

Влияние структуры на механическое поведение титанового сплава ВТ6 при ударном нагружении

Саркеева А.А.^{1,†}, Лутфуллин Р.Я.¹, Круглов А.А.¹, Астанин В.В.²

[†]aigul-05@mail.ru

¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Ст. Халтурина, 39, 450001, г. Уфа

²Уфимский государственный авиационный технический университет, ул. К. Маркса, 12, 450000, г. Уфа

The effect of structure on mechanical behavior of VT6 titanium alloy under shock loading

A.A. Sarkeeva¹, R.Ya. Lutfullin¹, A.A. Kruglov¹, V.V. Astanin²

¹Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Khalturin St. 39, 450001 Ufa

²Ufa State Aviation Technical University, Marks St. 32, 450074 Ufa

Проанализировано механическое поведение при ударном нагружении образцов из титанового сплава ВТ6 с различной структурой: пластинчатая крупнокристаллическая (КК), глобулярная микроструктурная (МК), наноструктура (НС). Результаты испытаний показали, что сплав ВТ6 с КК и МК структурой обладает более высоким уровнем ударной вязкости по сравнению с наноструктурой. С уменьшением размера структурных составляющих в исследованном сплаве работа зарождения трещины повышается на ~55%, тогда как работа распространения понижается на ~70%. При этом ударная вязкость снижается на ~20%. Фрактографическая картина излома отражает существенные различия в природе разрушения образцов сплава ВТ6 в зависимости от типа структуры.

Ключевые слова: титановый сплав, микроструктура, ударная вязкость.

We compare the mechanical behavior of samples under shock loading made of VT6 titanium alloy with different structures: coarse-crystalline (CC) structure with lamellar morphology of phases, microcrystalline (MC) structure with globular morphology of phases, and nanostructure (NS). The test results show that the alloys with CC and MC structures have higher impact toughness in comparison with the nanostructured alloy. With reduction of the size of structural components the work of crack nucleation raises by ~55%, while the work of crack propagation reduces by ~70% and the impact toughness decreases by ~20%. The fracture images reflect significant differences in the fracture nature of VT6 titanium alloy samples with different structures.

Keywords: titanium alloy, microstructure, impact toughness.

1. Введение

Изготовление ответственных деталей сложных конструкций из титановых сплавов для авиационного машиностроения подразумевает повышенные требования к их надежности. При этом основные требования к механическим характеристикам материала, например, полый лопатки вентилятора авиационного двигателя, сводятся главным образом к высоким показателям сопротивления динамическим нагрузкам и усталостной прочности [1].

Согласно современным представлениям, перспективными для использования в качестве конструкционного материала являются наноструктурные (НС) сплавы, в частности, титановый сплав ВТ6 [2]. Известно [2,3], что получение наноструктуры в полуфабрикатах из сплава ВТ6 позволяет заметно повысить их прочностные характеристики. В литературе недостаточно сведений об особенностях разрушения наноструктурных материалов при ударном нагружении.

В этой связи цель работы состояла в сравнительном анализе механического поведения при ударном нагруже-

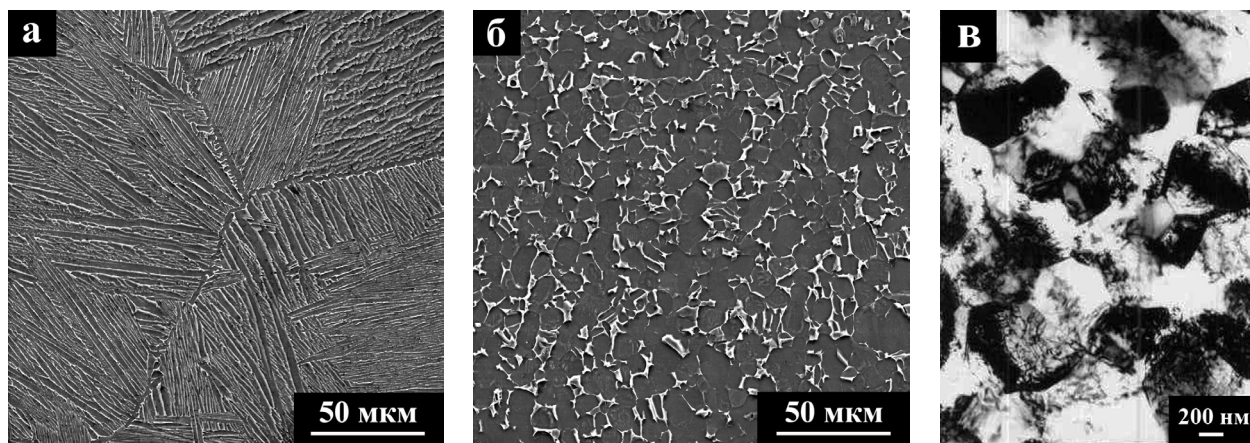


Рис. 1. Микроструктура сплава ВТ6: а - КК; б - МК; в - НС.

Таблица 1

Полная работа разрушения (A), работа зарождения трещины (A_z), работа распространения трещины (A_p) и значения ударной вязкости (КСУ) в образцах сплава ВТ6 с различным типом структуры.

Исходная структура	A_z , Дж	A_p , Дж	A , Дж	КСУ, МДж/м ²
КК	18	30	48	0,61
МК	27	24	49	0,64
НС	27	9	36	0,47

нии титанового сплава ВТ6 со структурой существенно различающейся размером структурных составляющих.

2. Материал и методика исследования

В качестве объекта исследования был выбран широко используемый в авиакосмическом машиностроении двухфазный титановый сплав ВТ6 (производства ВСМ-ПО-АВИСМА, г. Верхняя Салда) стандартного химического состава, соответствующего ГОСТ 19807-91. Данный сплав является аналогом не менее популярного за рубежом сплава Ti-6Al-4V.

Для сравнения были взяты три типа структур, представленных на рисунке 1. Крупнокристаллическая пластинчатая структура (КК) была получена вакуумным отжигом в β -области при температуре 1000°C. Средний размер β -превращенных зерен составил 500 мкм (рис. 1,а). Микроструктурная глобулярная (МК) структура со средним размером α -фазы 6 мкм (рис. 1,б) была получена отжигом в вакууме 2×10^{-3} Па в печи ОКБ-8086 при температуре 900°C в течение 2-х часов заготовок из плиты толщиной 30 мм. Наноструктура в заготовках была сформирована методом всесторонней изотермическойковки в ($\alpha+\beta$)-области [2] со ступенчатым понижением температуры до 600°C. Средний размер зерен составил 0,5 мкм (рис. 1,в).

Механические испытания на ударный изгиб проводили согласно ГОСТ 9454-84 на стандартных образцах типа 1 с размерами 10×10×55 мм³. Испытания проводили при комнатной температуре на копре с падающим грузом Instron CEAST 9350 и записью диаграмм ударного нагружения в координатах «Усилие – перемещение».

Разделение полной работы разрушения ударного образца ($A=A_z+A_p$) на ее составляющие – работу зарождения трещины (A_z) и работу распространения трещины (A_p) осуществляли по методике, подробно описанной в монографии [4]. Согласно этой методике площадь под восходящей частью кривой ударного нагружения соответствует работе зарождения трещины, а под ниспадающей частью – работе ее распространения.

Металлографические исследования проводили на растровом электронном микроскопе «JEOL JXA-6400», фактографические - на «TESCAN MIRA3 LMU», тонкие фольги изучали на электронном микроскопе «JEM-2000 EX».

3. Результаты и обсуждение

Результаты проведенных механических испытаний на ударный изгиб образцов из титанового сплава ВТ6 с различным типом структуры представлены в таблице 1. Видно, что сплав с КК и МК структурой обладает более высокой ударной вязкостью по сравнению с наноструктурой, которая имеет пониженную на 20% величину данной характеристики. Эти результаты в целом не противоречат литературным данным [3,5-6], хотя имеются и особенности, в силу различия анализируемых структур.

Представляет интерес разделить общую работу разрушения на работу зарождения и распространения трещины при ударном изгибе титанового сплава ВТ6, что позволит конкретизировать влияние структуры на эти характеристики. В таблице 1 приведены значения полной работы разрушения и ее составляющих, полученных на основе расчета результатов механических ис-

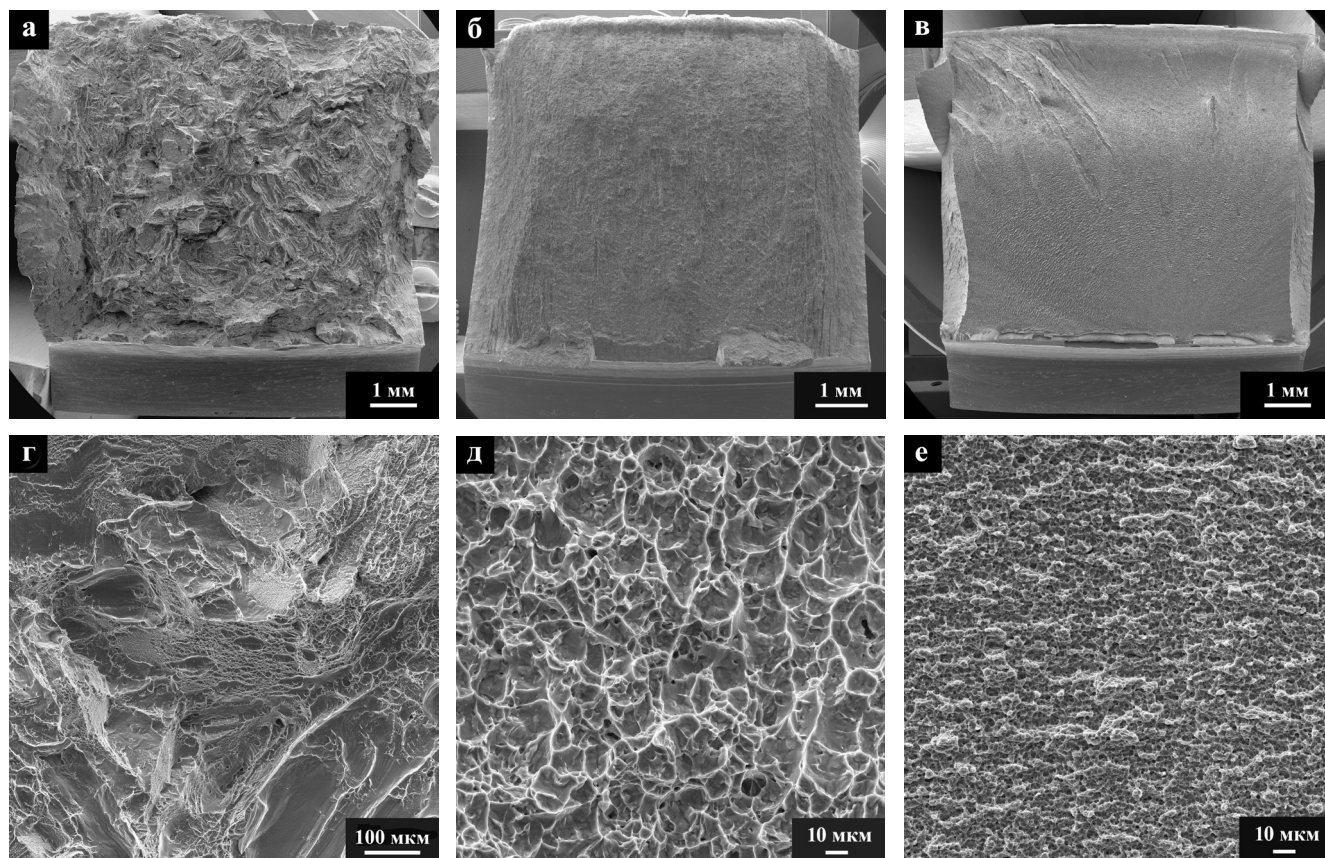


Рис. 2. Изломы образцов сплава ВТ6 после испытаний на ударный изгиб: а, г – КК структура; б, д – МК структура; в, е – наноструктура.

пытаний по методике [4]. Работа зарождения трещины минимальна для сплава с КК структурой и составляет 18 Дж, для сплава с МК и наноструктурой A_z возрастает до величины 27 Дж. При оценке работы распространения трещины выявлена противоположная закономерность. Максимальную работу распространения трещины, равной 30 Дж, имеет сплав с КК структурой. В материале с МК структурой A_p снижена на 20%, сплав с наноструктурой имеет крайне низкую величину данной характеристики, равной 9 Дж, то есть имеет место 70% снижение работы распространения трещины в сравнении с КК структурой. Полученные результаты позволяют понять причину резкого снижения ударной вязкости у НС сплава ВТ6, наблюдаемого в настоящей работе, а также в работах [3,6], посвященных исследованию ультрамелкозернистого и субмикрокристаллического сплава ВТ6. Влияние структуры на механическое поведение при ударном нагружении отражается и на характере излома исследованных образцов (рис. 2). Морфология поверхности разрушения существенно отличается у образцов с разной структурой. Для крупнокристаллического сплава ВТ6 характерен глубокий рельефный излом (рис. 2,а,г), с элементами скола и отрыва. Такой вид излома типичен для двухфазных титановых сплавов с крупнокристаллической пластинчатой структурой [7], процесс разрушения которых требует значительных затрат энергии. Излом образца сплава с МК структурой более ровный, имеет вид вязкого отрыва и состоит из относительно равноосных «ямок» различных размеров (рис. 2,б,д).

Поверхность разрушения НС сплава ВТ6 имеет слабо развитый рельеф, микроволнистый в основной зоне разрушения с переходом в рыхлый в зоне долома (рис. 2, в,е). Такой характер излома соответствует низкоэнергетическому процессу разрушения, что проявилось в низкой работе распространения трещины ($A_p = 9$ Дж).

Основной вклад в показатель ударной вязкости при испытании образцов из НС сплава ВТ6 вносит работа зарождения трещины, связанная с повышенными прочностными характеристиками материала. Это обстоятельство следует учитывать при использовании НС сплава ВТ6 для изготовления ответственных деталей и конструкций, где особенно тщательно следует избегать поверхностных концентраторов напряжений. С другой стороны, учитывая повышенную твердофазную свариваемость НС титанового сплава [8,9] и проявление в нем эффекта низкотемпературной сверхпластичности [10,11], возникает уникальная возможность изготовления методом совмещения сверхпластической формовки и сварки давлением (СПФ/СД) слоистых полых конструкций из титановых сплавов [12,13]. Материал таких конструкций можно рассматривать как слоистый структурный композит [14]. В этом случае появляется возможность повышения конструкционной прочности изделия за счет усложнения траектории разрушения и применением слоев с повышенным сопротивлением росту трещины. Примерами таких конструкций могут служить полая лопатка вентилятора авиационного двигателя и сосуды высокого давления [2,12,13,15].

4. Заключение

1. Проанализировано механическое поведение при ударном нагружении образцов из титанового сплава ВТ6 с различным типом структуры. Результаты испытаний на ударный изгиб показали, что наиболее высокую ударную вязкость имеет сплав с крупнокристаллической пластинчатой и микрокристаллической структурами по сравнению с наноструктурой.

2. С уменьшением размеров структурных составляющих в титановом сплаве ВТ6 работа зарождения трещины повышается на ~55%, тогда как работа распространения понижается на ~70%.

3. Полученные результаты могут служить практической рекомендацией для изготовления методом СПФ/СД перспективных слоистых конструкций путем использования заготовок с различным типом структуры.

Литература

1. A.N. Petukhov. Engine 5, 42 (2005), (in Russian) [Петухов А.Н. Двигатель 5, 42 (2005)].
2. O.R. Valiakhmetov, R.M. Galeev, V.A. Ivan'ko, R.M. Imayev, A.A. Inozemtsev, N.L. Koksharov, A.A. Kruglov, R.Ya. Lutfullin, R.R. Mulyukov, A.A. Nazarov, R.V. Safiullin, S.A. Kharin. Nanotechnologies in Russia 5, 108 (2010).
3. G.A. Salishchev, S.V. Zharebtsov, S.P. Malysheva, A.M. Smyslov, E.V. Safin, S.P. Pavlinich, N.F. Izmailova. Titanium 2, 49 (2007), (in Russian) [Салищев Г.А., Жеребцов С.В., Малышева С.П., Смыслов А.М., Сафин Э.В., Павлинич С.П., Измайлова Н.Ф. Титан 2, 49 (2007)].
4. M. Georgiev. Impact Crack-Resisting of Metals. Sofia, Bulvest 2000 (2007) 231 p. (in Bulgarian) [М. Георгиев. Пукнатиноустойчивост на металите при ударно натоварване. София, БУЛВЕСТ 2000 (2007) 231 с].
5. B.A. Kolachev, M.G. Veitsman, L.N. Gus'kova. Metal Science and Heat Treatment 8, 54 (1983), (in Russian) [Колачев Б.А., Вейцман М.Г., Гуськова Л.Н. Металловедение и термическая обработка металлов 8, 54 (1983)].
6. S.P. Malysheva, M.A. Murzinova, S.V. Zharebtsov, G.A. Salishchev. Journal of Advanced Materials 12, 316 (2011), (in Russian) [Малышева С.П., Мурзинова М.А., Жеребцов С.В., Салищев Г.А. Перспективные материалы 12, 316 (2011)].
7. B.A. Kolachev, A.V. Mal'kov. Physical Basis of Titanium Failure. Moscow, Metallurgy (1983) 160 p. (in Russian) [Колачев Б.А., Мальков А.В. Физические основы разрушения титана. Москва, Металлургия (1983) 160 с].
8. R.Ya. Lutfullin. Letters on Materials 1(1), 59 (2011), (in Russian) [Лутфуллин Р.Я. Письма о материалах 1(1), 59 (2011)].
9. R.Ya. Lutfullin. Letters on Materials 1(2), 88 (2011), (in Russian) [Лутфуллин Р.Я. Письма о материалах 1(2), 88 (2011)].
10. G.A. Salishchev, R.M. Galeev, O.R. Valiakhmetov, R.V. Safiullin, R.Ya. Lutfullin, O.N. Senkov, F.H. Froes, O.A. Kaibyshev. Mat. Tech. & Adv. Perf. Mater. 15(2), 133 (2000).
11. V.V. Astanin. Vestnik UGATU 2, 34 (2002), (in Russian) [Астанин В.В. Вестник УГАТУ 2, 34 (2002)].
12. R.V. Safiullin. Letters on Materials 2(1), 32 (2012), (in Russian) [Сафиуллин Р.В. Письма о материалах 2(1), 32 (2012)].
13. R.V. Safiullin. Letters on Materials 2(2), 36 (2012), (in Russian) [Сафиуллин Р.В. Письма о материалах 2(2), 36 (2012)].
14. A.A. Ganeeva, A.A. Kruglov, R.Ya. Lutfullin. Journal of Advanced Materials 12, 92 (2011), (in Russian) [Ганеева А.А., Круглов А.А., Лутфуллин Р.Я. Перспективные материалы 12, 92 (2011)].
15. A.A. Ganeeva, A.A. Kruglov, R.Ya. Lutfullin. Deformation and Fracture of Materials 7, 38 (2011), (in Russian) [Ганеева А.А., Круглов А.А., Лутфуллин Р.Я. Деформация и разрушение материалов 7, 38 (2011)].