

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6, ПОЛУЧЕННОГО РАВНОКАНАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИЕМ*

В. В. Столяров

В статье показана возможность применения метода равноканального углового прессования для получения объемных заготовок с ультрамелкозернистой структурой и повышенными эксплуатационными и технологическими свойствами из высокопрочного титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V). Анализируется роль исходной структуры сплава.

Ключевые слова: пластическая деформация, микроструктура, прочность, деформируемость

Введение

В последние годы весьма актуальным стало равноканальное угловое прессование (РКУП). РКУП как метод интенсивной пластической деформации позволяет сформировать ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру в различных металлах и сплавах и, в результате, повысить их механические свойства [1, 2]. Однако его применение для труднодеформируемых материалов, какими являются титановые сплавы, требует специальных исследований, связанных с изучением роли исходного состояния, повышением деформируемости, локализации деформации [3–5]. Такие исследования частично были выполнены для РКУП сплава Ti-6Al-4V при повышенных температурах деформации (845–955 °C) с числом циклов $N = 1–2$, при этом была получена мелкозернистая структура с размером зерен 10 мкм [6]. В работе [7] были опубликованы результаты исследования влияния исходной структуры сплава Ti-6Al-4V на эволюцию структуры в процессе РКУП. Однако

деформационное поведение сплава и механические свойства полученных образцов при этом не изучались.

В данной статье представлены результаты исследования деформационной способности при осадке, формирования микроструктуры и механических свойств сплава ВТ6 с исходной структурой глобулярного и ламеллярного типа при неизотермическом РКУП. Показана возможность проведения многоциклового РКУП в интервале температур 600–700 °C для получения УМЗ структуры и повышения механических свойств в сплаве ВТ6.

Материалы и методы исследования

При исследованиях использовался сплав ВТ6 (табл. 1), являющийся российским аналогом сплава Ti-6Al-4V (ASTM F 136). Температура полиморфного $\alpha \rightarrow \beta$ превращения сплава равна 990 °C.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 08-08-00497, 08-08-92202) и агентства Рособразования (проекты 2.1.2/385 и ПЗ40).

Таблица 1

Химический состав (масс.%) сплава ВТ6

Ti	V	Al	C	N	Fe	Si	H
основа	4,8	6,6	0,02	0,01	0,13	0,04	0,002

Сплав был изготовлен в виде горячекатаных прутков диаметром 25 и 40 мм, соответственно, с глобулярной и ламеллярной исходной структурой.

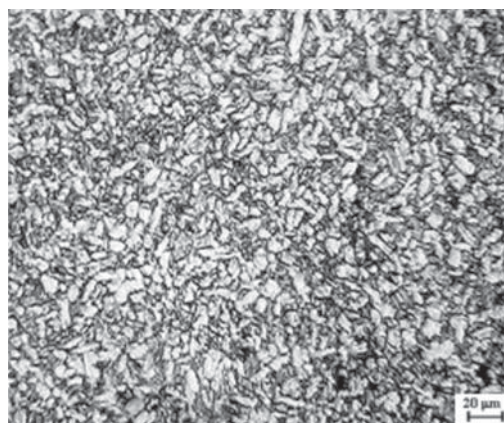
Глобулярная структура состояла преимущественно из равноосных зерен первичной α -фазы средним размером 6 мкм и тонкодисперсными пластинками вторичной α -фазы (рис. 1, а). Количество первичной α -фазы, по данным металлографического анализа, составило более 80%. В сплаве с ламеллярной структурой средний размер α -колоний и толщина пластин были соответственно равны 100 и 2 мкм (рис. 1, б).

Цилиндрические образцы для РКУП были механически обработаны до размера $\varnothing 20 \times 70$ мм. РКУП выполнялось с усилием P в оснастке с углом пересечения каналов $\Phi = 135^\circ$, при температуре заготовки $T_{\text{загот}} = 600\text{--}700^\circ\text{C}$ (рис. 2). При прессовании заготовок использовали

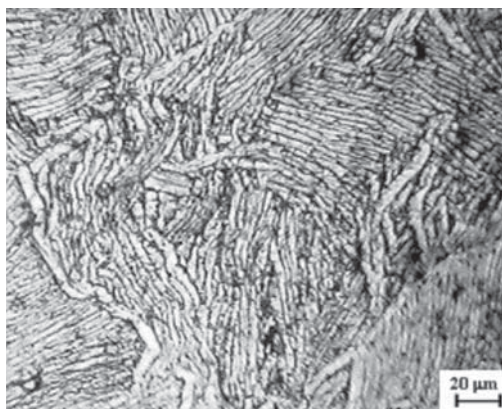
маршрут Вс, при котором вращение заготовки между циклами прессования осуществляется на 90° вокруг ее продольной оси. Перед РКУП заготовка прогревалась в печи до выбранной температуры в течение 15 мин, после чего она переносилась в оснастку для РКУП, нагретую до 500°C , и тотчас деформировалась со скоростью 6 мм/с. Отметим, что ограничение по теплостойкости материалов оснастки (не более 560°C) не позволяет обеспечить РКУП в изотермических условиях. После деформирования заготовка извлекалась из оснастки, подогревалась в печи в течение 10 мин для последующего цикла прессования. После последнего цикла прессования заготовка охлаждалась на воздухе.

Структурные исследования сплава выполнялись методами оптической металлографии и просвечивающей электронной микроскопии. Микротвердость (Hv) измерялась на приборе ПМТ-3М при нагрузке 1 Н в течение 10 с. Деформационное поведение сплава оценивали по результатам испытаний на осадку при температурах 600 и 700°C и скорости деформации $1,5 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ на цилиндрических образцах $\varnothing 8 \times 10$ мм, вырезанных вдоль оси прутка до и после РКУП. Образцы деформировали до половины начальной высоты, чтобы обеспечить истинную деформацию $\epsilon = \ln h_0 / h_k \leq 0,4$, где h_0 , h_k – начальная и текущая высота образца, и соответственно, условную деформацию ϵ не более 50%. После осадки образцы охлаждались на воздухе.

Механические испытания на растяжение выполнялись при комнатной температуре на



а



б

Рис. 1. Микроструктура сплава ВТ6 глобулярного (а) и ламеллярного (б) типа

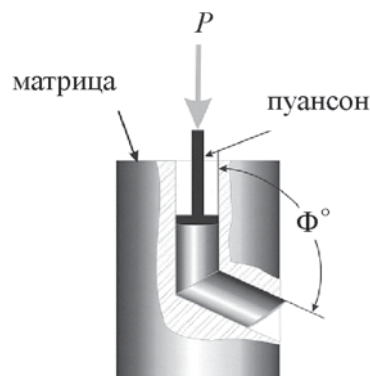


Рис. 2. Схема РКУП

плоских образцах сечением $0,7 \times 2,5$ мм и начальной расчетной длиной 5 мм на испытательной машине *Instron* при скорости перемещения захватов 0,5 мм/мин. Образцы для испытаний были вырезаны из центральной части прутка в направлении его продольной оси.

Диаграммы «нагрузка–перемещение» при осадке и растяжении пересчитывались для построения условных или истинных кривых «напряжение–деформация».

Результаты испытаний.

Деформационное поведение

В исходном состоянии (см. рис. 3, а) условные напряжения течения σ достигают максимума при $\epsilon \approx 0,05$, а затем быстро уменьшаются с увеличением степени деформации. Пиковые напряжения и эффект разупрочнения являются функцией температуры деформации и структуры. Например, при температуре 600 °С напряжения течения и эффект разупрочнения (85 МПа) не зависят от типа структуры. В то же время при 700 °С пиковое напряжение и эффект

разупрочнения (170 МПа) для ламеллярной структуры выше, чем для глобулярной. С повышением температуры деформации с 600 до 700 °С напряжения течения для обоих типов структур снижаются почти в два раза.

Как и при осадке исходного сплава напряжения течения РКУП сплава (см. рис. 3, б) достигают максимума, а затем уменьшаются и приближаются к стадии насыщения с увеличением степени деформации. По сравнению с исходным состоянием (см. рис. 3, а) максимальные напряжения течения РКУП сплава на 100–150 МПа ниже. Заметное влияние исходной глобулярной структуры на уменьшение напряжений течения проявляется при 700 °С, тогда как при 600 °С оно отсутствует.

Влияние морфологических особенностей исходной структуры на деформируемость сплава при РКУП отражено в табл. 2. Видно, что сплав с глобулярной структурой имеет лучшую деформируемость чем с ламеллярной, т.е. количество проходов и накопленная деформация до разрушения в несколько раз выше при одинако-

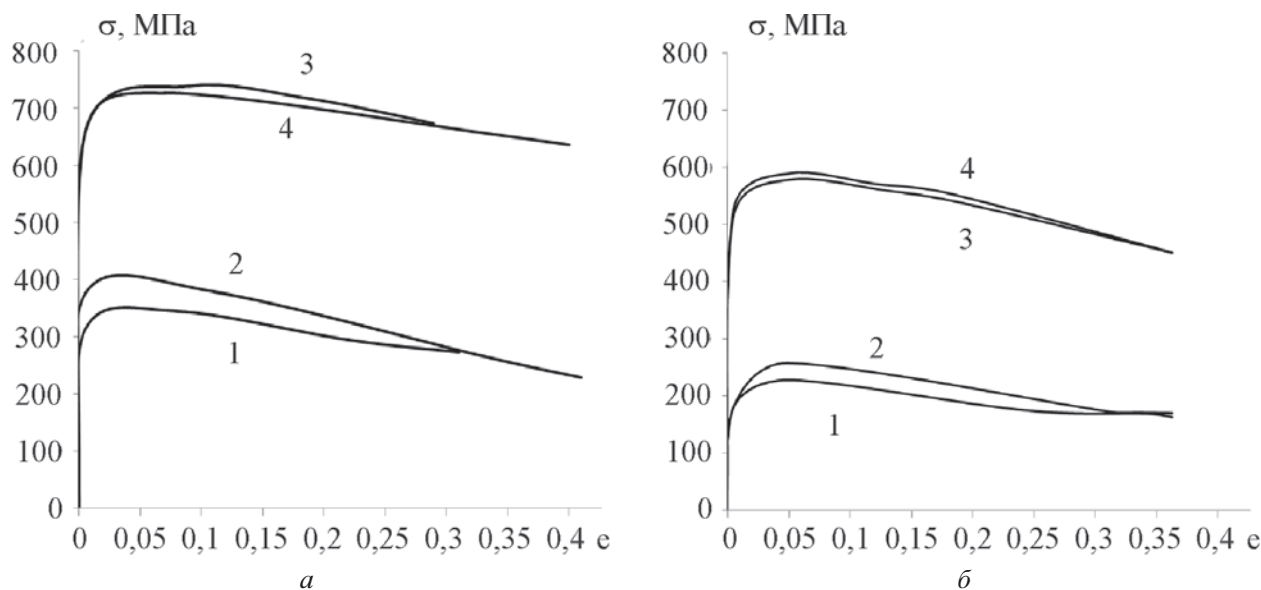


Рис. 3. Кривые σ – ϵ сплава с глобулярной (1, 3) и ламеллярной (2, 4) структурами при осадке: а – исходное состояние; б – после РКУП; 1, 2 – при $T = 700$ °С; 3, 4 – $T = 600$ °С

Таблица 2

Исходное состояние, структура и режимы РКУП

Обработка	Структура	$T_{\text{загот}}, ^\circ\text{C}$	Φ , град	N_{max}	ϵ
Состояние поставки	α -глобулярная	700	135	13	7,0
	α -ламеллярная	700	135	5	4,0
Закалка с 1010 °С	мартенситная	700	135	1	0,6

Примечание: N_{max} – максимальное число циклов до появления трещин.

вых режимах РКУП. Более того, только глобулярная структура в сплаве позволяет провести РКУП при наименьшей температуре 600 °С.

Отличительной особенностью деформационных кривых сплава ВТ6 является короткая стадия упрочнения и длинная стадия разупрочнения, что свидетельствует о соотношении равномерной и неравномерной деформации. Если резкое упрочнение связано с ограниченным количеством плоскостей скольжения в гексагональной плотноупакованной (ГПУ) решетке титана, то разупрочнение может быть обусловлено нестабильностью структуры при деформации.

Микроструктура

Поскольку разупрочнение и повышенную деформируемость обычно связывают с адиабатическим разогревом образца или возможными структурными изменениями, то рассмотрим микроструктуру деформированного сплава после осадки и РКУП.

При температуре осадки 600 °С большин-

ство зерен в исходной глобулярной структуре вытягиваются в направлении, перпендикулярном направлению осадки, и появляется заметная металлографическая текстура.

Отсутствуют видимые признаки сфероидизации или рекристаллизации структуры, а также дефекты типа трещин. Для обоих исходных состояний существенное измельчение структуры в процессе осадки не наблюдается.

С повышением температуры осадки до 700 °С микроструктура сплава с исходно глобулярной структурой заметно измельчается, при этом вытянутость зерен отсутствует (рис. 4, а). В сплаве с ламеллярной структурой после осадки пластинчатый характер структуры сохраняется (рис. 4, б). Так же как и при 600 °С характерной особенностью структуры является изгиб колоний α -фазы.

Картина микродифракции, снятая с областей размером 2 мкм², имеет вид колец с равномерно расположенными на них многочисленными рефлексами (рис. 5). Это свидетельствует о формировании УМЗ структуры, содержащей

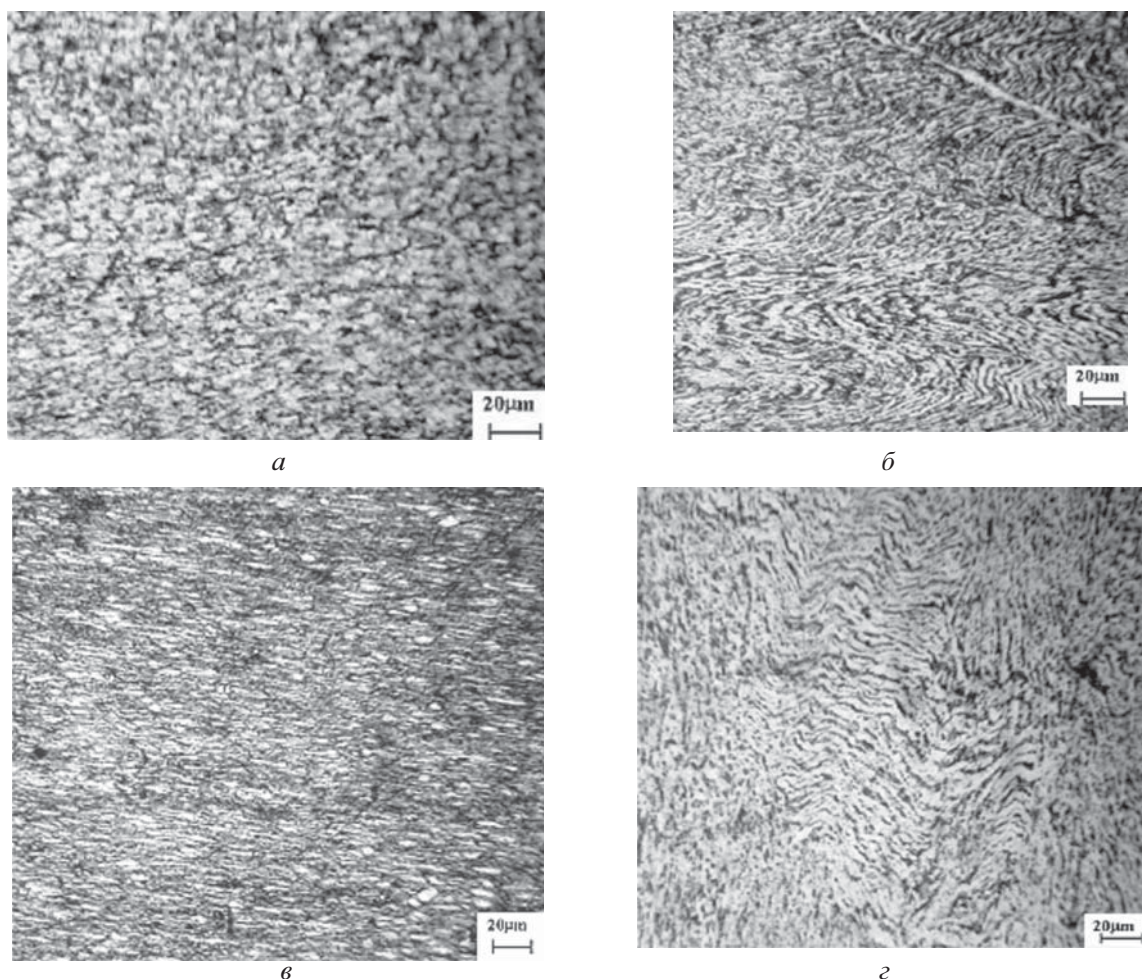


Рис. 4. Микроструктура сплава с исходной глобулярной (а, в) и ламеллярной (б, г) структурами при 700 °С: а, б – после осадки (направление осадки на рисунке – вертикальное); в, г – после РКУП

большеугольные границы зерен. Светлопольные изображения указывают, что размер зерен менее 0,5 мкм. Микроструктура характеризуется высокой плотностью различных дефектов (дислокаций, границ зерен/субзерен) и высоким уровнем внутренних напряжений.

Морфология структурных элементов преимущественно пластинчатая, размер пластин составляет 100 нм в толщину и 400–500 нм в длину. Однако в ряде областей одной и той же фольги имеются также участки с зеренной структурой.

Исследования термической стабильности полученных структур показали, что размер зерен и фазовый состав сплава сохраняется неизменным при отжиге в интервале температур 600–700 °С в течение 1 ч, что связано с повышенной температурой РКУП.

Микротвердость

Результаты измерения микротвердости сплава ВТ6 с исходной глобулярной структурой в продольном и поперечном сечениях темплета, вырезанного из средней части прутка, представлены в табл. 3.

Данные таблицы показывают, что РКУП

заготовки при 700 °С приводит к повышению микротвердости по сравнению с исходным состоянием почти в 1,5 раза, в то же время дальнейшее повышение температуры заготовки до 800 °С снижает микротвердость почти до исходного уровня.

РКУП заготовки в закаленном состоянии также повышает микротвердость, но меньше, чем для отожженного состояния. Различие в микротвердости деформированного прутка в продольном и поперечном сечениях незначительно, что свидетельствует об отсутствии заметной анизотропии механических свойств после РКУП.

Механические свойства

Механические свойства, а также кривые условных σ – ε («напряжение–деформация») при растяжении образцов сплава ВТ6 в исходном и РКУП состояниях, представлены в табл. 4 и на рис. 6, соответственно. Здесь же приведены данные для исходного состояния зарубежного аналога Ti-6Al-4V.

РКУП для всех исследованных состояний приводит к повышению предела прочности σ_b и предела текучести $\sigma_{0.2}$ на 10–20% по сравне-

Таблица 3

Микротвердость сплава с исходной глобулярной структурой

№	Состояние	Hv, МПа	
		продольное сечение	поперечное сечение
1	Исходное (отожженное)	2810±50	3020±70
2	1 + РКУП (700 °С)	4240±100	4000±120
3	1 + РКУП (800 °С)	3180±60	3020±80
4	Закаленное с 950 °С + РКУП (700 °С)	3630±80	3750±30

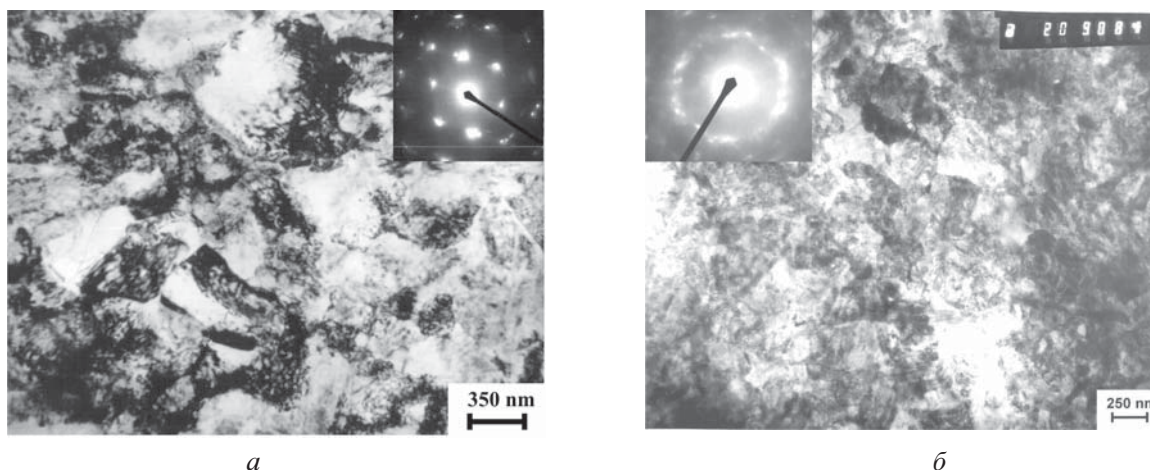


Рис. 5. Тонкая структура и картины микродифракции в поперечном (а) и продольном (б) сечениях сплава с глобулярной структурой после РКУП ($T_{\text{загот}} = 700$ °С; $N_{\text{max}} = 13$)

Таблица 4

Механические свойства сплава с глобулярной структурой

№	Состояние	σ_b , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %
1	Исходное (отожженное)	970	900	20
2	1 + РКУП ($T_{\text{загот}} = 700^\circ\text{C}$, $N_{\text{мах}} = 13$)	1160	1110	12
3	Ti-6Al-4 – состояние поставки *	951	879	17

* Зарубежный сплав (Extra Low Interstitial) Alloy (R56401) for Surgical Implant Applications. Стандартный образец $\varnothing 5 \times 25$ мм.

нию с исходным состоянием сплава. При этом удлинение δ остается достаточно высоким. Наибольшую прочность ($\sigma_b = 1160$ МПа) демонстрирует сплав после РКУП при $T_{\text{загот}} = 700^\circ\text{C}$. Повышение или снижение температуры заготовки, соответственно, до 800 и 600 $^\circ\text{C}$ приводит к снижению прочности сплава. Сравнение прочностных характеристик с ранее опубликованными данными для сплавов Ti-6Al-4V и ВТ6, подвергнутых традиционным методам упрочняющей обработки (высокотемпературная ковка [8], прокатка [9]), показывает заметное преимущество метода РКУП. Более высокая прочность 1300 МПа в аналогичном сплаве была получена методом всесторонней изотермическойковки [10], однако размер полученной заготовки был лишь $\varnothing 10 \times 15$ мм. С увеличением заготовки до размера $\varnothing 250 \times 350$ мм прочность сплава ВТ6, полученного этим же методом, не превышала 994 МПа [11]. В работе [12] было показано, что прочность сплава ВТ6 в наноструктурном состоянии после деформации кручения может достигать рекордно высоких значений – 1750 МПа.

Общим для обеих кривых на рис. 6 является малая равномерная деформация и наличие пика напряжений при деформации $\sim 1,5\text{--}2,0\%$. Для сплава с исходным состоянием кривая в макси-

муме напряжений имеет более пологий характер, по сравнению с состоянием после РКУП. Видно также, что основной вклад в удлинение вносит локализованная в шейке деформация. Отличительной особенностью РКУП состояний является более короткая стадия деформационного упрочнения.

Заключение

Проведенные исследования показали, что метод многопроходного РКУП массивных образцов сплава ВТ6 может быть осуществлен в интервале температур 600–700 $^\circ\text{C}$. При этом, ввиду значительного снижения напряжений течения, повышенной деформационной способности и заметного структурного измельчения, предпочтительно использовать сплав с исходной глобулярной структурой, по сравнению с ламеллярной.

РКУП при 700 $^\circ\text{C}$ позволяет сформировать достаточно однородную УМЗ структуру с размером зерен около 0,5 мкм, повысить микротвердость и прочность исходного сплава при комнатной температуре и снизить напряжения течения при повышенных температурах.

Список литературы

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы. – М.: Академкнига, 2007. – 398 с.
2. Рааб Г.И. Развитие научных основ технологий интенсивной пластической деформации и создание оборудования по схеме равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых металлических полуфабрикатов: автореф. дис. докт. техн. наук. – Уфа, 2009. – 37 с.
3. Сaitova Л.Р., Рааб Г.И., Валиев Р.З. и др. Влияние интенсивной пластической деформации на механическое поведение и структуру сплава Ti-6Al-4V // Деформация и разрушение материалов. 2005. № 3. С. 27–30.
4. Delo D.P., Semiatin S.L. Finite-element modeling of non-isothermal equal channel angular ex-

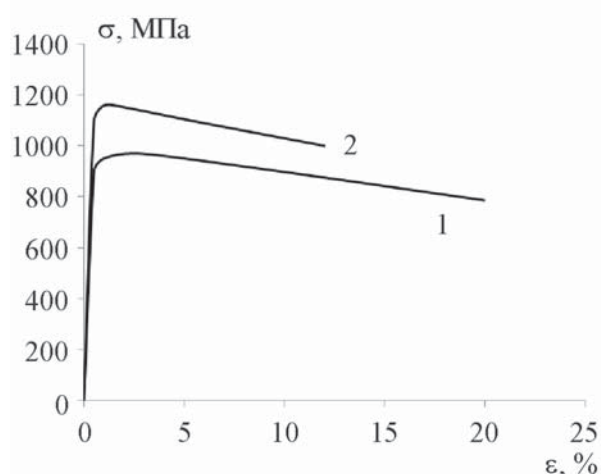


Рис. 6. Кривые σ – ϵ при растяжении заготовки из сплава ВТ6: 1 – исходное состояние с глобулярной структурой; 2 – после РКУП

- trusion // Metallurgical&Materials Trans. 1999. A. Vol. 30A, May. P. 1391–1402.
5. Semiatin S.L., Seetharaman V., Weiss I. Hot workability of titanium and titanium aluminide alloys: an overview // Mater. Sci&Eng. 1998. A 243. P. 1–24.
 6. Delo D.P., Bieler T.R., Semiatin S.L. Microstructure and texture evolution during equal channel angular extrusion of Ti-6Al-4V // Ultrafine Grained Materials: ed.: R.S. Mishra, S.L. Semiatin, C. Suryanarayana, N.N. Thadhani, T.C. Lowe. – MMS Society, 2000. P. 257.
 7. Effects of temperature and initial microstructure on the equal channel angular pressing of Ti-6Al-4V alloy / Y.G. Ko, W.S. Jung, D.H. Shin, C.S. Lee // Scripta Materialia. 2003. No. 48. P. 197–202.
 8. Strengthening of Ti-6Al-4V alloy forgings / X.K. Meng, Z.G. Liu, Y.G. Zhou, J.M. Liu, Z.Q. Wu // Materials Transactions, JIM. 1994. 35, 3. P. 189–191.
 9. Markovsky P.E. Preparation and properties of ultrafine (submicron) structure titanium alloys // Mater. Sci. Eng. 1995. A 203. L1–L4.
 10. Формирование субмикроструктурной структуры в титановых сплавах интенсивной пластической деформацией / С.В. Жеребцов, Р.М. Галеев, О.Р. Валиахметов и др. // Кузнечно-штамповочное производство. 1999. № 7. С. 17–22.
 11. Fine grain billet processing in titanium alloys / G.A. Salishcev, R.M. Galeev, O.R. Valiakhmetov, S.V. Zharebtsov, M.F.X. Gigliotty, B.P. Bewlay // Proceedings of the Int. Conf. «Titanium 99», St. Petersburg, Russia, June 7–11, 2000. P. 1563–1568.
 12. Mechanical properties of nanostructured titanium alloys processed using severe plastic deformation / V.V. Stolyarov, L.O. Shestakova, A.I. Zharikov, V.V. Latysh, R.Z. Valiev, Y.T. Zhu, T. Lowe // Proceedings of the Int. Conf. «Titanium 99», St. Petersburg, Russia, June 7–11, 2000. P. 466–472.

Материал поступил в редакцию 10.02.2010

**СТОЛЯРОВ
Владимир
Владимирович**

E-mail: vlstol@mail.ru
Тел. 8 (495) 623-42-37

Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Область научных интересов – физическое материаловедение, наноструктурные материалы. Автор более 250 научных работ.

Уважаемые читатели!

Журнал «Машиностроение и инженерное образование» входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора или кандидата наук.