

**EFFECT OF THE UPSETTING TEMPERATURE
ON THE ULTRAFINE-GRAINED TI ALLOY VT6**

Andrey Gennadievich Stotskiy^{1,2a}, Iuliia Mikhailovna Modina^{1,2}, Danil Timurovich Miftahov²

¹ Bashkir State University, Zaki Validi str. 32, Ufa, 450076, Russia

² Ufa State Aviation Technical University, Karl Marx str. 12, Ufa, 450008, Russia

^a stockii_andrei@mail.ru

ABSTRACT

The VT6 titanium alloy is widely applied as a structural material in aircraft engine building. Using severe plastic deformation (SPD) processing, high structural and performance properties are achieved in metals and alloys due to the nano- and ultrafine-grained (UFG) structural features. The present work examines the mechanical behavior and structural transformation of the UFG VT6 titanium alloy during experimental upsetting simulating the shape forming of parts of advanced gas-turbine engines. It was found that the formation of a UFG state in the VT6 alloy by equal-channel angular pressing (ECAP) reduced grain size to 0.6 μm and increased strength to 1200 MPa while preserving satisfactory ductility up to 11%. Further deformation of the alloy in a temperature range of 650 to 750 $^{\circ}\text{C}$ with a rate of 10^{-3}s^{-1} preserved the alloy's structure in a UFG range. With increasing deformation temperature, a considerable decline in the resistance to material flow was observed, which may be associated with an increase in the intensity of recrystallization processes. The strain-rate sensitivity coefficient was calculated for upsetting at these temperatures, that showed the signs of superplasticity at these deformation regimes.

KEYWORDS

Titanium alloys; VT6; severe plastic deformation; ultrafine-grained structure; mechanical properties; strain-rate sensitivity coefficient.

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОСАДКИ
НА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ ВТ6**

*Андрей Геннадиевич Стоцкий^{1,2a}, Юлия Михайловна Модина^{1,2},
Данил Тимурович Мифтахов²*

¹ Башкирский государственный университет, Россия, 450076, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

² Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, 450008, Уфа, ул. Карла Маркса, 12

^a stockii_andrei@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Титановый сплав ВТ6 имеет широкое применение в качестве конструкционного материала в авиационном двигателестроении. Методами интенсивной пластической деформации (ИПД)

достигают высокие конструкционные и эксплуатационные свойства металлов и сплавов за счет нано- и ультрамелкозернистых (УМЗ) особенностей структуры. В данной работе рассмотрено механическое поведение и трансформация структуры УМЗ титанового сплава ВТ6 при экспериментальной осадке, имитирующей формообразование деталей перспективных газотурбинных двигателей. Установлено, что формирование УМЗ состояния в сплаве ВТ6 методом равноканального углового прессования (РКУП) позволяет уменьшить размер зерен до 0,6 мкм и повысить значение прочности до 1200 МПа при сохранении удовлетворительной пластичности до 11 %. Дальнейшая деформация сплава в интервале температур от 650 до 750 °С со скоростью 10^{-3}с^{-1} позволяет сохранить структуру сплава в УМЗ диапазоне. При увеличении температуры деформации наблюдалось существенное снижение сопротивления течению материала, что может быть связано с увеличением интенсивности рекристаллизационных процессов. Был рассчитан коэффициент скоростной чувствительности осадки при данных температурах, который указывает на признаки сверхпластичности при данных режимах деформации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Титановые сплавы; ВТ6; интенсивная пластическая деформация; ультрамелкозернистая структура; механические свойства; коэффициент скоростной чувствительности.

Введение

Титановый двухфазный ($\alpha + \beta$) сплав ВТ6 нашел широкое применение в авиации, в том числе, в изготовлении дисков и лопаток газотурбинного двигателя (ГТД), которые подвержены высоким статическим и динамическим нагрузкам, эрозии, коррозии и износу [1–6]. Формирование ультрамелкозернистого (УМЗ) состояния методами интенсивной пластической деформацией (ИПД) в титановом сплаве ВТ6 позволяет повысить его конструкционную прочность и эксплуатационные характеристики [7–11], что является актуальным для деталей перспективных ГТД.

Как правило, создание готового изделия подразумевает несколько технологических операций, в том числе объемную штамповку при относительно высоких температурах [12–14]. Однако достигаемые свойства УМЗ материалов являются структурно-чувствительными и, соответственно, процесс формообразования деталей может приводить к их деградации, поэтому целью настоящей работы является определение температурно-деформационных условий для УМЗ сплава ВТ6.

1. Методика исследований

В работе использовался горячекатаный титановый сплав ВТ6 диаметром 20 мм. Заготовки были подвергнуты предварительной термической обработке (ТО) по режиму: закалка при $T = 960$ °С в течение 1 ч в воду, старение при $T = 675$ °С в течение 4 ч с охлаждением на воздухе. Равноканальное угловое прессование заготовок после ТО проводили по режиму: 4 прохода по режиму Вс при $T = 700$ °С с углом пересечения каналов 120°. Осадку цилиндрических образцов с размерами 6×7 мм со скоростью 10^{-3}с^{-1} проводили в интервале температур от 650 до 750 °С. Микроструктуру образцов исследовали на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM 6390 при ускоряющем напряжении 20 кэВ. Механические испытания на растяжение образцов диаметром 3 мм и расчетной длиной 15 мм были проведены при комнатной температуре со скоростью 10^{-3}с^{-1} на универсальной испытательной машине Instron 5982. Расчет коэффициента скоростной чувствительности производился по формуле: $m = \partial \log(\sigma) / \partial \log(\dot{\xi})$.

2. Результаты и их обсуждение

Сплав ВТ6 после ТО представляет собой крупнозернистую глобулярно-пластинчатую структуру (рис. 1, а). Микроструктура представлена в виде первичных α -глобулей со средним размером около 4 мкм и их объемной долей ~50 % и пластинчатой составляющей сплава, представляющей собой чередующие пластины альфа и бета фазы.

После РКУП деформации пластинчатая составляющая была подвергнута процессам фрагментации и глобуляризации, что показано в виде образования большей части пластинчатой $\alpha + \beta$ составляющей в мелкие частицы со средним размером около 0,4 мкм. Первичная альфа фаза сильно вытягивается,

либо теряет свою целостность. Как показывает микроструктурный анализ, наблюдается металлографическая текстура, что вполне свойственно материалу после деформации методом РКУП [15, 16].

Сравнение механических свойств в исходном состоянии и после РКУП показывает повышение прочностных свойств по пределу прочности с 950 до 1250 МПа и текучести с 900 до 1210 МПа, что соответствует увеличению значений прочности на 30%. Значения пластичности снижаются с 12 до 5%. Сохранение повышенной прочности и увеличение пластичности можно ожидать при последующих деформационно-термических операциях, таких как штамповка, за счет эволюции микроструктуры в УМЗ диапазоне (рис. 2).

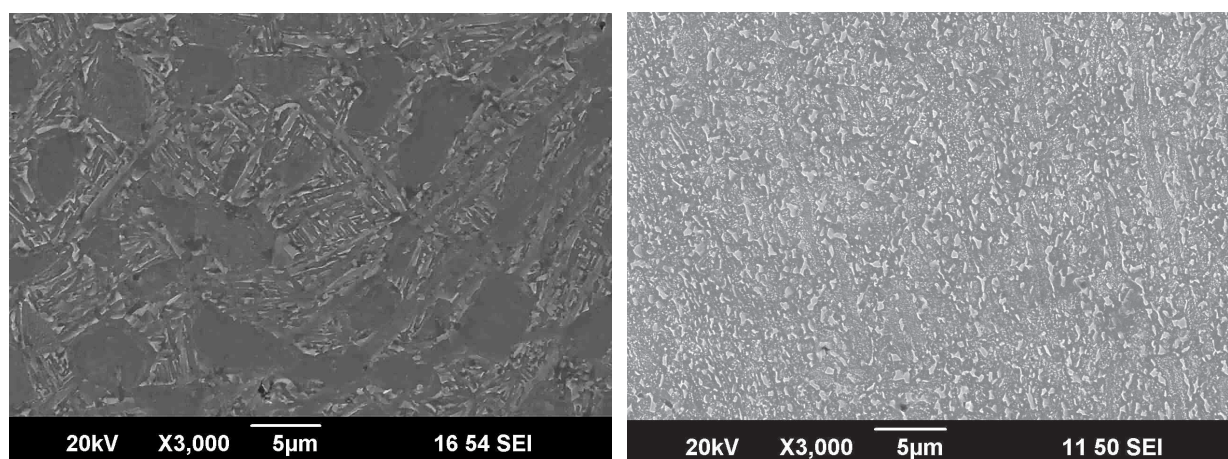


Рис. 1. Микроструктура титанового сплава ВТ6 в крупнозернистом (КЗ) и УМЗ состоянии после ТО и РКУП, соответственно

Fig. 1. Microstructure of titanium alloy VT6 in the coarse-grained (CG) state, after HT and after ECAP, respectively

Таблица 1. Механические свойства титанового сплава ВТ6

Table 1. Mechanical properties of titanium alloy VT6

Состояние / State	σ_B , МПа / σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа / $\sigma_{0,2}$, МПа	δ , % / δ , %
КЗ / CG	950 ± 20	900 ± 20	12,0 ± 1,2
УМЗ / UFG	1250 ± 15	1210 ± 20	5,0 ± 1,0

На рис. 2 представлена микроструктура УМЗ титанового сплава ВТ6 после осадки. При повышении температуры осадки наблюдалось увеличение размера β -частиц – 0,5 мкм при 650 °С, 0,6 мкм при 700 °С, 0,8 мкм при 750 °С (рис. 3), что связано с активным развитием процессов возврата и рекристаллизации во время деформации. Так более высокие температуры деформации приводят к образованию более равноосных частиц: если при 650 °С наблюдаются мелкие искривленные частицы вследствие больших деформаций при осадке, то при 700 и 750 °С происходят более активные процессы

рекристаллизации и диффузии, приводящие к образованию частиц крупных частиц глобулярной формы.

Оценка деформационной способности сплава ВТ6 при осадке показала значительное снижение напряжения течения с повышением температуры процесса сжатия образцов: 200 МПа при 650 °С, 120 МПа при 700 °С и 70 МПа при 750 °С. Данное уменьшение напряжения течения приводит к повышению коэффициента скоростной чувствительности (рис. 3), что положительно сказывается на деформационной способности материала.

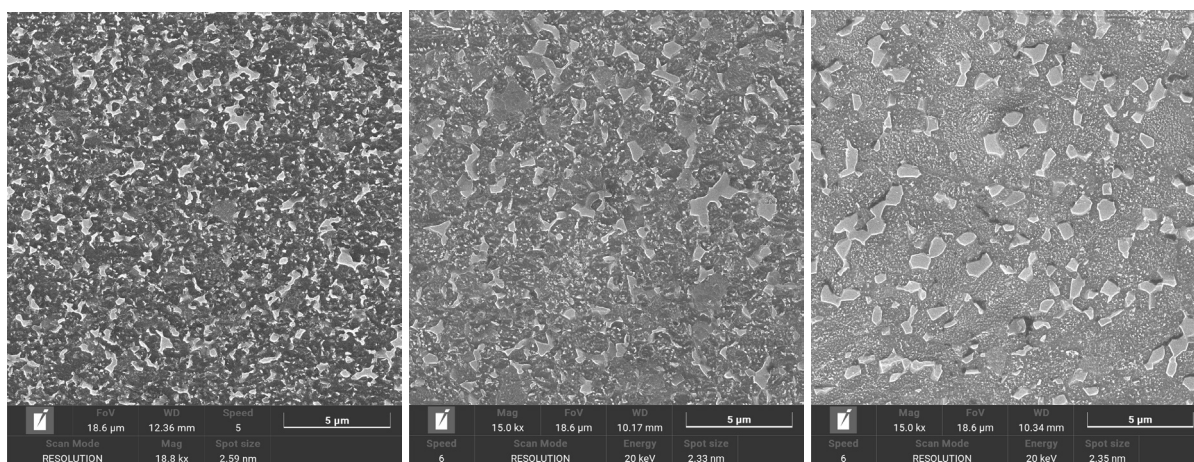


Рис. 2. Микроструктура УМЗ титанового сплава ВТ6 после осадки при температурах 650, 700, 750 °С соответственно

Fig. 2. Microstructure of UFG titanium alloy VT6 after upsetting at temperatures of 650, 700, 750 °С respectively

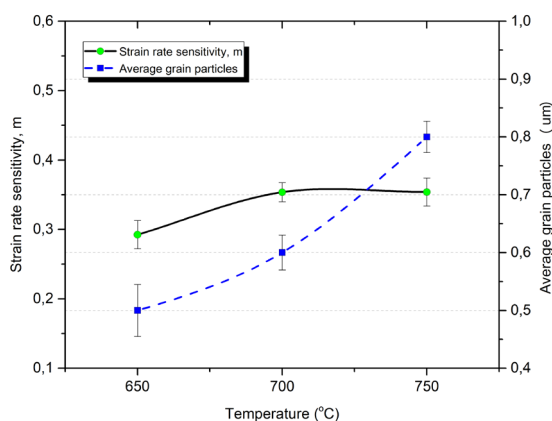


Рис. 3. Изменение размера частиц β -фазы и коэффициента скоростной чувствительности УМЗ сплава ВТ6 после осадки при температурах 650, 700, 750 °С соответственно

Fig. 3. Changes in the β -phase particle size and the strain rate sensitivity of the UFG alloy VT6 after upsetting at temperatures of 650, 700, 750 °С, respectively

Считается, что сверхпластичность в металлах проявляется при значениях $\geq 0,3$ [17–20]. Так расчет коэффициента m при 650 °С показывает значение 0,29, а при 700 и 750 °С $\sim 0,35$. В результате осадки при температурах 650–750 °С оценка деформационной способности по коэффициенту m и напряжению течения, также эволюция микроструктуры с температурой показывает, что при температуре 700 °С достигается более высокая деформационная способность с проявлением признаков сверхпластичности и сохранением более мелких структурных составляющих. Сохранение структуры в УМЗ диапазоне и повышенная деформационная способность при температурах, которые значительно ниже, чем температура стандартной штамповки титановых сплавов, позволяют достигать повышенных механических свойств, что непосредственно будет приводить к повышению эксплуатационных свойств.

Выводы

1. Показано, что РКУП деформация в сплаве ВТ6 приводит к образованию ультрамелкозернистой структуры со средним размером вторичных альфа и бета фаз 0,4 мкм. В результате чего обеспечивается повышение предела прочности сплава с 950 МПа в КЗ состоянии до 1250 МПа после РКУП деформации.

2. Результаты осадки при температурах 650–750 °С показывают, что в сплаве ВТ6 начинают активно протекать процессы диффузии и рекристаллизации, что наблюдается в эволюции частиц бета-фазы в виде их роста и глобуляризации.

3. Сплав ВТ6 проявляет повышенную деформационную способность при температурах 650–750 °С. Снижение напряжения течения с повышением температуры осадки с 200 до 70 МПа и повышение коэффициента скоростной чувствительности с 0,29 до 0,35 указывают на проявление эффекта сверхпластичности.

Благодарности / Acknowledgments

Исследование выполнено за счет средств гранта в области науки из бюджета Республики Башкортостан для государственной поддержки молодых ученых (НОЦ-ГМУ-2021). Исследовательская часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО «УГАТУ».

The work was funded by a grant in the area of science from the budget of the Republic of Bashkortostan for the state support of young scientists (НОЦ-ГМУ-2021). The research part of the work was conducted using the equipment of the “Nanotech” Shared Use Center, USATU.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leyens C., Peters M. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2003. P. 513.
2. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД / О. С. Кашапов [и др.] // Труды ВИАМ. 2013. № 3. С. 2.
3. Павлова Т. В., Кашапов О. С., Ночовная Н. А. Титановые сплавы для газотурбинных двигателей // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 5. С. 8–14.
4. Иноземцев А. А., Башкатов И. Г., Коряковцев А. С. Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель» // Современные титановые сплавы и проблемы их развития: сборник. М.: ВИАМ, 2010. С. 43–46.
5. Жаропрочные титановые сплавы / В. Г. Анташев [и др.] // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 3ю С. 1–7.
6. Veiga C., Davim J. P., Loureiro A. J. R. Properties and applications of titanium alloys: A brief review // Rev. Adv. Mater. Sci. 2012. V. 32, No. 2. P. 133–148.
7. Valiev R. Z. Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties // Nature Materials. 2004. V. 3. P. 511–516. DOI: 10.1038/nmat1180.
8. Meyers M. A., Mishra A., Benson D. J. Mechanical properties of nanocrystalline materials // Prog Mater Sci. 2006. V. 51, Iss. 4. P. 427–556. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2005.08.003.
9. Strength and Fatigue Life at 625 K of the Ultrafine-Grained Ti-6Al-4V Alloy Produced by Equal Channel Angular Pressing / I. P. Semenova et al. // Metals. 2022. V. 12, Iss. 8. Article number 1345. DOI: 10.3390/met12081345.

10. Fatigue Life and Failure Characteristics of an Ultrafine-Grained Ti-6Al-4V Alloy Processed by ECAP and Extrusion / A. V. Polyakov et al. // *AEM*. 2014. V. 16, Iss. 8. P. 1038–1043. DOI: 10.1002/adem.201300530.
11. Mechanical properties of ultrafine grained two-phase titanium alloy produced by “abc” deformation / S. V. Zherebtsov et al. // *Mater. Sci. Forum*. 2012. V. 706–709. P. 1859–1863. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.706-709.1859.
12. Ermachenko A. G., Lutfullin R. Ya., Mulyukov R. R. Advanced Technologies of Processing Titanium Alloys and Their Applications in Industry // *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2011. V. 29. P. 68–82.
13. Moiseyev V. N. Titanium alloys in Russia: Russian Aircraft and Aerospace Applications. Boca Raton: CRC Press, 2005. P. 216. DOI: 10.1201/9781420037678.
14. Илларионов А. Г., Попов А. А. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов. Екатеринбург: Урал, 2014. 137 с.
15. Beyerlein I., Tyth L. Texture evolution in equal-channel angular extrusion // *Progress in Materials Science*. 2009. V. 54, Iss. 4. P. 427–510. DOI: 10.1016/J.PMATSCI.2009.01.001.
16. Semiatina S. L., Delo D. P. Equal channel angular extrusion of difficult-to-work alloys // *Materials and Design*. 2000. V. 21, Iss. 4. P. 311–322. DOI: 10.1016/S0261-3069(99)00085-0.
17. Superplastic-like behavior and enhanced strength of a two-phase titanium alloy with ultrafine grains / G. S. Dyakonov et al. // *Adv. Eng. Mat.* 2022. V. 24 (8). Article number 2101592. DOI: 10.1002/adem.202101592.
18. Кайбышев О. А. Сверхпластичность промышленных сплавов. М.: Металлургия, 1984. 264 с.
19. Enhanced superplasticity in a Ti-6Al-4V alloy processed by severe plastic deformation / A. V. Sergueeva et al. // *Scripta mater*. 2000. V. 43, Iss. 9. P. 819–824. DOI: 10.1016/S1359-6462(00)00496-6.
20. Enhanced superplastic deformation behavior of ultrafine-grained Ti-6Al-4V alloy / L. Saitova et al. // *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 2008. V. 39, Iss. 4–5. P. 367–370. DOI: 10.1002/mawe.200800308.