



Валиахметов О. Р., Галеев Р. М., Мулюков Р. Р.
O. R. Valiakhmetov, R. M. Galeev, R. R. Mulyukov

**МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУФАБРИКАТОВ
ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ВСЕСТОРОННЕЙ
ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ КОВКЕ**

**MECHANICAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF SEMI-FINISHED PRODUCTS
OUT OF TITANIUM ALLOYS SUBJECTED TO MULTIPLE ISOTHERMAL FORGING**

Мулюков Радик Рафикович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, директор Института проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук (Россия, Уфа). E-mail: imsp@imsp.ru.

Mr. Radik R. Mulyukov – Doctor of Physics and Mathematics, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director Institute for Metals Superplasticity Problems of RAS (Russia, Ufa). E-mail: imsp@imsp.ru.

Галеев Рафаил Мансурович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Материаловедение мелкозернистых металлов и сплавов» Института проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук (Россия, Уфа). E-mail: galeyev@imsp.ru.

Mr. Rafail M. Galeev – PhD in Engineering, Head of the Laboratory «Material science of fine-grained metals and alloys», Institute for Metals Superplasticity Problems of RAS (Russia, Ufa). E-mail: galeyev@imsp.ru.

Валиахметов Олег Рязович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук (Россия, Уфа). E-mail: olegv@imsp.ru.

Mr. Oleg R. Valiakhmetov – PhD in Engineering, Institute for Metals Superplasticity Problems of RAS (Russia, Ufa). E-mail: olegv@imsp.ru.

Аннотация. Рассмотрен основной подход к формированию однородной глобулярной ультрамелкозернистой структуры в крупногабаритных полуфабрикатах из титановых сплавов. Представлены результаты прикладных исследований, выполненных в Институте проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук (ИПСМ РАН), по получению объёмных и листовых титановых полуфабрикатов с однородной ультрамелкозернистой структурой посредством деформационной обработки методом всесторонней изотермическойковки. Показано, что титановые сплавы с ультрамелкозернистой структурой могут проявлять эффект сверхпластической деформации при значениях температур на 200...350 °С ниже температурного интервала сверхпластичности для мелкозернистых титановых сплавов, обработанных по традиционным технологиям. При комнатной температуре ультрамелкозернистые титановые сплавы имеют повышенные прочностные и усталостные свойства.

Summary. The main approach to the formation of a homogeneous globular ultrafine-grained structure in large-sized semi-finished products out of titanium alloys is considered. The results of applied research performed in IMSP, for obtaining bulk and sheet titanium semi-finished products with homogeneous ultrafine-grained structure by means of multiple isothermal forging are presented. It is shown that ultrafine-grained titanium alloys can display an effect of superplastic deformation at temperatures below than that of fine-grained titanium ones processed by conventional technologies by 200...350 °C. At room temperature, ultrafine-grained titanium alloys have increased strength and fatigue properties.

Ключевые слова: титановый сплав, ультрамелкозернистая структура, всесторонняя изотермическаяковка, сверхпластичность, механические свойства.

Key words: titanium alloy, ultrafine-grained structure, comprehensive isothermal forging, superplasticity, mechanical properties.

УДК 669. 295: 621.785

Работа выполнена в рамках государственного задания Института проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук. Экспериментальные исследования выполнены на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

Титановые сплавы относятся к труднодеформируемым и дорогостоящим материалам, что стимулирует использование ресурсосберегающих технологий изготовления изделий, снижающих деформирующие усилия и повышающих коэффициент использования металла. К таковым относятся, например, объёмную штамповку при температурно-скоростных условиях сверхпластической деформации, сверхпластическую формовку (СПФ) листовых заготовок и совмещённую с диффузионной сваркой сверхпластическую формовку (СПФ/ДС) для изготовления пустотелых сложно-профильных панелей. Однако существенным недостатком указанных технологий для титановых сплавов являются высокие температуры (850...950 °С) реализации эффекта сверхпластичности в материале с обычной глобулярной мелкозернистой структурой (размер зёрен 5...15 мкм). Высокие температуры нагрева приводят к интенсивному окислению поверхности титанового материала и требуют изготовления технологической оснастки из дорогостоящих жаропрочных сплавов.

Между тем создание в титановых сплавах глобулярной ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры (размер зёрен ≤ 1 мкм) позволяет существенно, на 200...350 °С, понизить температурный интервал проявления сверхпластичности [1; 2]. Деформация титановых сплавов в условиях низкотемпературной сверхпластичности улучшает экономичность технологических процессов за счёт уменьшения толщины газонасыщенного слоя материала, удешевления и повышения стойкости штампового инструмента, снижения затрат энергии и материалов. Кроме того, титановые сплавы с УМЗ-структурой обладают улучшенными прочностными и усталостными свойствами [1 – 3].

В Институте проблем сверхпластичности металлов разработаны способы получения объёмных и листовых полуфабрикатов с однородной УМЗ-структурой из титановых сплавов [4; 5]. Перспективным способом деформационной обработки для получения глобулярной структуры, однородной по всему объёму крупногабаритной титановой заготовки, является так называемая «всесторонняя изотермическая ковка» (ВИК) [1; 2]. Следует отметить, что обработка титановых полуфабрикатов по схеме всесторонней ковки – это достаточно давно известный и широко используемый технологический процесс проработки их структуры [6]. Такой процесс деформационной обработки объёмных заготовок действительно относится к разряду ковочных, поскольку выполняется в интервале повышенных скоростей деформации ($10^1 \dots 10^2 \text{ с}^{-1}$) и является неизотермическим.

В разработанном ИПСМ РАН методе ВИК [2; 4] также применяются операции свободной ковки (осадка, вытяжка) на плоских бойках с многократной сменой направления деформирования заготовки. Однако как заготовка, так и бойки нагреты до температуры деформации и поэтому, очевидно, обработка заготовки является близким к изотермическому условию процессом деформации. Причём операции осадки и вытяжки осуществляются при пониженных скоростях деформации ($10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ с}^{-1}$) и, таким образом, термин «ковка» в данном случае является условным. Указанные специфические условия проведения обработки металла методом ВИК необходимы для реализации в материале структурных процессов динамической рекристаллизации, сверхпластичности и других термоактивированных процессов с целью получения в объёмной заготовке однородной и измельчённой микроструктуры с равноосными зёрнами.

Рассмотрим сущность деформационного метода ВИК. На рис. 1 схематично показан единственный цикл деформационной обработки, представляющий собой совокупность последовательных операций осадки заготовки в трёх ортогональных направлениях с последующей вытяжкой для придания заготовке приблизительно исходной формы и размеров. Причём в конце цикла деформирования возникает новое положение оси заготовки.

Выполнение последовательности данных операций обеспечивает цикличность деформационной обработки заготовки, благодаря чему описанный цикл ВИК можно снова воспроизводить, добиваясь полной проработки застойных зон и набирая необходимую степень деформации во всём объёме заготовки.



Рис. 1. Схема цикла всесторонней изотермическойковки

Таким образом, многократное повторение циклов ВИК при определённой температуре этапа обеспечивает наиболее однородное протекание динамической рекристаллизации и равномерную проработку структуры материала практически во всём объёме заготовки.

Метод ВИК обладает технологической привлекательностью, поскольку деформационную обработку методом ВИК выполняют на промышленном гидравлическом прессе, оснащённом штамповым блоком с нагреваемыми до температуры деформации плоскими бойками для обеспечения изотермического режима деформации.

Измельчение микроструктуры материала до ультрамелкозернистого состояния вплоть до наноразмерного уровня основано на поэтапном снижении температуры ВИК, при этом решающую роль имеет деформируемость материала при температуре обработки. В связи с этим ВИК проводится с последовательным снижением температуры деформации от одного этапаковки к другому. Выполнение циклов ВИК при более низкой температуре этапа способствует дальнейшему измельчению микроструктуры заготовки, что, приводя к повышению технологической пластичности материала, позволяет снова снизить температуру следующего этапа ВИК. Таким образом, ВИК с поэтапным снижением температуры даёт возможность измельчить зёрненную структуру материала вплоть до наноразмерного диапазона, избегая при этом его разрушения. Температура заключительного этапа ВИК выбирается исходя из требуемого размера зёрен в микроструктуре материала. Следует отметить, что в процессековки по мере измельчения микроструктуры материал переходит в состояние сверхпластического течения, что дополнительно способствует однородности формирующейся микроструктуры [1].

Рассмотрим на примере титанового сплава ВТ6 (Ti–6Al–4V) получение объёмных и листовых крупногабаритных полуфабрикатов с УМЗ-структурой. Для работы использовали пруток сплава ВТ6 диаметром 230 мм с температурой полного полиморфного $\alpha \Rightarrow \beta$ превращения 990 °С. Перед деформационной обработкой мерные заготовки $\varnothing 230 \times 240$ (мм) подвергали нагреву в температурном интервале β -области (1010 ± 10 °С) и последующему охлаждению в воде для получения в материале тонкопластинчатой ($\alpha + \beta$)-структуры, которая является наиболее благоприятной исходной структурой в двухфазных титановых сплавах с точки зрения однородного развития при горячей деформации рекристаллизационных процессов, ведущих к трансформации пластинчатой структуры в глобулярную структуру и её измельчению [3]. Дальнейшая обработка заготовок состояла из многоэтапной всесторонней изотермическойковки на индукционно нагреваемых плоских бойках, начиная с температурного этапа при значении температуры, равном 700 °С, и заканчивая при значении температуры этапа, равном 600 °С, со средней скоростью деформации $5 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Суммарная степень истинной деформации на каждом этапе составляла 2...2,5. Исходя из силовых параметров процессаковки при значении температуры обработки, равном 600 °С, предельный объём заготовки из сплава ВТ6, которую можно было деформировать на имеющемся в ИПСМ РАН гид-

равлическом прессе усилием 16 МН, соответствовал кованой заготовке диаметром 200 мм и длиной 300 мм, внешний вид которой представлен на рис. 2, а.

Полученная заготовка имела однородную глобулярную структуру с размером зёрен, равным 400...500 нм. На рис. 2 также показаны другие наноструктурированные объёмные титановые полуфабрикаты, полученные путём всесторонней изотермическойковки.

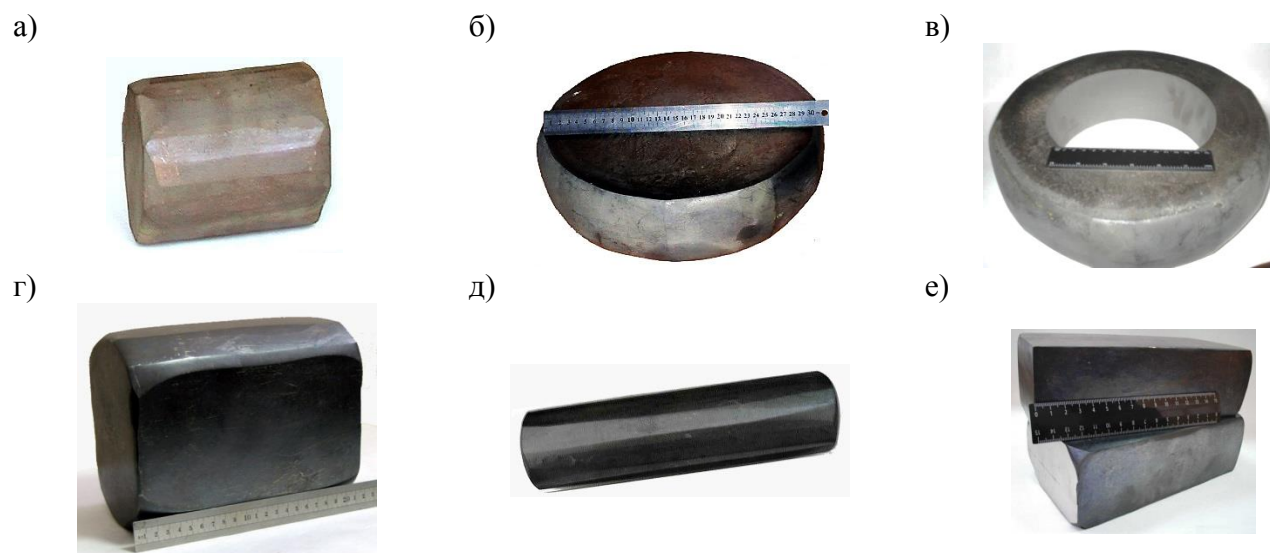


Рис 2. Полуфабрикаты с ультрамелкозернистой структурой из титанового сплава ВТ6 (а, б, в, г) и технического титана ВТ1-0 (д, е): а – биллет $\varnothing 200 \times 300$ (мм); б – диск $\varnothing 320 \times 100$ (мм); в – кольцо $\varnothing_{\text{внеш}} 320$ мм, $\varnothing_{\text{внутр}} 200$ мм, Н 80 мм; г – плита $200 \times 170 \times 100$ мм; д – биллет $\varnothing 80 \times 350$ (мм); е – плиты $160 \times 100 \times 60$ мм

Механические испытания образцов, вырезанных из кованой наноструктурной заготовки (см. рис. 2, а) в радиальном и тангенциальном направлениях, показали близкие прочностные и пластические характеристики (см. табл. 1), что свидетельствует об изотропности механических свойств кованого материала. Следует отметить, что в наноструктурном состоянии титановый материал имеет повышенные прочностные и усталостные свойства. Так, в обычном мелкозернистом состоянии сплав ВТ6 даже после термического упрочнения закалкой и старением демонстрирует почти при том же уровне пластичности заметно меньшую (на ~30 %) прочность (см. табл. 1).

Таблица 1
 Механические свойства (20 °С) наноструктурной заготовки из сплава ВТ6

Материал		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	σ_{-1} , МПа
После ковки (d=400 нм)	Радиальное направление	1360	1350	7	62	500
	Тангенциальное направление	1355	1335	7	61	500
После закалки и старения (d=10 мкм)		1050	980	9	35	380

Более высокая прочность наноструктурного сплава ВТ6 сохраняется в интервале эксплуатационных для этого материала температур, то есть до ~350 °С [7]. Дальнейшее повышение температуры приводит к резкому снижению прочности, повышению пластических характеристик и проявлению эффекта сверхпластичности при температурах выше ~550 °С, что на 300...350 °С ниже температурного интервала сверхпластичности обычного мелкозернистого материала.

Характеристики низкотемпературной сверхпластичности технического титана и некоторых его сплавов с УМЗ-структурой представлены в табл. 2.

Таблица 2

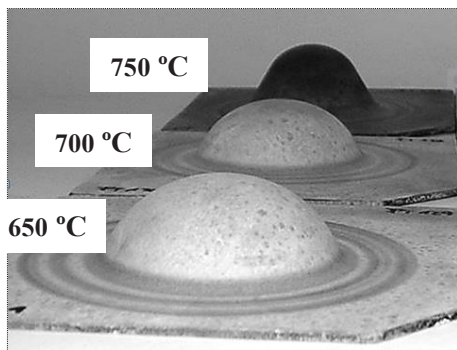
Характеристики сверхпластичности титана и его сплавов

Материал	d, мкм	t, °C	$\dot{\epsilon}$, с ⁻¹	σ , МПа	δ , %	m
Технический титан BT1-0	0,1	450	1×10^{-4}	105	115	0,3
	10	600	3×10^{-4}	120	140	0,26
Сплав BT8 (Ti-6,7Al-4,7Mo)	0,1	575	2×10^{-4}	165	1200	0,45
	5	800	5×10^{-4}	80	650	0,4
Сплав BT6 (Ti-6Al-4V)	0,3	650	7×10^{-4}	70	800	0,44
	5	800	5×10^{-4}	40	600	0,4
Сплав BT30 (Ti-11Mo-5,5Sn-4Zr)	0,3	550	5×10^{-4}	130	390	0,46
	5	725	3×10^{-4}	0,3	180	0,3

Наноструктурные объёмные заготовки из титанового сплава, изготовленные всесторонней изотермической ковкой, могут служить исходным материалом для получения листовых полуфабрикатов с высокой однородностью структуры [5]. При этом тёплую прокатку осуществляют в регламентированном интервале температур, в котором обеспечивается необходимая технологическая пластичность и сохраняется УМЗ-структура материала.

Так, путём прокатки кованных заготовок из сплава BT6 в интервале значений температур, равном 550...650 °C, были изготовлены листы промышленного размера (1500 мм длиной, 500 мм шириной и 2 мм толщиной) [8]. При таких условиях прокатки в листовом материале сохраняется нанометрический размер и равноосная форма зёрен, а также формируется базисная текстура, определяющая малую величину плоскостной анизотропии его механических характеристик. Наноструктурный лист из сплава BT6 в интервале значений температур, равном 700...750 °C, и скоростей деформации $10^{-4} \dots 10^{-3}$ с⁻¹ имеет приемлемые для технологии СПФ напряжения течения величиной 15...30 МПа, которые являются типичными для обычного промышленного мелкозернистого листа сплава BT6 (размер зёрен 4...7 мкм) при более высоких значениях температур деформации, равных 900...920 °C. В отличие от промышленного листа наноструктурный листовый материал равномерно сверхпластически формируется при значениях температур, равных 650...750 °C (см. рис. 3, а, б), а также диффузионно сваривается и образует качественное твердофазное соединение при значениях температур, равных 750...800 °C, что позволяет значительно снизить температуру технологических процессов СПФ и СПФ/ДС [9].

а)



б)

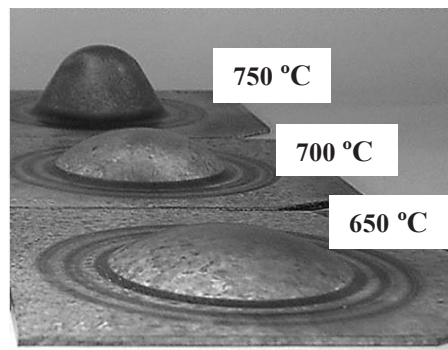


Рис. 3. Листовые образцы из сплава BT6 после формовки в конусную матрицу при температурах 650, 700 и 750 °C: а – наноструктурный лист; б – промышленный лист

Таким образом, результаты прикладных исследований, выполненных в ИПСМ РАН, показывают возможность получения объёмных и листовых титановых полуфабрикатов с однородной УМЗ-структурой посредством деформационной обработки методом всесторонней изотермическойковки. Титановые полуфабрикаты с УМЗ-структурой способны к сверхпластической деформации при температурах на 200...350 °С ниже температурного интервала проявления эффекта сверхпластичности для мелкозернистого титанового материала, обработанного по традиционным технологиям. При комнатной температуре титановые сплавы в наноструктурном состоянии имеют повышенные прочностные и усталостные свойства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: эксперимент, теория, технологии / Р. Р. Мулюков, Р. М. Имаев, А. А. Назаров [и др.]; под ред. Р. Р. Мулюкова. - М.: Наука, 2014. - 284 с.
2. Мулюков, Р. Р. Развитие принципов получения и исследование объёмных наноструктурных материалов в ИПСМ РАН / Р. Р. Мулюков // Российские нанотехнологии. - 2007. - Т. 2(7-8). - С. 38-53.
3. Салищев, Г. А. Формирование субмикроструктурной структуры в титане и титановых сплавах и их механические свойства / Г. А. Салищев, Р. М. Галеев, С. П. Малышева [и др.] // Металловедение и техническая обработка металлов. - 2006. - № 2. - С. 19-26.
4. Пат. 2134308 Российская Федерация, МПК⁷ С22F 1/18. Способ обработки титановых сплавов / О. А. Кайбышев, Г. А. Салищев, Р. М. Галеев, Р. Я. Лутфуллин, О. Р. Валиахметов; заявитель и патентообладатель ИПСМ РАН. - № 96120958/02; заявл. 18.10.1996; опубл. 10.08.1999. Бюл. № 22. - 2 с.
5. Пат. 2224047 Российская Федерация, МПК⁷ В21В3/00. Способ изготовления листовых полуфабрикатов из титановых сплавов / О. Р. Валиахметов, Р. М. Галеев, О. А. Кайбышев, Г. А. Салищев; заявитель и патентообладатель ИПСМ РАН. - № 2002114893/02; заявл. 05.06.2002; опубл. 20.02.2004. Бюл. № 5. - 2 с.
6. Полуфабрикаты из титановых сплавов / В. К. Александров, Н. Ф. Аношкин, Г. А. Бочвар [и др.]; под ред. Н. Ф. Аношкина. - М.: Металлургия, 1979. - 512 с.
7. Салищев, Г. А. Механические свойства титанового сплава ВТ6 с микрокристаллической и субмикроструктурными структурами / Г. А. Салищев, Р. М. Галеев, С. В. Жеребцов [и др.] // Металлы. - 1999. - № 6. - С. 84-87.
8. Галеев, Р. М. Субмикроструктурный лист из титанового сплава ВТ6 для низкотемпературной сверхпластической формовки / Р. М. Галеев // Металлы. - 2005. - № 6. - С.19-24.
9. Kaibyshev, O. A. Advanced superplastic forming and diffusion bonding of titanium alloy / O. A. Kaibyshev, R. V. Safiullin, R. Ya. Lutfullin, O. R. Valiakhmetov, R. M. Galeev, A. Dutta, T. Raghu, G. G. Saha // Materials Science and Technology. - 2006. - Vol. 22(3). - P. 343-348.