

PACS: 62.20.-x

А.И. Коршунов, А.А. Смоляков, Т.Н. Кравченко, И.В. Коротченкова,  
И.И. Каганова

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V ELI ПОСЛЕ РКУП И КОМПЛЕКСНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

ФГУП «Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»  
пр. Мира, 37, г. Саров, Нижегородская обл., 607190, Россия

Статья поступила в редакцию 23 сентября 2012 года

*Дан анализ изменения механических свойств титанового сплава Ti-6Al-4V ELI при последовательном добавлении к равноканальному угловому прессованию (РКУП) экструзии, предварительной термообработки и заключительного стабилизирующего отжига. Экспериментально показано, что комплексная термомеханическая обработка, включающая в себя все вышеперечисленные технологические операции, позволяет получить высокие прочностные характеристики с приемлемым уровнем пластических свойств.*

**Ключевые слова:** титановый сплав Ti-6Al-4V ELI, равноканальное угловое прессование, экструзия, термообработка, механические свойства

### Введение

Титановый сплав Ti-6Al-4V ELI является аналогом титанового сплава ВТ6 и также относится к ( $\alpha + \beta$ )-титановым сплавам мартенситного класса. Однако в отличие от ВТ6 титановый сплав Ti-6Al-4V ELI содержит значительно меньше посторонних примесей и используется преимущественно для изготовления медицинских имплантатов. Большое практическое значение имеют высокие прочностные свойства этого сплава. Одним из эффективных способов их повышения является формирование в сплаве наноструктуры методами интенсивной пластической деформации, например РКУП. Как правило, в этом случае наблюдается значительная потеря характеристик пластичности. Добавление к интенсивной пластической деформации традиционных методов термомеханической обработки может позволить получить наряду с высокими прочностными характеристиками приемлемые значения пластических свойств.

### Материал для исследований

Для исследований были изготовлены прутки  $\varnothing 20$  mm в соответствии с требованиями ASTM F136 методом горячей прокатки. Поставленные прутки

были термообработаны при 700°C в течение 1 h с последующим охлаждением на воздухе. Структура сплава Ti–6Al–4V ELI в исходном отожженном состоянии представляет собой смешанную глобулярно-пластинчатую структуру с размером глобулярных зерен  $\alpha$ -фазы в поперечном сечении 5–8  $\mu\text{m}$ , в продольном – 8–20  $\mu\text{m}$ . Соотношение  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз в сплаве составляет 90 и 10% соответственно [1].

### Равноканальное угловое прессование

Исследовали две заготовки после РКУП, выполненного на штампе с диаметрами каналов 20 mm, по следующим режимам:

1) 4 прохода по маршруту  $B_C$ , угол пересечения каналов 120°, температура прессования  $T = 600^\circ\text{C}$ ;

2) 8 проходов по маршруту  $B_C$ , угол пересечения каналов 120°,  $T = 700^\circ\text{C}$ .

Механические свойства определяли на стандартных образцах  $\varnothing 3$  mm при комнатной температуре и скорости деформации  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Полученные значения приведены в табл. 1. Там же для сравнения представлены результаты для титанового сплава Ti–6Al–4V ELI в исходном отожженном состоянии. Полученные значения механических свойств после РКУП показывают значительный рост характеристик прочности и падения пластичности. Обращает на себя внимание тот факт, что прессование при более низкой температуре с меньшим количеством циклов обеспечивает примерно те же значения механических свойств, что и прессование при температуре на 100°C выше и при количестве циклов больше в два раза.

Таблица 1

Механические свойства при растяжении титанового сплава Ti–6Al–4V ELI в исходном состоянии и после РКУП

Состояние материала	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_B$	$\delta_5$	$\psi$	$\delta_{UN}$
	N/mm <sup>2</sup>		%		
Исходное отожженное	935	1020	16.7	45.4	7.6
РКУП (4- $B_C$ , $\alpha = 120^\circ$ , $T = 600^\circ\text{C}$ )	1180	1210	11.0	53.0	2.1
РКУП (8- $B_C$ , $\alpha = 120^\circ$ , $T = 700^\circ\text{C}$ )	1160	1180	9.8	48.0	2.1

### РКУП с дополнительной экструзией

Следующим шагом в повышении прочностных характеристик является экструзия после РКУП. Для исследований был взят пруток титанового сплава Ti–6Al–4V ELI, подвергнутый комплексной обработке по такому режиму:

1) 8 проходов РКУП по маршруту  $B_C$ ,  $\alpha = 135^\circ$ ,  $T = 700^\circ\text{C}$ ;

2) 4 прохода РКУП по маршруту  $B_C$ ,  $\alpha = 135^\circ$ ,  $T = 600^\circ\text{C}$ ;

3) экструзия с  $\varnothing 19.2$  mm до  $\varnothing 13.5$  mm, в том числе: 1 цикл при  $T = 600^\circ\text{C}$  и 2 цикла при  $T = 20^\circ\text{C}$ .

Полученные результаты приведены в табл. 2 в сравнении со свойствами сплава после РКУП. Как видно, экструзия после РКУП привела к существенному (более чем на 10%) увеличению прочностных характеристик, при этом параметры пластичности понизились.

Таблица 2  
**Механические свойства при растяжении титанового сплава Ti-6Al-4V ELI после РКУП и экструзии**

Состояние материала	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_B$	$\delta_5$	$\Psi$	$\delta_{UN}$
	N/mm <sup>2</sup>		%		
РКУП (8- $B_C$ , $\alpha = 120^\circ$ , $T = 700^\circ\text{C}$ )	1160	1180	9.8	48.0	2.1
РКУП и экструзия	1310	1330	8.5	38.5	1.8

### Предварительная термообработка и стабилизирующий отжиг

Как показали недавние исследования [2], предварительная подготовка структуры сплава Ti-6Al-4V ELI оказывает положительное влияние на механическое поведение сплава после интенсивной пластической деформации. Термическая обработка заготовок (закалка и последующее старение) приводит к формированию тонкопластинчатой структуры с объемной долей первичных  $\alpha$ -зерен, в несколько раз меньшей по сравнению с состоянием поставки. После интенсивной пластической деформации термообработанных заготовок, очевидно за счет повышения дисперсности и однородности формирующейся ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры, отмечается увеличение прочностных характеристик и некоторый рост пластичности. Стабилизирующий заключительный отжиг позволяет снять оставшиеся микронапряжения, что способствует улучшению механических свойств.

Для исследований были взяты прутки  $\varnothing 14.2 \times 120$  mm, подвергнутые комплексной термомеханической обработке по следующему режиму:

- 1) выдержка при  $950^\circ\text{C}$  в течение 40 min с последующей закалкой в воду;
- 2) старение при  $675^\circ\text{C}$  в течение 4 h;
- 3) 4 прохода РКУП по маршруту  $B_C$ ,  $\alpha = 120^\circ$ ,  $T = 600^\circ\text{C}$ ;
- 4) экструзия с  $\varnothing 19.2$  mm до  $\varnothing 14.2$  mm, в том числе: 3 цикла при  $T = 300^\circ\text{C}$  и 1 цикл при  $T = 20^\circ\text{C}$ .

Микроструктура материала после комплексной термомеханической обработки характеризуется значительной разориентировкой границ фрагментов  $\alpha$ -фазы со средним размером  $\sim 300$  nm. При этом области с УМЗ-структурой составляют до 90% основы материала. В продольном сечении структурные элементы вытянуты вдоль направления деформации. Соотношение  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз в сплаве изменилось и составило 95 и 5% соответственно за счет частичного растворения и распада  $\beta$ -фазы в процессе интенсивной пластической деформации.

Часть заготовок после комплексной термомеханической обработки была подвергнута стабилизирующему отжигу при  $500^\circ\text{C}$  в течение 2 h. Механические свойства для этих двух состояний приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Механические свойства при растяжении титанового сплава Ti–6Al–4V ELI после комплексной термомеханической обработки и последующего отжига**

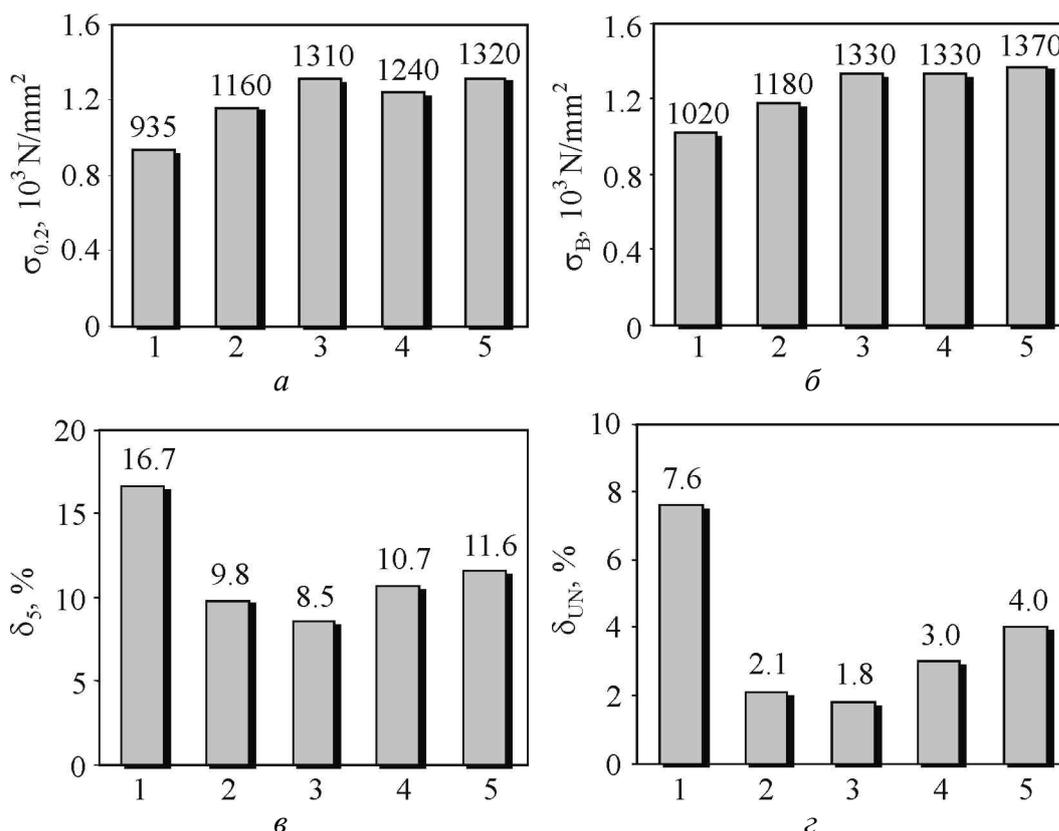
Состояние материала	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_B$	$\delta_5$	$\psi$	$\delta_{UN}$
	N/mm <sup>2</sup>		%		
Комплексная термомеханическая обработка	1240	1330	10.7	47.2	3.0
Комплексная термомеханическая обработка и последующий отжиг	1320	1370	11.6	43.8	4.0

Сравнивая полученные результаты со свойствами после РКУП и экструзии, необходимо отметить, что введение предварительной термообработки и стабилизирующего отжига хотя и не привело к существенному изменению прочностных характеристик, но при этом позволило значимо увеличить основные пластические характеристики ( $\delta_5$  и  $\delta_{UN}$ ).

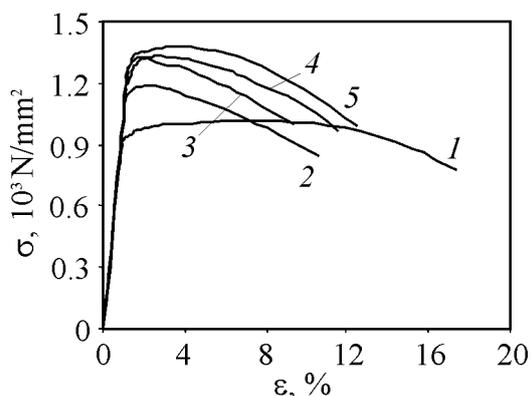
**Эволюция механических свойств**

Полная динамика изменения механических характеристик титанового сплава Ti–6Al–4V ELI в процессе добавления технологических операций приведена на рис. 1, 2. Для титанового сплава Ti–6Al–4V ELI РКУП и экструзия, технологические операции, реализующие интенсивные пластические деформации, приводят к значительному росту прочностных характеристик: условного предела текучести на 40% и предела прочности на 30%. В то же время относительное удлинение падает в 2 раза, а равномерное удлинение – в 4 раза. Введение дополнительных термообработок не оказывает существенного влияния на прочностные характеристики. Добавление к РКУП и экструзии только закалки и старения приводит даже к небольшому падению условного предела текучести на общем фоне роста относительного и равномерного удлинений. И, наконец, полный набор термомеханических операций, включающий закалку, старение, РКУП, экструзию и отжиг позволяет еще немного повысить прочностные характеристики, получив при этом их максимальные значения, а также увеличить относительное и равномерное удлинение в сравнении с термомеханической обработкой без стабилизирующего отжига.

В итоге увеличение условного предела текучести составило 40%, предела прочности – 35%, при этом уменьшение относительного удлинения составило 40%, а равномерного удлинения – примерно 50%. Относительное сужение осталось практически на том же уровне. Основной результат введения дополнительных термообработок заключается в улучшении равномерного удлинения. Так, без дополнительных термообработок равномерное удлинение падает относительно исходного отожженного состояния в 4 раза, с дополнительными термообработками – только в 2 раза.



**Рис. 1.** Механические свойства титанового сплава Ti-6Al-4V ELI (*а* – условный предел текучести, *б* – предел прочности, *в* – относительное удлинение, *г* – равномерное удлинение) для разных состояний: *1* – исходное отожженное состояние, *2* – РКУП, *3* – РКУП и экструзия, *4* – комплексная термомеханическая обработка, *5* – комплексная термомеханическая обработка и стабилизирующий отжиг



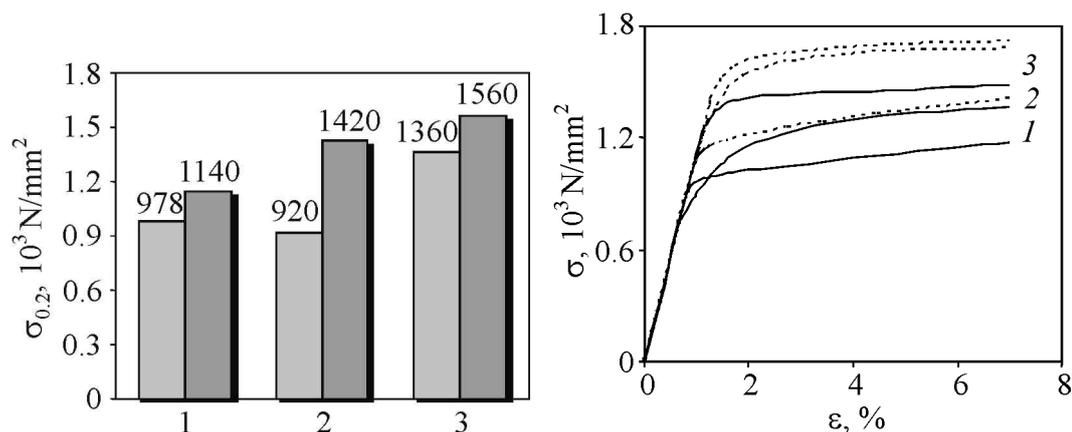
**Рис. 2.** Условные диаграммы деформирования титанового сплава Ti-6Al-4V ELI для разных состояний: *1* – исходное отожженное состояние, *2* – РКУП; *3* – РКУП и экструзия, *4* – комплексная термомеханическая обработка, *5* – комплексная термомеханическая обработка и стабилизирующий отжиг

### Анизотропия при сжатии

Известно, что после РКУП материал приобретает значительную анизотропию механических свойств, в частности условного предела текучести при сжатии и микротвердости [3,4]. Приняв априори осевую симметрию механических свойств, исследования титанового сплава Ti-6Al-4V ELI на сжатие проводили на образцах, вырезанных вдоль и поперек оси прутка.

Изучали образцы  $\varnothing 5 \times 7.5$  mm при комнатной температуре и скорости деформации  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Для исследования был взят материал в исходном отожженном состоянии, после комплексной термомеханической обработки, включающей закалку, старение, РКУП и экструзию, а также после комплексной термомеханической обработки и стабилизирующего отжига.

Значения условного предела текучести при сжатии для разных исследованных состояний приведены на рис. 3, а соответствующие им диаграммы сжатия – на рис. 4. Во всех состояниях наблюдается анизотропия, равная  $\sim 17\%$  в исходном отожженном состоянии и достигающая более 50% после комплексной термомеханической обработки, заканчивающейся экструзией. При этом происходит рост условного предела текучести при сжатии поперек оси прутка и падение (даже ниже исходного состояния) вдоль оси прутка. Это связано с проявлением эффекта Баушингера, обусловленного возникновением при экструзии растягивающих напряжений вдоль оси заготовки [5,6]. Последующий стабилизирующий отжиг приводит к росту условного предела текучести при сжатии для обоих направлений (вдоль и поперек оси прутка) и снижению анизотропии до уровня даже чуть ниже исходного состояния.



**Рис. 3.** Условный предел текучести при сжатии титанового сплава Ti–6Al–4V ELI вдоль (□) и поперек (■) оси прутка для разных состояний: 1 – исходное отожженное состояние, 2 – комплексная термомеханическая обработка, 3 – комплексная термомеханическая обработка и стабилизирующий отжиг

**Рис. 4.** Условные диаграммы сжатия титанового сплава Ti–6Al–4V ELI для разных состояний: 1 – исходное отожженное состояние, 2 – комплексная термомеханическая обработка, 3 – комплексная термомеханическая обработка и стабилизирующий отжиг; сплошная кривая – вдоль оси прутка, штриховая – поперек оси

### Заключение

Для титанового сплава Ti–6Al–4V ELI комплексная термомеханическая обработка, включающая в себя закалку, старение, РКУП, экструзию и заключительный стабилизирующий отжиг позволяет получить максимальные значения условного предела текучести при растяжении и предела прочности

с приемлемым уровнем пластических свойств. Важную роль в формировании механических свойств играет заключительный стабилизирующий отжиг. Применение заключительного отжига позволило после комплексной термомеханической обработки, заканчивающейся экструзией, повысить в два раза равномерное удлинение и снизить в три раза анизотропию условного предела текучести при сжатии.

Работа выполнена в рамках проектов МНТЦ № 2398р и № 3208р. Авторы выражают благодарность сотрудникам ИФПМ (г. Уфа) Р.З. Валиеву, И.П. Семенову и Г.И. Раабу за предоставленные материалы для исследований при выполнении вышеуказанных проектов.

1. *I.P. Semenova, L.R. Saitova, G.I. Raab, A.I. Korshunov, Y.T. Zhu, T.C. Lowe, R.Z. Valiev, Mater. Sci. Forum 503–504, 757 (2006).*
2. *И.П. Семенова, Автореф. дис. ... д-ра техн. наук, Институт физики перспективных материалов при Уфимском государственном авиационном техническом университете, Уфа (2011).*
3. *A. Korshunov, T. Kravchenko, L. Polyakov, A. Smolyakov, I. Vedernikova, A. Morozov, Mater. Sci. Eng. A493, 160 (2008).*
4. *A. Korshunov, I. Kaganova, L. Polyako, T. Kravchenko, Mater. Sci. Forum 584–586, 487 (2008).*
5. *Я.Б. Фридман, Механические свойства металлов, Ч. 1. Деформация и разрушение, Машиностроение, Москва (1974).*
6. *В.В. Столяров, Заводская лаборатория. Диагностика материалов 72, № 9, 45 (2006).*

*О.И. Коршунов, А.А. Смоляков, Т.М. Кравченко, И.В. Коротченкова, И.И. Каганова*

## МЕХАНИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ Ti–6Al–4V ELI ПІСЛЯ РККП І КОМПЛЕКСНОЇ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

Наведено аналіз зміни механічних властивостей титанового сплаву Ti–6Al–4V ELI при послідовному додаванні до рівноканального кутового пресування (РККП) екструзії, попередньої термообробки та завершального стабілізуючого відпалу. Експериментально показано, що комплексна термомеханічна обробка, яка включає всі вищеперелічені технологічні операції, дозволяє отримати високі міцнісні характеристики з прийнятним рівнем пластичних властивостей.

**Ключові слова:** титановий сплав Ti–6Al–4V ELI, рівноканальне кутове пресування, екструзія, термообробка, механічні властивості

*A.I. Korshunov, A.A. Smoliakov, T.N. Kravchenko, I.V. Korotchenkova, I.I. Kaganova*

## MECHANICAL PROPERTIES OF THE Ti-6Al-4V ELI TITANIUM ALLOY AFTER ECAP AND COMPLEX THERMOMECHANICAL TREATMENT

For the Ti-6Al-4V ELI alloy, equal-channel angular pressing (ECAP), extrusion, and other technological procedures of intensive plastic deformations result into considerable growth of strength properties: its conventional yield strength goes up by 40% and its ultimate strength becomes 30% higher. At the same time, its relative elongation is halved, and its uniform elongation is reduced by 4 times. Additional thermal treatment does not have a significant effect on strength properties. Preliminary quenching and aging added to the ECAP results in a little drop in the conventional yield strength when the general growth of relative and uniform elongations is observed. And finally, a full set of thermomechanical operations including quenching, aging, ECAP, extrusion and annealing allows further upgrading in the strength properties to their maximum values and getting an increase in relative and uniform elongations if compared to thermomechanical treatment without stabilizing annealing.

All examined states demonstrated anisotropy of the conventional yield strength at compression, which equals to 17% in the initial annealed state and is higher than 50% after complex thermomechanical treatment followed-up by extrusion. The growth of conventional yield strength was also observed when the sample was compressed across the axis of the bar, and its decrease, even lower than the value of the initial state, was found when the bar was compressed along its axis. Followed-up stabilizing annealing results into the rise of conventional yield strength at compression for both directions tried (along and across the bar axis) and the reduction of anisotropy down to the level of the initial state and lower.

**Keywords:** Ti-6Al-4V ELI titanium alloy, equal-channel angular pressing, extrusion, thermal treatment, mechanical properties

**Fig. 1.** Mechanical properties of the Ti-6Al-4V ELI titanium alloy ( $\sigma$  – conventional yield strength;  $\bar{\sigma}$  – ultimate strength,  $\epsilon$  – relative elongation;  $\epsilon_z$  – uniform elongation) in different states: 1 – the initial annealed state, 2 – ECAP, 3 – ECAP and extrusion, 4 – complex thermomechanical treatment, 5 – complex thermomechanical treatment and stabilizing annealing

**Fig. 2.** Conventional deformation diagrams for the Ti-6Al-4V ELI titanium alloy in different states: 1 – the initial annealed state, 2 – ECAP, 3 – ECAP and extrusion, 4 – complex thermomechanical treatment, 5 – complex thermomechanical treatment and stabilizing annealing

**Fig. 3.** Conventional yield strength at compression of the Ti-6Al-4V ELI titanium alloy along ( $\square$ ) and across ( $\blacksquare$ ) the axis of the bar in different states: 1 – the initial annealed state, 2 – complex thermomechanical treatment, 3 – complex thermomechanical treatment and stabilizing annealing

**Fig. 4.** Conventional compression diagrams for the Ti-6Al-4V ELI titanium alloy in different states: 1 – the initial annealed state, 2 – complex thermomechanical treatment, 3 – complex thermomechanical treatment and stabilizing annealing; solid line – along and dashed line – across the axis of the bar