

Низкотемпературная сверхпластичность и изготовление полых конструкций из титанового сплава ВТ6

Р. Я. Лутфуллин[†], А. А. Круглов, М. Х. Мухаметрахимов, О. А. Руденко

[†]lutram@anrb.ru

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина 39, Уфа, 450001, Россия

Использование традиционной сверхпластичности позволяет изготавливать уникальные полые конструкции. Одним из самых ярких примеров служит изготовление фирмой Роллс-Ройс полый вентиляторной лопатки из титанового сплава Ti-6Al-4V для авиационного двигателя. Однако высокая температура сверхпластической формовки (~927°C) ограничивает широкое промышленное применение сверхпластичности титановых сплавов. Объектом исследования были ультрамелкозернистые листы со средним размером зерен 0,2 мкм из отечественного титанового сплава ВТ6 (аналог зарубежного сплава Ti-6Al-4V) со стандартным химическим составом, соответствующим ГОСТ 19807—91. На основе результатов механических испытаний на растяжение и примеров изготовления сверхпластической формовкой при температурах 550, 600, 650, 700, 750 и 800°C модельных образцов полых конструкций из ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6 показаны технологические преимущества использования эффекта низкотемпературной сверхпластичности, которые востребованы производством для совершенствования промышленных технологий на основе сверхпластичности. Низкотемпературная сверхпластичность обеспечивает повышенное качество полых изделий, в частности, при изготовлении моделей полых лопатки из сплава ВТ6 и открывает перспективу создания экономически эффективных промышленных технологий изготовления полых конструкций методом сверхпластической формовки из ультрамелкозернистых титановых сплавов типа ВТ6 (аналоги сплава Ti-6Al-4V).

Ключевые слова: низкотемпературная сверхпластичность, ультрамелкозернистая структура, титановый сплав, сверхпластическая формовка, модели полых изделий, механические свойства

Low temperature superplasticity and production of hollow structures out of VT6 titanium alloy

R. Ya. Lutfullin, A. A. Kruglov, M. Kh. Mukhametrakhimov, O. A. Rudenko

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

Application of the conventional superplasticity allows producing the unique hollow structures. One remarkable example is the hollow titanium blade of the air engine fan produced by Rolls-Royce. However, high temperature of Ti-6Al-4V titanium alloy processing (~ 927°C) limits wide industrial application of the conventional superplasticity. On the base of experimental data examples of superplastic forming of hollow structures for aerospace application out of ultrafine-grained VT6 (Ti-6Al-4V) titanium alloy by using an effect of low temperature superplasticity are demonstrated. We used two-phase VT6 titanium alloy produced in VSMPO-AVISMA Corporation, Verkhnyaya Salda, Russia. Investigated VT6 alloy had standard chemical composition according GOST 19807—91. The ultrafine-grained sheets with a mean grain size of about 0,2 μm were processed by multiple step forging and subsequent isothermal rolling. Superplastic forming of ultrafine-grained sheets was performed at temperatures of 550, 600, 650, 700, 750 and 800°C. Trials on superplastic forming within the temperature range of 550—800°C were performed by an original technique using special model parts. Investigated sheets showed good processing properties. The use of the low temperature superplasticity provides high quality of hollow components such as blades. Application of low superplasticity temperature can be a basis for creation of economically efficient superplastic forming technologies for producing hollow structures out of ultrafine-grained titanium Ti-6Al-4V system alloys.

Keywords: low temperature superplasticity, ultrafine grained and nanostructure, titanium alloy, superplastic forming, hollow structures, mechanical properties

Введение

Одним из самых ярких и выдающихся на сегодняшний день результатов промышленного внедрения сверхпластичности (СП) в технологию, бесспорно, является изготовление фирмой Роллс-Ройс методом сверхпластической формовки (СПФ) полых широкохордной лопатки вентилятора для гражданских авиационных двигателей [1,2]. Метод СПФ позволяет получить легкую и, одновременно, жесткую полую конструкцию сложной конфигурации из сверхпластичного титанового сплава типа Ti-6Al-4V, который является близким аналогом российского сплава ВТ6. Несмотря на то, что указанная технология доведена фирмой Роллс-Ройс до высокой степени совершенства и позволяет серийно изготавливать метровой длины высокоресурсные полые лопатки вентилятора для широкой номенклатуры гражданских авиадвигателей, тем не менее, сохраняется серьезная экономическая проблема связанная с высокой себестоимостью изготовления указанной продукции из-за высокой трудоемкости, усугубляемая низкой стойкостью дорогостоящей штамповой оснастки при температуре $T=927^{\circ}\text{C}$ [2]. Проблема низкой рентабельности технологического процесса изготовления полых титановых конструкций методом СПФ на основе традиционной СП при температурах в интервале $T=900\text{—}950^{\circ}\text{C}$ универсальна, и она в силу экономического фактора сдерживает изготовление значительной номенклатуры полых изделий авиационного назначения [3]. По мнению ряда исследователей, одним из кардинальных путей при создании экономически привлекательных технологий СПФ может быть снижение температуры СП обрабатываемого сплава. Так, согласно авторам [3—5] снижение температуры СП до $T=760^{\circ}\text{C}$ — может сделать технологический процесс СПФ титановых сплавов экономически эффективным.

Цель настоящей работы — показать возможность совершенствования процесса СПФ полых конструкций из титанового сплава ВТ6 за счет низкотемпературной СП.

Материал и методика исследования

В качестве объекта исследования был выбран широко распространенный и изученный промышленный двухфазный титановый сплав ВТ6 (производства г.Верхняя Салда) в виде прутка диаметром 70 мм и листа толщиной 0,8 мм стандартного по ГОСТ 19807—91 химического состава, являющийся аналогом зарубежного сплава Ti-6Al-4V. Ультрамелкозернистая (УМЗ) структура со средним размером зерен $d=0,2\text{ мкм}$ в листовых заготовках сплава ВТ6 была получена в результате предварительной закалки мерных заготовок из горячекатаного прутка диаметром 70 мм с температуры $T=1000^{\circ}\text{C}$ путем охлаждения в холодной воде и последующей всесторонней изотермической ковки начиная с температуры $T=750^{\circ}\text{C}$ со снижением температуры на последующих этапах ковки до $T=650^{\circ}\text{C}$ по методике, подробно изложенной в [6,7]. Заключительной стадией после всесторонней ковки была осадка полуфабриката до толщины 15 мм, который после фрезерования для придания плоскопараллельной формы

прокатывали на опытном стане ЛИС-6/200 в изотермических условиях при температуре $T=550^{\circ}\text{C}$ для получения листов толщиной 0,8—0,9 мм. Рабочие валки стана нагревали до температуры $T=550^{\circ}\text{C}$. Скорость деформации варьировали в пределах $\dot{\epsilon}=10^{-2}\text{—}10^{-3}\text{ с}^{-1}$ [8].

Из полученных листовых заготовок в вакуумной печи ОКБ80—86 при различных температурах от $T=550^{\circ}\text{C}$ и до $T=750^{\circ}\text{C}$ методом СПФ изготовили ряд полых модельных конструкций: полусферы радиусом 35 мм, цилиндрические оболочки диаметром 70 мм, а также плоские образцы полых лопаток [9—12].

Механические испытания на растяжение проводили с использованием плоских образцов на испытательной машине «INSTRON» при комнатной температуре и в интервале температур $550\text{—}750^{\circ}\text{C}$. Диапазон скоростей деформации при повышенных температурах $\dot{\epsilon}=10^{-5}\text{—}10^{-3}\text{ с}^{-1}$. Структурные исследования осуществляли на растровом (РЭМ) и просвечивающем (ПЭМ) электронных микроскопах JEM — 840 и JEM — 2000EX соответственно.

Результаты и их обсуждение

Для титановых сплавов типа ВТ6 характерно снижение температуры СП с уменьшением размера зерен до нано и субмикронных величин [7,8]. Минимальная температура, при которой исследователи наблюдали характерные признаки СП составляет $T=550^{\circ}\text{C}$ [8].

Как показали результаты механических испытаний на растяжение (табл.1, рис.1), начиная с температуры $T=600^{\circ}\text{C}$ исследуемый сплав ВТ6 со средним размером зерен $d=0,2\text{ мкм}$ имеет удлинение более $\delta=600\%$ фактически без образования шейки, что существенно превышает значение необходимой технологической деформации при изготовлении методом СПФ большинства изделий, например, полых лопаток за один переход [10]. Из результатов механических испытаний на растяжение следует очень важный для практики вывод о наличии высокого потенциала технологической пластичности у исследуемого сплава ВТ6 в условиях низкотемпературной СП, который может быть успешно реализован в технологии изготовления полых изделий сложной конфигурации методом СПФ при пониженных температурах начиная с $T=600^{\circ}\text{C}$. Важным вопросом при разработке процесса формообразо-

Таблица 1. Результаты испытания листов УМЗ сплава ВТ6 при повышенных температурах

Table 1. Tension test results of UFG alloy VT6 sheets at investigated temperatures

Test temperature, $^{\circ}\text{C}$	Initial strain rate, s^{-1}	Flow stress (5%), MPa	Elongation, %
600	5×10^{-4}	200	620 (without failure)
650	7×10^{-4}	52	650 (without failure)
700	7×10^{-4}	45	900
750	7×10^{-4}	27	1000
775	1×10^{-3}	17	900

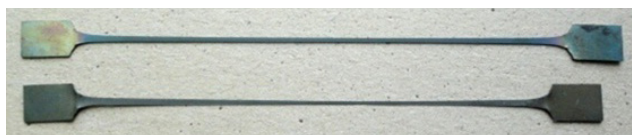


Рис. 1. Образцы после растяжения при $T=600^{\circ}\text{C}$ (нижний) и при $T=650^{\circ}\text{C}$ (верхний) с начальной скоростью деформации $\dot{\epsilon}=10^{-4}\text{c}^{-1}$.
Fig. 1. Samples after tension tests at $T=600^{\circ}\text{C}$ (lower) and at $T=650^{\circ}\text{C}$ (upper) with initial strain rate $\dot{\epsilon}=10^{-4}\text{ s}^{-1}$.

вания является необходимость сохранения исходного качества материала в изготовленном изделии. Например, в процессе как традиционной, так и низкотемпературной сверхпластической деформации растяжением многие исследователи наблюдали активное порообразование в алюминиевых сплавах [13]. Указанное обстоятельство определяет необходимость использования усложненных технологических схем с применением противодействия для подавления порообразования в алюминиевых сплавах в процессе СПФ. Проведенные в настоящей работе, а также в [14], электронно-микроскопические исследования образцов после растяжения до степени деформации порядка $\delta=600\%$ (рис.2) и «цилиндрических оболочек» после СПФ при температуре $T=600^{\circ}\text{C}$ не позволили выявить даже единичных пор в сплаве ВТ6. Этот результат представляется важным для промышленного использования метода СПФ при изготовлении полых конструкций из УМЗ титановых листов.

На рис.3 представлены образцы полых изделий различной конфигурации из титанового сплава ВТ6 изготовленные в условиях низкотемпературной СП при температурах $T=600^{\circ}\text{C}$; 650°C и 750°C . Особо следует обратить внимание на технологическую возможность получения уже при температуре $T=600^{\circ}\text{C}$ малых радиусов закругления в пределах $r=0,6\text{ мм}$ в угловых зонах цилиндрической оболочки, свидетельствующее о высокой технологичности метода СПФ при пониженных температурах для изготовления точных заготовок полых деталей.

Отличительной особенностью низкотемпературной СП сплава ВТ6 является повышенный уровень значений напряжения течения при сравнении с традиционной СП, например, при $T=900^{\circ}\text{C}$ [7]. Особенно заметно повышение напряжения течения, проявляемое при испытаниях

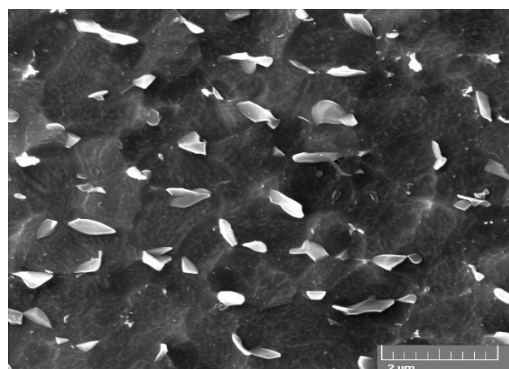
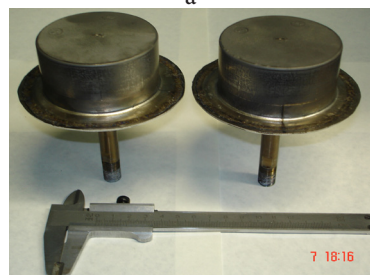


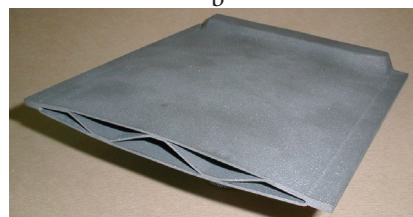
Рис. 2. Микроструктура центральной части образца сплава ВТ6 после растяжения при $T=600^{\circ}\text{C}$.
Fig. 2. Microstructure of the central part of the flat VT6 alloy sample after tension test at $T=600^{\circ}\text{C}$.



a



b



c

Рис. 3. Образцы моделей изделий: (a) «полусфера», (b) «цилиндрическая оболочка», (c) «полая лопатка» [15], изготовленные СПФ при: (a) $T=600^{\circ}\text{C}$, (b) $T=600$ и 650°C , (c) $T=750^{\circ}\text{C}$.

Fig. 3. Hollow parts: (a) “hemisphere”, (b) “cylindrical shell”, (c) “hollow blade” [15], produced by SPF at temperatures: (a) $T=600^{\circ}\text{C}$, (b) $T=600$ and 650°C , (c) $T=750^{\circ}\text{C}$.

при температуре $T=600^{\circ}\text{C}$ (табл.1).

Повышенные напряжения течения могут увеличить длительность цикла формообразования изделия. В этой связи в интервале температур проявления низкотемпературной СП были проведены эксперименты по изготовлению СПФ при постоянном давлении из УМЗ листов сплава ВТ6 модельных образцов полусфер.

Анализ результатов экспериментов (рис.4) показал, что практический интерес с точки зрения производительности СПФ при условии использования современного технологического оборудования для газовой формов-

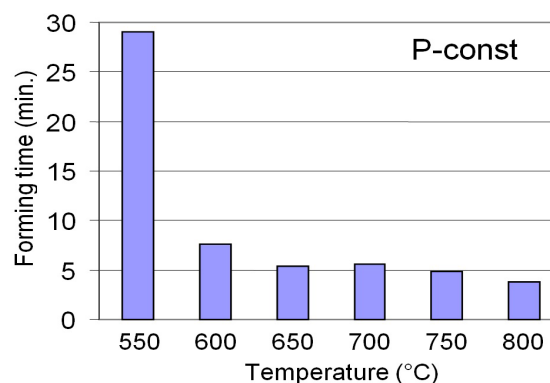


Рис. 4. Длительность СПФ полусфер в температурном интервале низкотемпературной СП сплава ВТ6.
Fig. 4. Time-temperature dependence of hemisphere superplastic forming out of UFG sheets of VT6 alloy.

Таблица 2. Механические свойства полуфабрикатов из сплава ВТ6 при комнатной температуре

Table 2. Mechanical properties of the material of hollow blades out of VT6 alloy at room temperature

Initial sample type (longitudinal)	Mechanical properties		
	σ_b , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %
Initial UFG sheet	1320	1250	8
Wall of a hollow blade (processing at T=750°C)	1017	1003	15
Initial commercial sheet (fine-grained)	1124	1030	12
Wall of hollow blade (processing at T=900°C)	884	849	10

ки [15], может представлять процесс формообразования начиная с температуры T=650°C и выше.

Между тем известно, что после СПФ на поверхности изделий образуется деформационный рельеф, который может существенно снижать усталостную прочность материала в условиях знакопеременных нагрузок [16]. При изготовлении полых изделий с замкнутыми полостями механически устранить шероховатость внутренних поверхностей после СПФ не удастся из-за трудоемкости или невозможности их обработки. Примером таких конструкций является титановая лопатка вентилятора авиационного двигателя [17]. Появление на поверхности деформационного рельефа обычно связывают с развитием зернограницного проскальзывания (ЗГП) — основного механизма сверхпластической деформации. Как показали исследования в работе [16] при низкотемпературной СПФ шероховатость поверхности можно существенно снизить по показателям Ra или Rz. Например, при снижении температуры СПФ с T=900°C до T=700°C параметр шероховатости Ra возможно уменьшить с 1,3 мкм до 0,6 мкм, то есть более, чем в 2 раза.

Определяющим же обстоятельством использования СП в технологии, наряду с формообразованием, является необходимость обеспечения высоких механических свойств материала самого изделия. Известно [18], что традиционная СП незначительно снижает прочностные свойства исходного материала, устраняя при этом анизотропию механических свойств. Данные, имеющиеся в научно-технической литературе по влиянию низкотемпературной СП на механические свойства титановых сплавов, к сожалению, весьма ограничены. В таблице 2 приведены сравнительные механические свойства сплава ВТ6 в модельных образцах полых лопатки. Материал полых лопатки, изготовленной в условиях низкотемпературной СП, обладает повышенным комплексом механических свойств, который не достигается в аналогичных полых лопатках из сплава ВТ6, изготовленных по режимам традиционной СП при T=900°C.

Заключение

Использование низкотемпературной СП открывает перспективу создания экономически эффективных

промышленных технологий изготовления полых конструкций методом СПФ из УМЗ титановых сплавов типа ВТ6.

Литература / References

1. European Patent No 0568201, 1993.
2. M.W. Turner, I.J. Andrew. In: Book of Papers. 4th European Conference on Superplastic Forming. By IOM Communications Ltd. U. K. 39—46 (2005).
3. P.N. Comley. Materials Science Forum. Trans Tech Publications. **447—448**, 233 (2004).
4. A. Wisbey, B. Geary, D.P. Davies and C.M. Ward — Close. Materials Science Forum. Trans Tech Publications. **170—172**, 293—298 (1994).
5. L.D. Hefti. Journal of Materials Engineering and Performance. **17**, 178—182 (2008).
6. Patent of Russian Federation No 2134308, 1999. (in Russian) [Патент РФ № 2134308, 1999].
7. G. A. Salischev, R. M. Galeev, O. R. Valiakhmetov. Journal of Materials Processing Technology. **116**, 265—269 (2001).
8. V.V. Astanin. Vestnik UGATU. **2**, 34—37 (2002). (in Russian) [В.В. Астанин. Вестник УГАТУ. **2**, 34—37 (2002)].
9. A. A. Kruglov, R. Ya. Lutfullin, M. Kh. Mukhametrakhimov. Journal of Advanced Materials. **6**, 79—81 (2005) (in Russian) [А.А. Круглов, Р.Я. Лутфуллин, М.Х. Мухаметрахимов. Перспективные материалы. **6**, 79—81 (2005)].
10. E. N. Petrov, V. V. Rodionov, E. N. Kuzmin, R. Ya. Lutfullin, R. V. Safiullin. Cellular Structures. Snezhinsk, RFNC—VNIITF (2008) 176 p. (in Russian) [Е.Н. Петров, В.В. Родионов, Э.Н. Кузьмин, Р.Я. Лутфуллин, Р.В. Сафиуллин. Ячеистые конструкции. Снежинск, РФЯЦ-ВНИИТФ (2008) 176 с.]
11. A. A. Kruglov, R. Ya. Lutfullin. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. **1**, 69—72 (2009) (in Russian) [А.А. Круглов, Р.Я. Лутфуллин. Проблемы машиностроения и надежности машин. **1**, 69—72 (2009).]
12. R. Ya. Lutfullin, A. A. Kruglov, R. V. Safiullin. Materials Science and Engineering: A. **503**, 52—59 (2009).
13. M. Kawasaki, R. B. Figueiredo, T. G. Langdon. Letters on Materials. **4** (2), 78—83 (2014).
14. R. Ya. Lutfullin, M. Kh. Mukhametrakhimov, A. A. Kruglov. Letters on Materials. **3** (4), 292—295 (2013). (in Russian) [Р.Я. Лутфуллин, М.Х. Мухаметрахимов, А.А. Круглов. Письма о материалах. **3** (4), 292—295 (2013).]
15. O. A. Rudenko, A. A. Kruglov, R. V. Safiullin. Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo. **4**, 5 (2006) (in Russian) [О.А. Руденко, А.А. Круглов, Р.В. Сафиуллин. КШП. **4**, 5—10 (2006).]
16. O. A. Kaibyshev, R. V. Safiullin, R. Ya. Lutfullin. Materials Science and Technology. **22** (3), 343—348 (2006).
17. O. R. Valiakhmetov, R. M. Galeev, V. A. Ivan'ko. Nanotechnologies in Russia. **5**, 108—111 (2010).
18. O. A. Kaibyshev. Superplasticity of Commercial Alloys. M. Metallurgija. (1984) 264 p. (in Russian) [О.А. Кайбышев. Сверхпластичность промышленных сплавов. М. Металлургия. (1984) 264 с.]