

К вопросу о порообразовании в титановом сплаве ВТ6 при деформации в условиях низкотемпературной сверхпластичности

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

[†]lutram@anrb.ru

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

On the formation of pores in VT6 titanium alloy under low temperature superplasticity deformation

R.Ya. Lutfullin, M.Kh. Mukhametrakhimov, A.A. Ktuglov

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

Проведены эксперименты по одноосному растяжению и сверхпластической формовке листовых заготовок из ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6 с исходным средним размером зерна 0,2 мкм в температурно-скоростных условиях низкотемпературной сверхпластичности при температурах 600 и 650°C. На установившейся стадии сверхпластической деформации вплоть до 600% на растяжение пор в образцах сплава ВТ6 не обнаружено. Отмечен интенсивный рост зерен α и β -фаз, стимулированный сверхпластической деформацией.

Ключевые слова: Низкотемпературная сверхпластичность, поры, сверхпластическая формовка, титановый сплав ВТ6.

Uniaxial tension and superplastic forming experiments are performed with ultra fine grained titanium VT6 alloy under conditions of low temperature superplasticity at temperatures 600 and 650°C. The initial mean grain size in ultra fine grained titanium VT6 alloy was 0,2 μm . Pores were not display at the steady superplastic state up to 600% of sample extension. It is revealed accelerated α and β -phase grain growth stimulated by superplastic deformation.

Keywords: low temperature superplasticity; pores; superplastic forming; titanium VT6 alloy.

1. Введение

Порообразованию при сверхпластичности посвящено множество научных работ [1-12]. При испытаниях на растяжении в процессе сверхпластической деформации обнаружено возникновение пористости в сплавах на основе меди [1], железа [2], алюминия [3-5, 8-11], магния [6] и цинка [7]. Порообразование при сверхпластической формовке заготовок из алюминиевых сплавов широко известное явление [3-5, 8-11]. Подавление образования пор в процессе сверхпластической формовки (СПФ) возможно наложением гидростатического давления [5, 8-10], которое осуществляется при технологических схемах формообразования с специально организованным противодавлением, эффективно предупреждающим как образование, так и развитие пор. Между тем, весьма примечательно, что в двухфазных титановых сплавах после сверхпластического растяжения при температурах 850 – 950°C пор обнаружено не было [6, 8-9]. Отсутствие пор представляется одной из причин рекордных показателей сверхпластичности двухфазных титановых сплавов при растяжении [8-9]. В связи с открытием эффекта низкотемпературной сверхпластичности в ультрамелкозернистых и нанокристаллических матери-

алах [10, 12-15] тема порообразования сохраняет свою актуальность, что определяется востребованностью практического использования перспективных технологий, в частности, в авиационном машиностроении [16]. Следует заметить, что в научно-технической литературе крайне недостаточно представлены экспериментальные данные о порообразовании в металлических материалах при деформации в условиях низкотемпературной сверхпластичности [10, 12].

Целью настоящей работы является проверка фактов появления и развития или же отсутствия пор в двухфазном титановом сплаве ВТ6 при сверхпластическом одноосном и двуосном растяжении в условиях низкотемпературной сверхпластичности при температурах 600 и 650°C.

2. Материал и методика исследования

В качестве материала был выбран широко используемый в авиакосмическом машиностроении двухфазный титановый сплав ВТ6 (производство ОАО «Корпорации ВСМПО – АВИСМА» г. В. Салда) стандартного химического состава, соответствующего ГОСТ 19807-91. Дан-



Рис. 1. Цилиндрические оболочки диаметром 70 мм и высотой 35 мм из сплава ВТ6, изготовленные сверхпластической формовкой при 600°C (справа) и 650°C (слева).

ный сплав является аналогом не менее популярного за рубежом сплава Ti-6Al-4V. Заготовки после всесторонней изотермической АВС-ковки для получения ультрамелкозернистой структуры [14,16] раскатывали на специализированном стане для изотермической прокатки ЛИС-6/200. Рабочие валки нагревали до температуры 550°C. Скорость деформации варьировалась в пределах 10^{-2} - 10^{-3} с $^{-1}$. Исходную заготовку раскатывали до листа толщиной 0,8 мм. Из полученных листовых заготовок в вакуумной печи ОКБ80-86 при температурах 600°C и 650°C методом СПФ по схеме двусосного растяжения изготовили полые цилиндрические оболочки диаметром 70 мм и высотой 35 мм (рис.1). Механические испытания на растяжение проводили при начальной скорости деформации 4×10^{-3} с $^{-1}$ на плоских образцах с шириной рабочей части 3 мм и длиной рабочей базы 20 мм с использованием испытательной машины INSTRON-1185 при температурах 600 и 650°C.

Структурные исследования осуществляли на растровом (РЭМ) и просвечивающем (ПЭМ) электронных микроскопах JEM – 840 и JEM – 2000EX соответственно. На растровом микроскопе поверхность деформированных образцов изучали после тонкой шлифовки и механической полировки.

3. Результаты и их обсуждение

Рассмотрим экспериментальные результаты, полученные при растяжении при температурах 600 и 650°C плоских образцов сплава ВТ6 с исходным средним размером зерен 0,2 мкм. Исходные образцы были растянуты

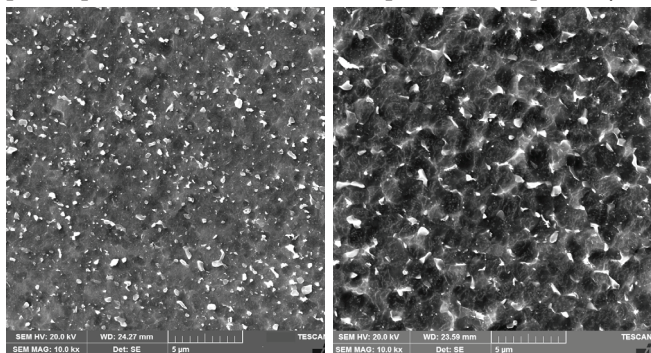


Рис.3. Микроструктура растянутого при 600°C образца из сплава ВТ6 в зоне захвата (а) и в центральной части рабочей зоны (б).

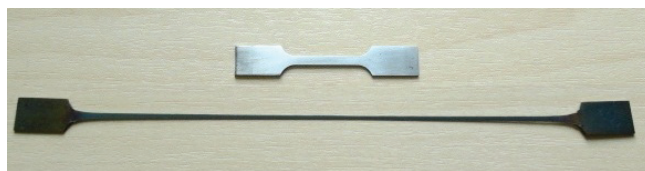


Рис. 2. Исходный (верхний) и растянутый в условиях низкотемпературной сверхпластичности при температуре 600°C образец (нижний) из титанового сплава ВТ6.

на степень деформации порядка 600% (рис.2), причем признаков зарождения разрушения при этом обнаружено не было. Использование сканирующей электронной микроскопии не позволило обнаружить поры, тем более мест их зарождения на отполированной поверхности образцов после их растяжения. Исследования проводили по всей длине растянутых образцов, особое внимание, обращая на центральную область с максимальным утонением.

Было выявлено заметное огрубление микроструктуры (рис.3) в деформированной части образцов в сравнении с недеформированными захватами. Так, после испытаний при 600°C, наблюдали уменьшение числа очень мелких зерен α и β - фаз размером менее 0,1 мкм с одновременным увеличением количества крупных зерен размером порядка 1 мкм β -фазы и порядка 2 мкм α -фазы. При этом количественное соотношение α и β - фаз практически оставалось неизменным. Объемная доля β - фазы составляла около 8%. Наблюдается равноосность зерен α и β - фаз. После испытаний при 650°C выявленная тенденция структурных изменений в образцах сплава ВТ6 сохраняется. Максимальный размер зерен β -фазы составлял 1,5 мкм, а зерен α -фазы – 3 мкм. Таким образом налицо резко выраженное укрупнение зерен при сверхпластической деформации в условиях низкотемпературной сверхпластичности, причем более интенсивный рост отмечается зерен α -фазы.

Электронно-микроскопический анализ тонких фольг, вырезанных в количестве 10 штук из донной части каждой цилиндрической оболочки, полученной сверхпластической формовкой, также не позволил выявить присутствие в них пор (рис.4). Средний размер зерен составил соответственно 0,5 мкм и 0,7 мкм для оболочек,

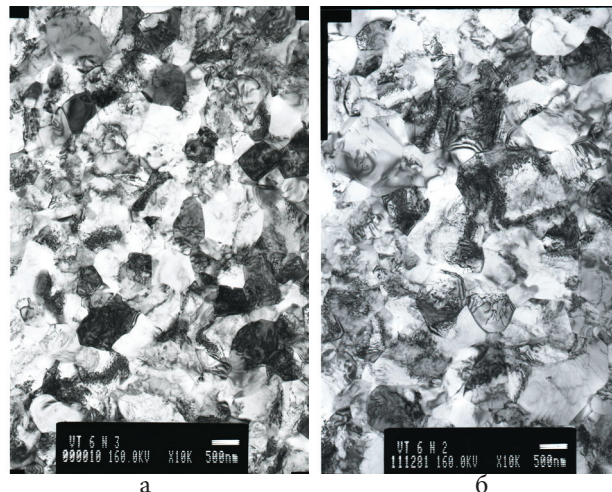


Рис.4. Структура тонких фольг из донной части цилиндрических оболочек из сплава ВТ6, изготовленных сверхпластической формовкой при 600°C (а) и 650°C (б).

изготовленных при 600°C и 650°C. Степень деформации, эквивалентная деформации растяжения в донной части исследованных оболочек, определенная по методике [17] составляла 120%.

По всей видимости, отсутствие пор в титановом сплаве ВТ6 на установившейся стадии низкотемпературной сверхпластичности обусловлено влиянием зернограничного проскальзывания (ЗГП), способствующего активизации диффузии по границам зерен и фаз [18], а также высокой пластичностью второй фазы (β - фазы), имеющей значительное количество систем скольжения [19]. Необходимо также иметь ввиду повышенный на порядок коэффициент диффузии в β - фазе [20], а также пониженный модуль упругости β - фазы в сравнении с основной α -фазой [21,22]. Уникальная совокупность перечисленных факторов возможно и запускает механизм деформации, не только не предусматривающий формирование пор, но даже и способствует «залечиванию» уже имеющихся. Известны работы [23-25], в которых приводятся экспериментальные данные по «залечиванию» имеющихся пор в зоне сварных соединений титановых сплавов в процессе традиционной сверхпластической деформации и последующего отжига. Следует отметить, что авторы [12] также не обнаружили пор в сплаве ВТ6 со средним размером зерен 0,175 мкм после его сверхпластической деформации растяжением при температуре 550°C.

Заключение

1. На стадии установившейся сверхпластической деформации при температурах 600 и 650°C возникновения и роста пор в сплаве ВТ6 с исходным средним размером зерен 0,2 мкм не обнаружено.

2. Выявлен интенсивный рост зерен при сохранении их равноосности в сплаве ВТ6 на установившейся стадии сверхпластичности при температурах 600 и 650°C, вероятно связанный с активизацией диффузионных процессов, стимулированных сверхпластической деформацией.

Эксперименты выполнены при частичной финансовой поддержке по гранту РФФИ № 13-08-12200.

Литература

1. B.N. Efremov, I.I. Novikov, V.K. Portnoy, E.K. Zavarzina. *Izvestiya VUZ. Tsvetnaya Metallurgiya*. **5**, 96 (1976). (In Russian) [Б.Н. Ефремов, И.И. Новиков, В.К. Портной, Е.К. Заварзина. *Известия вузов. Цветная металлургия* **5**, 96 (1976)].
2. N.J. Stewart. *Met. Trans.* **7A**, 399 (1976).
3. K. Matsuki, Y. Ueno, M. Yamada and Y. Murakami. *J. Japanese Inst. Metals*. **11**, 1136 (1977).
4. R.I. Kuznetsova. *Phys. Met. Metall.* **45**, 641 (1978). (In Russian) [Р.И. Кузнецова. *ФММ*. **45**, 641 (1978)].
5. R.A. Tait and D.M.R. Taplin. *Scripta Metall.* **13**, 77 (1979).
6. A. Karim, D.L. Holt, W.A. Backofen. *Trans. Met. Soc. AIME* **245**, 1131 (1969).
7. A.A. Bochvar, I.I. Novikov, V.K. Portnoy, V.I. Belskaya. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. **202**, 147 (1972). (In Russian) [А.А. Бочвар, И.И. Новиков, В.К. Портной,

- В.И. Бельская. *ДАН СССР* **202**, 147 (1972)].
8. N.E. Paton, C.H. Hamilton. *Superplastic Forming of Structural Alloys*, Eds. The Metallurgical Society of AIME, (1982).
9. N. Ridley and Z.C. Wang. *Materials Science Forum*, *Trans. Tech. Publ.* 170-172, 177 (1994).
10. H.P. Pu and J.C. Huang. In: *Proc. of Confer. Superplasticity and Superplastic Forming*, ed. by Ghosh A.K. and Bieler T.R. Warrendale, TMS. **33** (1995).
11. A.K. Ghosh and D.H. Bae. *Materials Science Forum*, *Trans. Tech. Publ.* **89**, 243-245 (1997).
12. G.A. Salishchev, E.A. Kudrjavitsev, S.V. Zherebtsov, S.L. Semiatin. *Materials Science Forum*, *Trans. Tech. Publ.* **735**, 253 (2013).
13. R.Z. Valiev, O.A. Kaibyshev, R.I. Kuznetsov, R.Sh. Musalimov, N.K. Tsenev. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. **301**, 864 (1988). (in Russian) [Р.З. Валиев, О.А. Кайбышев, Р.И. Кузнецов, Р.Ш. Мусалимов, Н.К. Ценев. *Доклады Академии наук СССР*. **301**, 864 (1988)].
14. G.A. Salishchev, R.M. Galeev, O.R. Valiakhmetov, R.V. Safullin, R.Ya. Lutfullin, O.N. Senkov, F.H. Froes, O.A. Kaibyshev. *Mat. Tech. & Adv. Perf. Mater.* **15.2**, 133 (2000).
15. V.V. Astanin. *Vestnik UGATU*. **2**, 34 (2002). (in Russian) [В.В. Астанин. *Вестник УГАТУ*. **2**, 34 (2002)].
16. O. R. Valiakhmetov, R. M. Galeev, V. A. Ivan'ko et al. *Nanotechnologies in Russia*. **5**, 108 (2010).
17. R.V. Safullin, F.U. Enikeev, R.Y. Lutfullin *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo* **4**, 8 (1994) (in Russian) [Р.В. Сафиуллин, Ф.У. Еникеев, Р.Я. Лутфуллин. *Кузнечно-штамповочное производство* **4**, 8 (1994)].
18. I.V. Ratochka. O.N. Lykova, A.U. Gerackina et al. **12**, 97(2009) (in Russian) [И.В. Раточка, О.Н. Лыкова, А.Ю. Гераскина и др. *Физическая мезомеханика* **12**, 97 (2009)].
19. Lütjering G. and Williams J.C. *Titanium*. 2nd ed. Springer Berlin Heidelberg, New York (2007).
20. C.Z. Bokshtein, N.P. Zulina, O.V. Markovich. *Phys. Met. Metall.* **68**, 104(1989). (In Russian) [С.З. Бокштейн, Н.П. Зюлина, О.В. Маркович. *ФММ*. **68**, 104(1989)].
21. E.A. Trofimov, R.U. Shayakhmetov. R.Ya. Lutfullin. *Journal of Advanced Materials*. **15**, 124(2013) (in Russian). [Трофимов Е.А., Шаяхметов Р.У., Лутфуллин Р.Я. *Перспективные материалы*. **15**, 124(2013)].
22. I. Sen, U. Ramamurty. *Scripta Mater.* **62**, 37(2010).
23. O.A. Kaibyshev, R.Ya. Lutfullin, V.K. Berdin. *Acta Metall. Mater.* **42**, 2609 (1994).
24. R.Ya. Lutfullin. *Letters on Materials* **1**(2), 88 (2011) (in Russian) [Р.Я. Лутфуллин. *Письма о материалах* **1**(2), 88 (2011)].
25. R.Ya. Lutfullin, M.Kh. Mukhametrakhimov. *Rev. Adv. Mater. Sci.* **25**, 142 (2010).