



УДК 669.017:539.4

## СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ НАНОСТРУКТУРНОГО СПЛАВА ВТ6

Г.А. Салищев, Е.А. Кудрявцев, С.В. Жеребцов

Белгородский государственный университет,  
Лаборатория Объемных наноструктурных материалов,  
ул. Победы 85, Белгород, 308015, Россия, e-mail: [salishchev@bsu.edu.ru](mailto:salishchev@bsu.edu.ru)

**Аннотация.** Изотермической мультиосевой деформацией в двухфазном титановом сплаве ВТ6 был получен средний размер зерна 135 нм, что позволило наблюдать низкотемпературную сверхпластичность при температуре 550°C. Максимальное удлинение составило 1000%, а коэффициент скоростной чувствительности  $m=0,47$  при оптимальной скорости деформации  $2 \times 10^{-4} \text{с}^{-1}$ . Показано, что эволюция микроструктуры при низкотемпературной деформации играет ключевую роль в процессе сверхпластического течения.

**Ключевые слова:** низкотемпературная сверхпластичность, изотермическая всесторонняя ковка, ультрамелкозернистая структура, микроструктурная эволюция.

Перевод двухфазных титановых сплавов в наноструктурное состояние позволяет снизить температуру сверхпластической деформации на несколько сот градусов ниже наблюдаемой в сплавах с обычной микроструктурой [1]. Например, в ВТ6 с размером зерна 300 нм сверхпластическое течение наблюдалось при 600°C, причем удлинение составило 500%, коэффициент  $m=0,37$  [2], а работе [3] в том же сплаве с таким же размером зерна было получено удлинение 296% и  $m = 0,34$  при той же температуре. Снижение удлинения с понижением температуры деформации ожидаемо из-за торможения диффузии и ускоренного роста зерен, вследствие уменьшения объемной доли  $\beta$ -фазы. Однако, увеличение протяженности границ с уменьшением размера зерна, отличающихся от тела большой диффузионной проницаемостью должно компенсировать эти потери. Исходя из этого, целью настоящей работы является изучение структурных изменений и механического поведения титанового сплава ВТ6 со средним размером зерна 135 нм при сверхпластической деформации при экстремально низкой температуре 550°C.

Двухфазный титановый сплав ВТ6 был поставлен в виде горячекатаного прутка (температура полиморфного превращения 990°C). Образцы для исследований были получены изотермической мультиосевой деформацией с последующей прокаткой. Испытания на растяжение проводились на универсальной испытательной машине Instron в температурном интервале 450-600°C со скоростью перемещения траверсы 0,5-100 мм/мин. Коэффициент скоростной чувствительности  $m$  был рассчитан из наклона кривой  $\log \sigma - \log \dot{\epsilon}$  и испытаний с изменением скорости деформации [1]. Структура сплава была исследована с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3, просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100 и растрового электронного микроскопа Quanta 600.

В наноструктурном состоянии микроструктура сплава представляла собой глобулярные  $\alpha$  и  $\beta$  зерна со средним размером зерна 135 нм. Предварительные исследования показали, что рост зерен при нагреве происходит уже при  $T=550^\circ\text{C}$ . С увеличением времени отжига зерна



заметно укрупняются и после 5 часов отжига этот процесс протекает медленнее (Рис. 1б). Объемная доля  $\beta$ -фазы в сплаве составляла 10% и не сильно изменялась в ходе отжига.

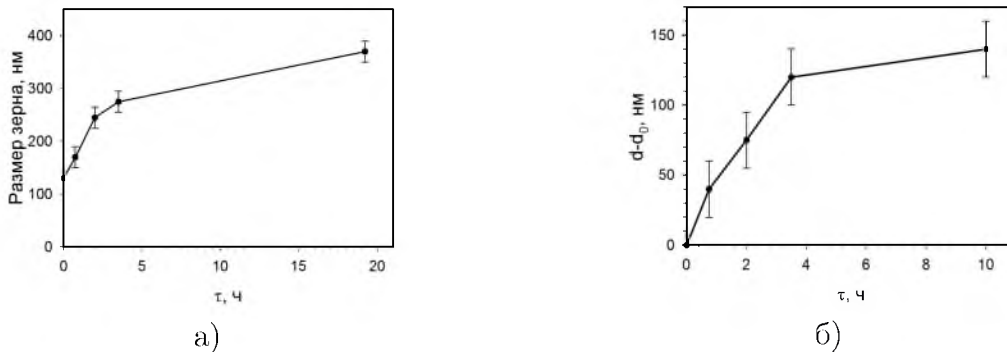


Рис. 1. Кинетика роста зерен в сплаве ВТ6 при отжиге и при деформации со скоростью  $2 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  и  $T=550^\circ\text{C}$  (а).  $d$  – средний размер зерна за время деформации,  $d_0$  – средний размер зерна за аналогичное время отжига (б).

Исследование механических свойств сплава показало, что с повышением температуры деформации растет пластичность и снижается напряжение течения (Рис. 2а). При  $T=550^\circ\text{C}$  и  $5 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  удлинение достигает 640%. Изучение скоростной зависимости механических характеристик при  $T=550^\circ\text{C}$  позволило установить оптимальный режим сверхпластичности (Рис. 2б). При скорости деформации  $2 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  были получены максимальные значения удлинения  $\delta = 1000\%$  и коэффициента  $m$  (0,47).

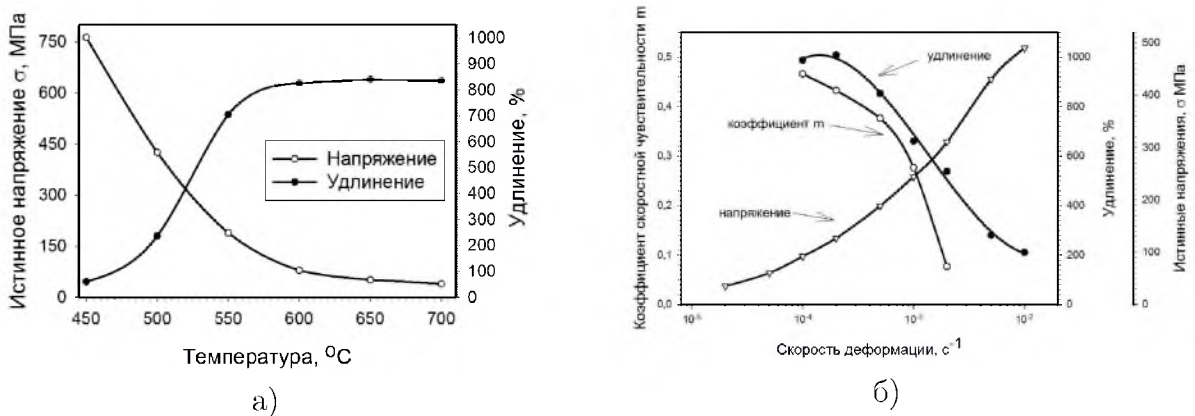


Рис. 2. Изменение механических характеристик сплава ВТ6: (а) от температуры деформации при  $\dot{\epsilon}=5 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ , (б) от скорости деформации при температуре  $550^\circ\text{C}$ .

Оценка кажущейся энергии активации сверхпластической деформации дала значение  $Q=149 \text{ кДж/моль}$  при  $n=2$ , которая близка величинам энергии активации 176 и 160 кДж/моль полученным, соответственно, в работах [3,4]. Она близка также энергии активации зернограницной диффузии 189 кДж/моль для обычного сплава ВТ6 [5]. При  $T=550^\circ\text{C}$  было исследовано влияние скорости и степени деформации на микроструктуру сплава. С уменьшением

скорости деформации наблюдается существенное укрупнение зерен. При  $\varepsilon = 100\%$  средний размер зерна составил 290 нм при  $5 \times 10^{-4} \text{с}^{-1}$ , 490 нм при  $2 \times 10^{-4} \text{с}^{-1}$  и 530 нм при  $2 \times 10^{-5} \text{с}^{-1}$ . График на рис. 16 представляет деформационно-индуцированный рост зерен при  $2 \times 10^{-4} \text{с}^{-1}$  и  $T=550^\circ\text{C}$ . Видно, что деформация существенно ускоряет рост зерен в сплаве в сравнении с отжигом. Причем некоторые зерна  $\alpha$ -фазы достигают к степени деформации 800% 1400 нм (Рис. 5а). При этом укрупнение зерен не выводит сплав из состояния сверхпластичности. Коэффициент скоростной чувствительности  $m$  равен 0.52, 0.62 и 0.65, соответственно, для степеней деформации 100, 200, и 500%. При этом в оптимальных условиях не обнаруживается порообразования в сплаве. Исследование эволюции кристаллографической текстуры в ходе отжига и сверхпластической деформации выявило существенные ее изменения (Рис. 3). Отжиг слабо влияет на текстуру. Однако, увеличение степени деформации от 100 до 500% при оптимальной скорости деформации  $2 \times 10^{-4} \text{с}^{-1}$  ведет размытию полюсной фигуры (Рис. 3г). Отметим, что фактор Керна, рассчитанный из полюсной плотности [6], снижается по сравнению с исходным состоянием с 0,55 до 0,42 при достижении деформации в 500% и скорости  $2 \times 10^{-4} \text{с}^{-1}$ . Такие структурные изменения могут быть связаны с развитием зернограничного проскальзывания.

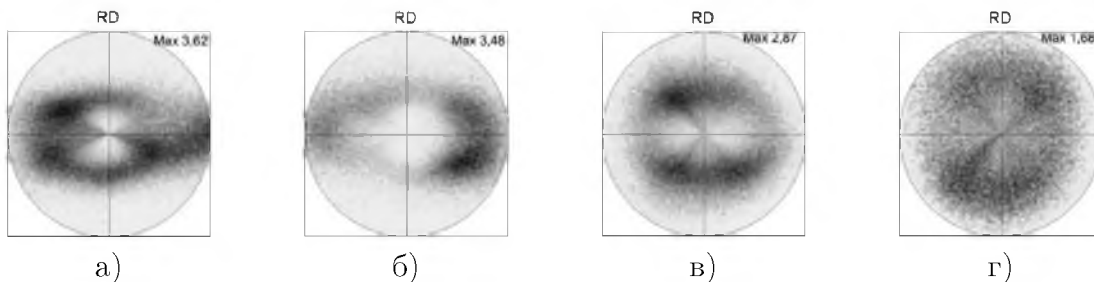


Рис. 3. Полюсные фигуры (0002) сплава ВТ6 в различных состояниях: (а) исходное состояние, (б) после отжига в течение 30 мин, (в) после деформации со скоростью  $2 \times 10^{-4} \text{с}^{-1}$  на степень деформации 100% и (г) 500%.

Измельчение размера зерна до 135 нм делает возможным проявление сверхпластичности при экстремально низкой для сплава ВТ6 температуре –  $550^\circ\text{C}$  с высокими значениями коэффициента скоростной чувствительности и относительного удлинения. Известно [1,7], что сверхпластическое поведение двухфазных сплавов наиболее ярко наблюдается при отношении объемной доли  $\alpha/\beta$  фаз близким к 1. Рассматриваются две причины [1]: зернограничное проскальзывание осуществляется легче по межфазным границам, а микроструктура более стабильная в этом состоянии. Между тем наноструктурный сплав ВТ6, в котором при  $T=550^\circ\text{C}$  доля  $\beta$ -фазы лишь 10% показывает сопоставимые значения относительного удлинения. При этом оценка энергии активации, сохранение равноосности зерен, размытие текстуры однозначно свидетельствует в пользу главного механизма деформации зернограничного проскальзывания. Вероятно, такое необычное поведение связано с ускоренным ростом зерен в процессе сверхпластического течения (Рис. 16), который снимает перенапряжения, возникающие при деформации. Косвенно, это подтверждает факт отсутствия пор в образцах после деформации.

Работа была поддержана грантом ПН<sup>о</sup>725 Министерства Науки и Образования Российской Федерации.



### Литература

1. Kaibyshev O.A. Superplasticity of Alloys, Intermetallides and Ceramics / Berlin: Springer-Verlag, 1992.
2. Salishchev G.A. et al. Submicrocrystalline and nanocrystalline structure formation in materials and search for outstanding superplastic properties // Mater. Sci. Forum. – 1994. – 170-172. – P.121-130.
3. Ko Y.G. et al. Low-temperature superplasticity of ultra-fine-grained Ti-6Al-4V processed by equal-channel angular pressing // Metall. Mater. Trans. – 2006. – 37A. – P.381-391.
4. Sargent G.A. et al. Low-temperature coarsening and plastic flow behavior of an titanium billet material with an ultrafine microstructure // Metall. Mater. Trans. – 2008. – 39A. – P.2949-2964.
5. Sergueeva A.V. et al. Superplastic behaviour of ultrafine-grained Ti-6Al-4V alloys // Mater. Sci. Eng. – 2002. – A323. – P.318-325.
6. Wasserman G., Greven I. Texturen metallischer Werkstoffe / Berlin: Springer-Verlag, 1962.
7. Donachie M.J., Jr. Titanium: a Technical Guide / ASM International, USA, 2000.

### STRUCTURAL CHANGES AND MECHANICAL BEHAVIOR DURING LOW-TEMPERATURE SUPERPLASTICITY OF NANOSTRUCTURED ALLOY TI-6AL-4V

G.A. Salishchev, E.A. Kudryavtsev, S.V. Zherebtsov

Belgorod State University,  
Pobedy St., 85, Belgorod, 308015, Russia, e-mail: [salishchev@bsu.edu.ru](mailto:salishchev@bsu.edu.ru)

**Abstract.** After isothermal multidirectional forging, the average grain size 135 nm in two-phase titanium alloy Ti-6-4 has been obtained. It has been the low-temperature superplasticity at 550°C in fine-grained state. At the optimum strain rate of  $2 \times 10^{-4} s^{-1}$  elongation to failure was 1000% and the strain rate sensitivity value was  $m=0,47$ . The evolution of the microstructure during low-temperature deformation plays a key role in the process of superplastic flow.

**Key words:** low-temperature superplasticity, multidirectional forging, ultrafine grain structure, microstructure evolution.