

С. В. Жеребцов, М. А. Боева, Г. А. Салищев,  
Е. А. Кудрявцев, А. С. Перцев, В. В. Латыш, И. В. Кандаров

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОЙ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

Были исследованы структура и свойства титанового сплава ВТ6, подвергнутого ротационной ковке в интервале температур 680–500 °С до общей степени деформации  $\epsilon = 2,67$ . Показано, что в результате такой обработки происходит формирование УМЗ микроструктуры с размером зерен менее 0,5 мкм, что приводит к повышению предела прочности до 1315 МПа при пластичности 10,5 % и снижению температуры сверхпластичности до 600 °С. *Титановые сплавы; ротационная ковка; микроструктура; низкотемпературная сверхпластичность*

Одним из перспективных подходов к повышению механических свойств конструкционных материалов является формирование в них ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры с размером зерен менее 1 мкм [1]. По сравнению с крупнозернистыми аналогами УМЗ материалы обладают существенно более высокими значениями статической и циклической прочности, твердости и износостойкости [1, 2], что дает возможность снижать габариты деталей при сохранении их конструкционной прочности. Это особенно актуально для титановых сплавов, которые в силу малой плотности, высокой удельной прочности и отличной коррозионной стойкости особенно востребованы в тех отраслях, где вес и размер изделия являются чрезвычайно важными параметрами, т. е. в авиации, космонавтике, кораблестроении, автомобилестроении и др. Ультрамелкозернистая структура в металлических материалах может быть получена в результате большой пластической деформации при пониженных температурах (обычно ниже  $0,5T_{пл}$ ), причем требуемая степень дефор-

мации, очевидно, повышается с уменьшением температуры [1]. Реализация таких условий деформации без разрушения заготовки возможна только при использовании мягких схем деформации. Такие схемы, в частности, реализуются при равноканальном угловом прессовании [3], сдвиге под давлением [4], гидростатической экструзии [5], винтовой экструзии [6] и др.

Еще одним перспективным способом получения УМЗ структуры в длинномерных полуфабрикатах является ротационная ковка. Деформация при этом осуществляется периодическим обжатием прутковой заготовки бойками, совершающими относительно оси прутка в совокупности радиальное, вращательное и(или) осевое движение. Из-за локальности деформирования существенно снижаются технологические усилия, что обеспечивает значительное снижение металлоемкости оборудования и повышение стойкости инструмента. Поскольку при ротационной ковке обеспечивается деформация по квазисхеме всестороннего сжатия, появляется возможность формоизменения материалов без разрушения до значительных степеней деформации при высокой точности полученных изделий. В данной работе было проведено исследование влияния ротационнойковки в интервале температур 680–500 °С до общей степени деформации  $\epsilon = 2,67$  на структуру и свойства (механические и технологические) широко используемого в промышленности двухфазного титанового сплава ВТ6.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом исследования являлся  $\alpha / \beta$  титановый сплав ВТ6 с температурой полиморф-

Контактная информация: 8(472)258-54-16

Результаты представленных исследований получены в рамках проекта «Создание технологий и промышленного производства узлов и лопаток газотурбинных двигателей с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений», реализуемого в рамках Федеральной целевой программы по Постановлению № 218 Правительства РФ от 9 апреля 2010 года совместно ОАО «УМПО» и ФГБОУ ВПО УГАТУ

Е. А. Кудрявцев выражает благодарность за финансовую поддержку ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, соглашение № 14.132.21.1681

ного превращения 995 °С. Термообработка заготовки сплава размером  $\varnothing 60 \times 500$  мм заключалась в закалке в воду с температуры 960 °С.

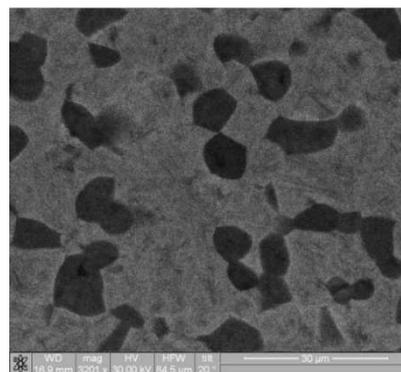
Деформация прутков сплава ВТ6 выполнялась с использованием радиально-ковочной машины модели SXP-16, производства фирмы GFM, Австрия. Прутки предварительно нагревались на заданную температуру, затем производилась радиальная ковка на диаметр 35, 21 и 15 мм. Деформация на требуемый диаметр выполнялась в несколько проходов с шагом  $\sim 5$  мм за проход. Охлаждение заготовок производили на воздухе. Истинная деформация по формуле  $e = \ln(F_0 / F)$ , где  $F_0$  и  $F$  начальная и конечная площадь заготовки соответственно.

Микроструктура деформированных образцов исследовалась в продольном и поперечном направлениях с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEM-2000 FX с ускоряющим напряжением 200 кВ и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Quanta 200 3D. Механические свойства оценивались по испытаниям на растяжение при комнатной температуре. Испытывались плоские образцы с размером рабочей части  $1,5 \times 3 \times 16$  мм. Технологические свойства (имитация штамповки в условиях сверхпластичности) оценивались по испытаниям на сжатие цилиндрических образцов  $\varnothing 14 \times 20$  мм, в интервале температур 600–700 °С при скорости  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Определялось напряжение течения при степени деформации 20 %.

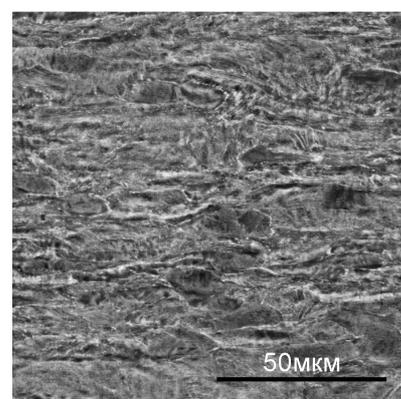
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исходная структура сплава после закалки в воду с температуры 960 °С представлена на рис. 1. Микроструктура состоит из первичных глобулярных частиц  $\alpha$ -фазы, размером  $\sim 7$  мкм, разделенных участками превращенной  $\beta$ -матрицы с пластинчатым строением, обусловленным наличием  $\alpha'$  мартенсита.

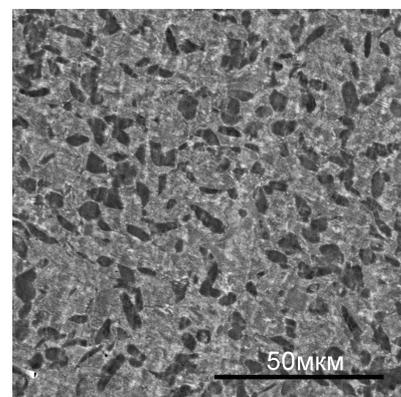
Микроструктура сплава ВТ6 после деформации  $e = 1$  ( $\varnothing 60 \text{ мм} \rightarrow \varnothing 35 \text{ мм}$ ) с нагревом исходной заготовки до 680 °С показана на рис. 2. На продольном шлифе наблюдаются слегка вытянутые в направлении деформации частицы  $\alpha$ -фазы и смешанная глобулярно-пластинчатая структура  $\beta$ -превращенной матрицы (рис. 2, *a*). На поперечном шлифе форма  $\alpha$ -частиц близка к равноосной. Размер частиц  $\alpha$ -фазы составляет  $\sim 5$  мкм (рис. 2, *б*).



**Рис. 1.** Микроструктура сплава ВТ6 после закалки в воду с 960 °С. СЭМ изображение, фазовый контраст



*a*



*б*

**Рис. 2.** Микроструктура сплава ВТ6 после ротационнойковки  $e = 1$  ( $\varnothing 60 \text{ мм} \rightarrow \varnothing 65 \text{ мм}$ ) с нагревом исходной заготовки до 680 °С: *a* – продольное, *б* – поперечное сечение. СЭМ изображения, фазовый контраст

Ротационная ковка до  $e = 2$  ( $\varnothing 35 \text{ мм} \rightarrow \varnothing 21 \text{ мм}$ ) с нагревом исходной заготовки до 500 °С приводит к формированию структуры с сильной направленностью вдоль оси прутка (рис. 3, *a*). Вытянутые частицы  $\alpha$ -фазы содер-

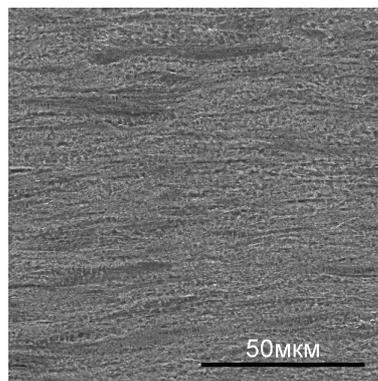
жат субструктуру. Структура превращенной  $\beta$ -матрицы преимущественно глобулярная, что очевидно является следствием процессов фрагментации тонкопластинчатых выделений  $\alpha$ -фазы. На поперечном шлифе частицы  $\alpha$ -фазы имеют вытянутую и изогнутую форму; поперечный размер составляет до 2 мкм (рис. 3, б). Просвечивающая микроскопия показывает в продольном сечении преимущественно ламельную микроструктуру с шириной ламелей 150–200 нм. Также отмечается высокая плотность дислокаций и отдельные равноосные зерна/фрагменты размером около 200 нм (рис. 3, в).

Увеличение степени деформации до  $e = 2,67$  ( $\varnothing 35$  мм  $\rightarrow$   $\varnothing 15$  мм, температура нагрева 500 °С) приводит к дальнейшему измельчению микроструктуры (рис. 4). В продольном сечении микроструктура ламельная, с шириной ламелей 1–2 мкм (рис. 4, а). Частицы  $\alpha$ -фазы на поперечном шлифе становятся короче и тоньше (около 1,5 мкм), хотя по-прежнему имеют вытянутую и изогнутую форму (рис. 4, б). Микроструктура, наблюдаемая в просвечивающем микроскопе смешанная, пластинчато-глобулярная. На фоне высокой плотности дислокаций наблюдаются равноосные зерна/фрагменты размером около 100 нм.

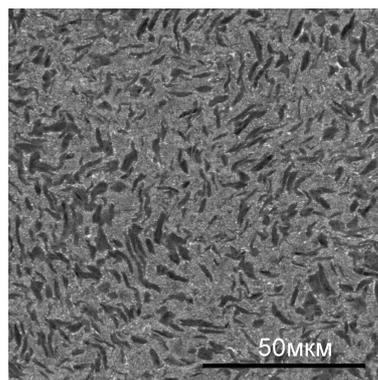
Механические свойства прутков, полученных ротационной ковкой представлены на рис. 5. Уже после первого этапа обработки до деформации  $e = 1$  при температуре нагрева 680 °С сплав показывает предел прочности равный 1200 МПа, что выше достигаемого стандартной термической обработкой. После деформации до  $e = 2$  и  $e = 2,67$  предел прочности в обоих случаях составляет 1315 МПа, однако имеется некоторое различие в относительном удлинении: 9 % после  $e = 2$  и 10,5 % после  $e = 2,67$ . Такое отличие может быть обусловлено повышением остроты текстуры в прутке и состоянием межфазных границ [5]. Интересно отметить наличие стадии деформационного упрочнения в сплаве, подвергнутом ротационной ковке. Это нехарактерно для сильнодеформированных материалов, отличительной особенностью которых является быстрая локализация пластического течения и раннее образование шейки [2].

Для определения потенциала метода с точки зрения практического использования, были выполнены испытания образцов после ротационнойковки до  $e = 2,67$  на сжатие при повышенной температуре. Целью данного эксперимента было изучить поведение материала при штам-

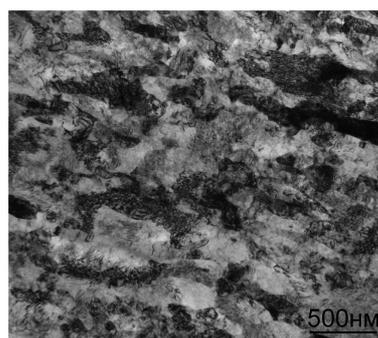
повке в условиях сверхпластичности (СП). Температурно-скоростные условия (600–700 °С и  $10^{-3}$  с $^{-1}$ ) выбирали на основании более ранних исследований. Результаты испытаний приведены на рис. 6. Механическое поведение образцов, подвергнутых ротационной ковке, характеризуется наличием плато, что типично для СП течения.



а

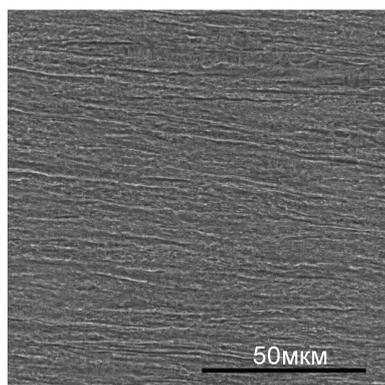


б

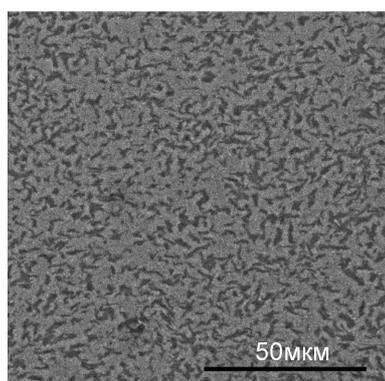


в

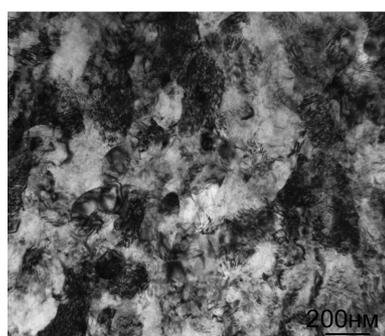
**Рис. 3.** Микроструктура сплава VT6 после ротационнойковки  $e = 2$  ( $\varnothing 60$  мм  $\rightarrow$   $\varnothing 35$  мм при 680 °С и  $\varnothing 35$  мм  $\rightarrow$   $\varnothing 21$  мм при 500 °С): а, в – продольное, б – поперечное сечение; а, б – СЭМ изображения, фазовый контраст, в – ПЭМ, светлопольный режим



а



б

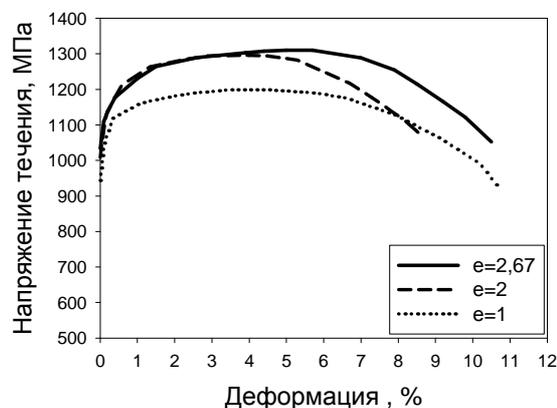


в

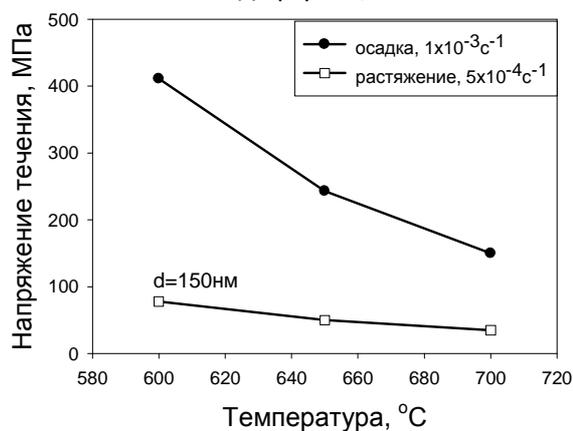
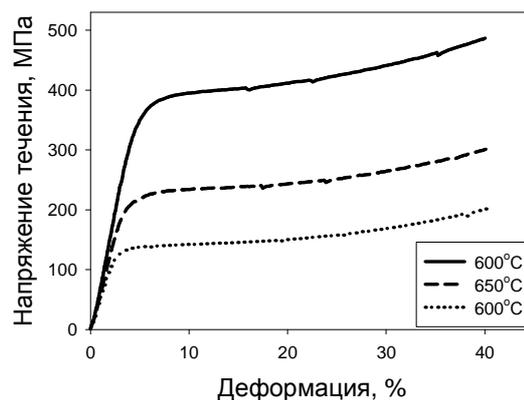
**Рис. 4.** Микроструктура сплава ВТ6 после ротационнойковки  $e = 2,67$  ( $\varnothing 60$  мм  $\rightarrow$   $\varnothing 35$  мм при  $680^\circ\text{C}$  и  $\varnothing 35$  мм  $\rightarrow$   $\varnothing 15$  мм при  $500^\circ\text{C}$ ): а, б – продольное, б – поперечное сечение; а, б – СЭМ изображения, фазовый контраст, в – ПЭМ, светлополюсный режим

Напряжения течения, демонстрируемые сплавом после ротационнойковки до  $e = 2,67$ , существенно выше, чем те характеристики низкотемпературной СП, которыми обладает однородный глобулярный сплав с размером зерен 150 нм, полученный всесторонней изотермической деформацией (определенное влияние дает также разница в схеме СП деформации, трение и увеличение скорости при осадке). Между тем

напряжения течения сплава при  $650$  и  $700^\circ\text{C}$  ( $250$  и  $150$  МПа соответственно) можно считать приемлемо низкими для использования стального штампового инструмента вместо дорогостоящего ЖС6, применяемого при высоких температурах.



**Рис. 5.** Механические свойства на растяжение при комнатной температуре сплава ВТ6 после ротационнойковки



**Рис. 6.** Механические свойства на сжатие при повышенной температуре сплава ВТ6 после ротационнойковки

Таким образом, в результате осуществления тепловой ротационнойковки в сплаве ВТ6 формируется дисперсная структура, обеспечивающая высокие механические и технологические свойства. Учитывая технологичность процесса, ротационнаяковка представляется весьма перспективной для получения высокопрочных технологичных прутковых полуфабрикатов из титановых сплавов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были исследованы структура и свойства титанового сплава ВТ6, подвергнутого ротационнойковке в интервале температур 680–500 °С до общей степени деформации  $e = 2,67$ . Было установлено, что в сплаве ВТ6 формируется дисперсная структура с размером зерен / фрагментов около 100 нм, обеспечивающая предел прочности 1315 МПа при пластичности 10,5 %. Сплав после ротационнойковки демонстрирует признаки низкотемпературной сверхпластичности в интервале температур 600–700 °С при скорости 10-3с-1; наблюдаемые при этом напряжения течения составляют 150–250 МПа, что позволяет заменить при штамповке сплав ЖС6 менее дорогим стальным штамповым инструментом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Валиев Р. З., Александров И. В.** Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 398 с.
2. **Meyers M. A., Mishra A., Benson D. J.** Mechanical properties of nanocrystalline materials // *Progr. Mater. Sci.* 51 (2006). P. 427–556.
3. **Valiev R. Z., Langdon T. G.** Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // *Progr. Mater. Sci.* 51. 881 (2006).
4. **Zhilyaev A. P., Langdon T. G.** Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications // *Progr. Mater. Sci.* Vol. 53 (2008). P. 893–979.
5. Effect of hydrostatic extrusion at 600–700 °С on the structure and properties of Ti–6Al–4V alloy / S. Zherebtsov [et al.] // *Mater. Sci. Eng. A.* Vol. 485, (1–2), 2008. P. 39–45.
6. Useful properties of twist extrusion / Y. Beygelzimer [et al.] // *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 503 (2009) 14.
7. Low Temperature Superplasticity of Ti-6Al-4V Processed by Warm Multidirectional Forging /

G. A. Salishchev [et al.] // *Mater. Sci. Forum.* Vol. 735 (2013). P. 253–257.

### ОБ АВТОРАХ

**Жеребцов Сергей Валерьевич**, доц. каф. материаловедения и нанотехнологий, с.н.с. лаб. объемн. наноструктурн. материалов ФГАОУ ВПО НИУ «БелГУ». Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1995). Канд. техн. наук. Иссл. в обл. деформационной и термическ. обработки металлов и сплавов, эволюции структуры и механич. поведения металл. материалов в процессе деформации до больших степеней.

**Боева Мария Александровна**, студ. ФГАОУ ВПО НИУ «БелГУ». Иссл. в обл. деформационной и термическ. обработки металлов и сплавов, эволюции структуры и механич. поведения металл. материалов в процессе деформации до больших степеней.

**Салишев Геннадий Алексеевич**, проф. каф. материаловедения и нанотехнологий, рук. лаб. объемн. наноструктурн. материалов ФГАОУ ВПО НИУ «БелГУ». Д-р техн. наук. Иссл. в обл. деформационной и термическ. обработки металлов и сплавов, эволюции структуры и механич. поведения металл. материалов в процессе деформации до больших степеней.

**Кудрявцев Егор Алексеевич**, аспирант ФГАОУ ВПО НИУ «БелГУ». Иссл. в обл. деформационной и термическ. обработки металлов и сплавов, низкотемпературн. сверхпластичности титановых сплавов.

**Перцев Алексей Сергеевич**, асп. ПНИПУ. Иссл. в обл. повышения комплекса механич. характеристик промышл. заготовок из конструкц. сталей механо-термическ. воздействием.

**Латыш Владимир Валентинович**, вед. науч. сотр. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1974). Канд. техн. наук. Иссл. в обл. деформационной обработки металлов и сплавов, эволюции микроструктуры и механич. свойств металл. материалов.

**Кандаров Ирек Вилевич**, инженер. Дипл. инженер-механик (УАИ, 2004). Иссл. в обл. обработки металлов давлением, эволюции микроструктуры и механич. поведения металл. материалов при пластическ. деформации