

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 α / β 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 ~ 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} 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 α -фазы, размером ~ 7 мкм, разделенных участками превращенной β -матрицы с пластинчатым строением, обусловленным наличием α' мартенсита.

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

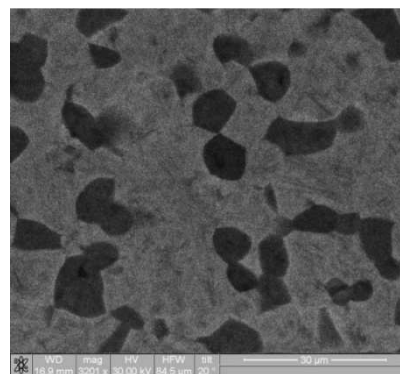
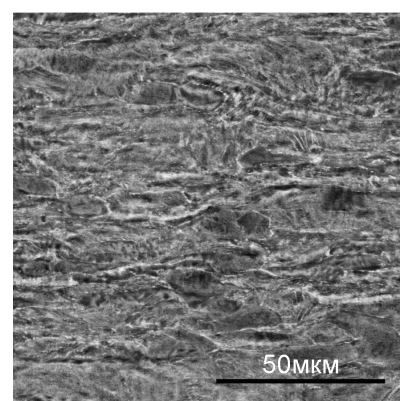
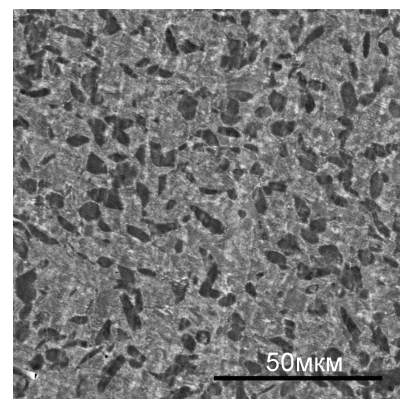


Рис. 1. Микроструктура сплава ВТ6 после закалки в воду с 960 °С. СЭМ изображение, фазовый контраст



a



б

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

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

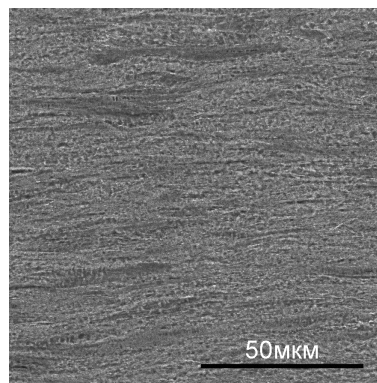
жат субструктуру. Структура превращенной β -матрицы преимущественно глобулярная, что очевидно является следствием процессов фрагментации тонкопластинчатых выделений α -фазы. На поперечном шлифе частицы α -фазы имеют вытянутую и изогнутую форму; поперечный размер составляет до 2 мкм (рис. 3, б). Просвечивающая 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 α -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.

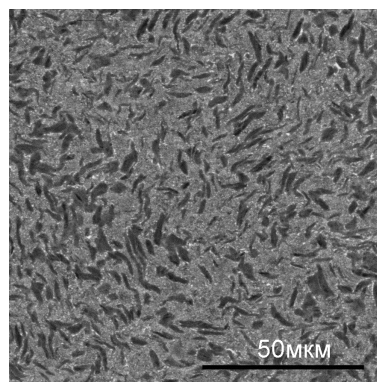
Механические свойства прутков, полученных ротационной ковкой представлены на рис. 5. Уже после первого этапа обработки до деформации $e = 1$ при температуре нагрева 680 °С сплав показывает предел прочности равный 1200 МПа, что выше достигаемого стандартной термической обработкой. После деформации до $e = 2$ 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-

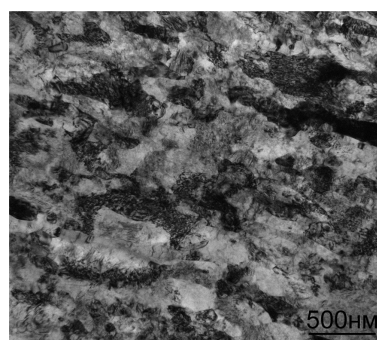
повке в условиях сверхпластичности (СП). Температурно-скоростные условия (600–700 °С и 10^{-3} с $^{-1}$) выбирали на основании более ранних исследований. Результаты испытаний приведены на рис. 6. Механическое поведение образцов, подвергнутых ротационной ковке, характеризуется наличием плато, что типично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



а



б



в

Рис. 3. Микроструктура сплава ВТ6 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

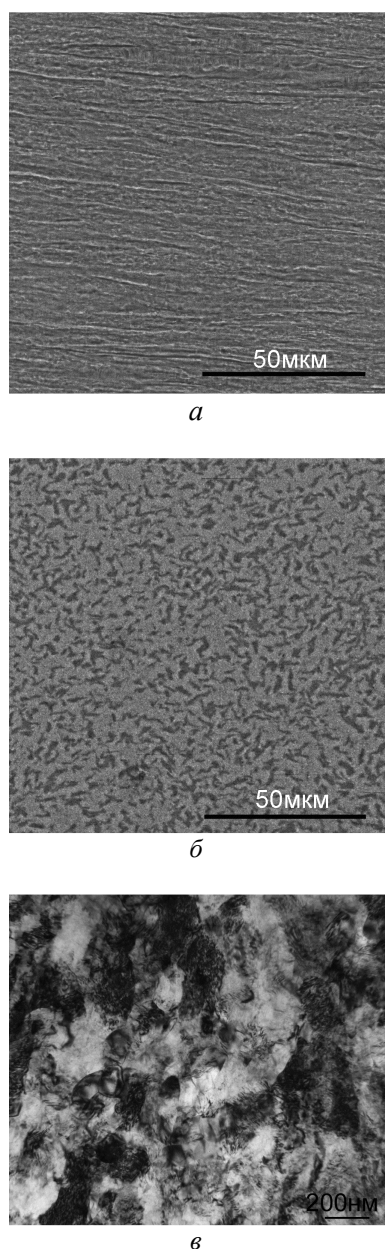


Рис. 4. Микроструктура сплава ВТ6 после ротационнойковки $e = 2,67$ ($\varnothing 60$ мм \rightarrow \rightarrow $\varnothing 35$ мм при 680°C и $\varnothing 35$ мм \rightarrow $\varnothing 15$ мм при 500°C): *a*, *б* – продольное, *б* – поперечное сечение; *a*, *б* – СЭМ изображения, фазовый контраст, *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°C (250 и 150 МПа соответственно) можно считать приемлемо низкими для использования стального штампового инструмента вместо дорогостоящего ЖС6, применяемого при высоких температурах.

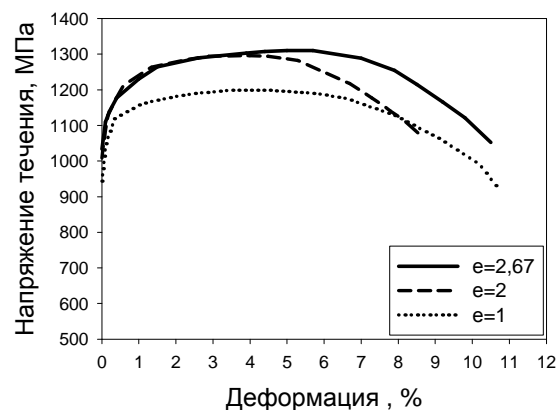


Рис. 5. Механические свойства на растяжение при комнатной температуре сплава ВТ6 после ротационнойковки

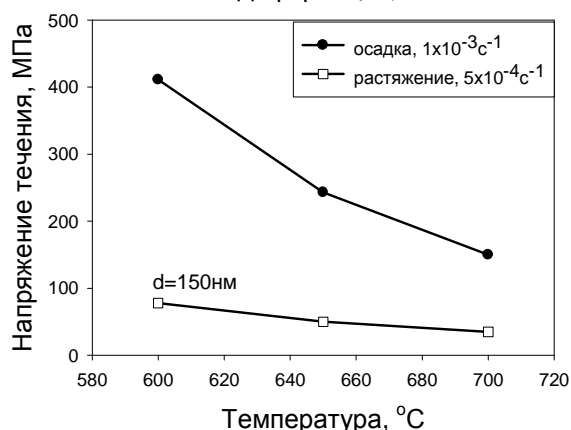
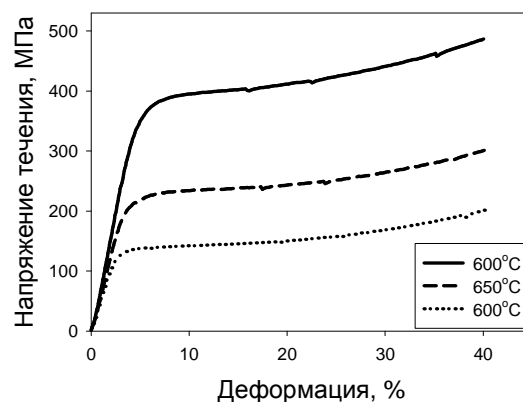


Рис. 6. Механические свойства на сжатие при повышенной температуре сплава ВТ6 после ротационнойковки

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 ЖСб 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