером 1–5 мкм. Это обуславливает большую по сравнению с состоянием 2 неоднородность зеренно-субзеренной структуры, что может негативно влиять на механические свойства и сверхпластичность сплава [14–18]. Однако по сравнению с серийно применяемой технологией получаемая микроструктура заготовок для деталей машин все равно будет более однородной и будет иметь более высокие прочностные свойства [20, 21]. Поэтому для изготовления высоконагруженных деталей машин, работающих при невысоких эксплуатационных температурах, рациональным будет применение титанового сплава ВТ6 в бимодальном состоянии с суб-микро-микрзеренной структурой с размером зерен от 0,8 до 5 мкм.

Заключение

Сплав с однородной СМК структурой обладает по сравнению со сплавом с МК структурой повышенной твердостью, прочностью и сопротивлением усталости, однако ударная вязкость в СМК-состоянии существенно ниже, чем в МК-состоянии. Практическую значимость представляет сплав с бимодальной структурой, который при сопоставимых с СМК-состоянием характеристиках твердости, прочности и сопротивления усталости

обладает заметно большими пластичностью и ударной вязкостью. Значение ударной вязкости сплава с бимодальной структурой у образцов с наведенной усталостной трещиной (КСТ) составляет 0,15 МДж/м², что значительно выше, чем в сплаве с однородной СМК-структурой – 0,08 МДж/м². Это позволяет прогнозировать более высокие показатели живучести у деталей из сплава с бимодальной структурой, которую технологически сформировать легче, чем СМК-структуру.

Выполненная оценка механических свойств позволяет выработать общие рекомендации, касающиеся формирования типа микроструктуры и размеров структурных составляющих в сплаве ВТ6 в зависимости от величины и условий нагружения, а также предполагаемой температуры эксплуатации деталей.

Список литературы

1. Gleiter H. Nanocrystalline materials // *Physica status Solidi*. 1992. V. 172. P. 41.
2. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.
3. Hot Plasticity of Alpha Beta Alloys, Titanium Alloys / M. Motyka et. al. // *Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications*. 2012. P. 81–116. DOI: 10.5772/34806.
4. Mechanical properties of VT6 titanium alloy with microcrystalline and submicrocrystalline structures / G. A. Salishchev et. al. // *Metals*. 1999. V. 6. P. 84–87.
5. The effect of submicrocrystalline structure on the fatigue strength of VT6 alloy / S. V. Stallions et. al. // *Prospective materials*. 1999. V. 6. P. 16–22.
6. Mechanical Properties of Ti–6Al–4V Titanium Alloy with Submicrocrystalline Structure Produced by Multiaxial Forging / G. A. Salishchev et. al. // *Mat. Sci. Forum*. 2008. V. 584–586. P. 783–788. DOI: 10.2320/matertrans.46.2020.
7. On the mechanisms of superplasticity in Ti–6Al–4V / E. Alabort et. al. // *Acta Materialia*. 2016. V. 105. P. 449–463. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.12.003.
8. Vinogradov A. Yu., Hasimoto S. Fatigue of ultrafine-grained materials obtained by equal-channel angular pressing // *Metals*. 2004. No. 1. P. 51–62.

9. Sevillano J. Gil, Aldazabal J. Ductilization of nanocrystalline materials for structural applications // *Scripta materialia*. 2004. V. 51. P. 795–800. DOI: 10.1016/0956-7151(94)90030-2.
10. Ma E. Instabilities and ductility of nanocrystalline and ultrafine-grained metals // *Scripta Materialia*. 2003. V. 49. P. 663–668.
11. High tensile ductility in a nanostructured metal / Y. Wang et. al. // *Letters of Nature*. 2002. V. 419. P. 912–914. DOI: 10.1038/nature01133.
12. Koch C. C. Optimization of strength and ductility in nanocrystalline and ultrafine grained metals // *Scripta Materialia*. 2003. V. 49. P. 657–662.
13. Malygin G. A. Plasticity and strength of micro- and nanocrystalline materials // *Solid State Physics*. 2007. V. 49, No. 6. P. 961–982.
14. Skotnikova M. A., Lanina A. A. Structural Features of the Material of Steam Turbine Blades from Titanium ($\alpha + \beta$) VT6 Alloy with a Bimodal Structure // *Metalworking*. 2009. V. 4, No. 52. P. 53–54.
15. Mechanical properties of nanostructured titanium of serial production / M. B. Ivanov et. al. // *Russian Nanotechnology*. 2011. V. 6, No. 5. P. 108–114.
16. Ratchet I. V., Lykova O. N., Grabovetskaya G. P. Features of the evolution of the structure of the VT 6 titanium alloy in a submicrocrystalline state under superplastic deformation // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Mathematics and mechanics. Physics*. 2014. V. 325, No. 2. P. 99–104.
17. Kolobov Yu. R., Grabovetskaya G. P. Severe Plastic Deformation. Toward Bulk Production of Nanostructured Materials // *Nova Science Publishers, Inc. Monograph*. 2005. P. 275–293.
18. The violinist. Investigation of the development of grain-boundary slippage during superplastic deformation of a VT6 titanium alloy with a submicrocrystalline structure / I. V. Ratchet et. al. // *Physical Mesomechanics*. 2009. V. 12, No. 5. P. 97–101.
19. Joiners V. V. Impact strength of nanostructured titanium // *Metallurgy and heat treatment of metals*. 2007. No. 2. P. 13–16.
20. Safin E. V., Malysheva S. P., Galeev R. M. Improving the mechanical properties of VT6 titanium alloy by forming a bimodal submicro-micrograin structure // *Letters on Materials*. 2015. V. 1, No. 17. P. 94–96.
21. Safin E. V., Malysheva S. P., Galeev R. M. Assessment of the mechanical properties of VT6 titanium alloy with submicrocrystalline and bimodal submicro-micrograin structures under static, dynamic and cyclic loading // *Fundamental problems of modern materials science*. 2017. V. 14, No. 4. P. 519–522.