

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА BT22

Константинова Т. Е., Рюмшина Т. А.

*Донецкий физико-технический институт им. А.Галкина НАН Украины,*

*Донецк, Украина*

*[tatjana@konstant.fti.ac.donetsk.ua](mailto:tatjana@konstant.fti.ac.donetsk.ua)*

Работа посвящена исследованию эволюции структуры и механизмов деформации в титановом сплаве BT22 в зависимости от фазового состава. Установлено, что деформация сплава, находящегося в однофазном 100% $\beta$  – состоянии, происходит по ротационному механизму путем образования мартенсита деформации. Деформация двухфазного  $\alpha + \beta$  сплава происходит по изгибному механизму. Показано, что исходное состояние структуры существенно влияет на величину упругого модуля, что может быть причиной смены механизмов деформации.

### ВВЕДЕНИЕ

Титановые сплавы, благодаря удачному сочетанию ряда свойств (прочности, жаростойкости и плотности), в настоящее время широко используются в различных областях промышленности, в частности, в космической и авиационной. Несмотря на значительное количество работ, посвященных исследованию этих сплавов, возможности повышения их свойств еще не исчерпаны, механизмы деформирования сплавов в должной мере не изучены. [1]. Осознанное управление структурой и, как следствие, механическими свойствами, возможно только при знании механизмов деформации. Настоящая работа посвящена исследованию эволюции структуры сплава BT22 в условиях деформирования с использованием высокого давления (ВД) и в сочетании с термической обработкой, а также выяснению механизмов деформирования сплава в зависимости от фазового состава.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Промышленный титановый сплав BT22 содержит в своем составе 5%Al, 5%Mo, 5%V, 1%Cr, 1%Fe. В работе для исследований отобраны два фазовых состава: однофазное 100%  $\beta$  – состояние (ОЦК), полученное после отжига 900 °С, (1,5 час) и закалки в воду, и двухфазное 55% $\alpha$  + 45% $\beta$  – состояние (ГПУ + ОЦК), полученное двухступенчатым отжигом при 850 °С (1,5 час), охлаждение с печью до 750 °С, затем отжиг при 750°С (3 часа), охлаждение на воздухе. Подготовленные образцы подвергались деформированию с применением высокого давления (гидроэкструзии) до степеней деформации  $\epsilon = 50\%$ . Исследовалось влияние деформации на структуру и механические свойства сплава. Контроль за состоянием структуры осуществлялся с помощью методов оптической (ОМ), электронной микроскопии (ТЭМ). Механические свойства ( $\sigma_{0.2}$ ,  $\sigma_{\lambda}$ ,  $\psi$ ,  $\delta$ ) определялись при растяжении стандартных образцов до разрушения со скоростью 20 мп/мин.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Эволюция структуры и механизмы деформация однофазного 100%  $\beta$  сплава.** Результаты исследования структуры сплава методом оптической микроскопии показывают, что после закалки от 900 °С в сплаве формируется равноосное крупное зерно диаметром 0.15 мм. ТЭМ выявляет полосчатый контраст в изображении  $\beta$ -фазы и диффузные течи на микродифракции от нее, вероятно, связанные с закономерным распределением легирующих элементов по типу модулированных структур [2].

При деформировании с использованием ВД в благоприятно ориентированных зернах появляются полосы скольжения (рис.1а), число которых растет с повышением степени деформации, появляются полосы деформации в новых зернах, наблюдается искривление полос у границ зерен. Исследования структуры сплава в 100%  $\beta$ -состоянии с помощью рентгеноструктурного анализа, проведенные в работе [3], показали, что наблюдаемые полосы скольжения представляют собой орторомбический  $\alpha''$ -мартенсит, ориентационно связанный с исходной  $\beta$ -матрицей. На ТЭМ- снимках мартенсит наблюдается в виде пластин и пакетов, имеющих, как правило, сложную внутреннюю «пакетную» структуру (рис.1б). Интересно, что мартенсит наблюдается только в диапазоне деформаций от 5 до 15 %. При возрастании деформации свыше 30% рентгенографически мартенсит уже не обнаруживается. Вероятно, при развитой пластической деформации образуется  $\alpha''$ -мартенсит, но затем следует быстрое обратное  $\alpha'' \rightarrow \beta$  превращение, в результате которого  $\beta$ - зерно существенно фрагментируется [2].

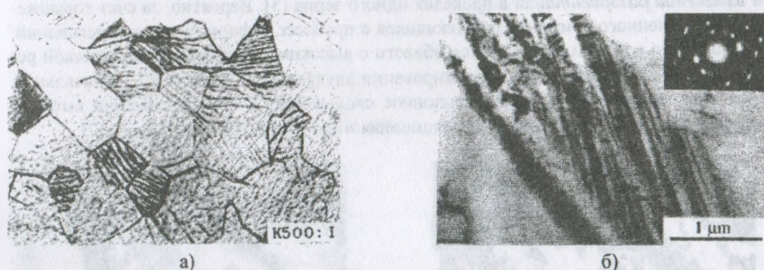


Рис. 1. Структура 100%  $\beta$  – сплава:  
а) после ВД - деформации  $\epsilon = 10\%$ , (ОМ)    б)  $\epsilon = 30\%$ , (ТЭМ)

Изменение структуры сплава после деформации ВД оказывает существенное влияние на механические характеристики сплава. Предел прочности  $\sigma_b$  и предел текучести  $\sigma_{0.2}$  немонотонно возрастают, а сужение в шейке  $\psi$  и удлинения  $\delta$  убывают (рис.2). В области деформаций 10 - 20% наблюдается плато, которое свидетельствует в пользу действия в этом диапазоне мартенситного механизма.

Полученные результаты показывают, что при деформации однофазного сплава диссипация запасенной энергии происходит в виде фазового превращения по мартенситному типу с образованием границ с дискретно меняющейся ориентацией в пределах исходного зерна. Согласно [4], такой механизм деформации следует считать *ротационным*.

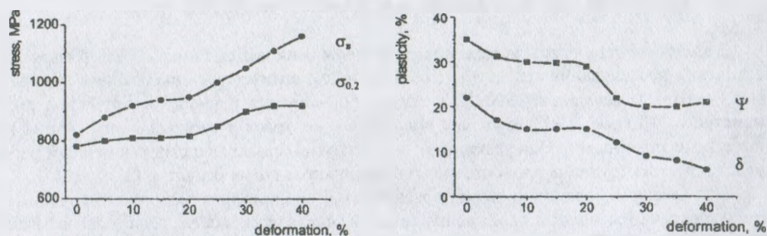


Рис.2. Влияние деформации ВД на механические характеристики 100%  $\beta$ -сплава

**Структура и механизмы деформации в двухфазном 45%  $\beta$  + 55%  $\alpha$ -сплаве.** В двухфазном состоянии 45%  $\beta$  + 55%  $\alpha$  сплав более стабилен. Первичная  $\alpha$ -фаза представлена колониями крупных неравноосных частиц. В  $\beta$ -фазе наблюдается полосчатый контраст, связанный с расслоением сплава по химическому составу, т.е. с образованием в матрице двух ОЦК-твердых растворов с различным периодом решетки [2]. После деформирования ВД  $\beta$ -зерна вытягиваются, изменяется ориентация и размеры  $\alpha$ -пластин, происходит фрагментация зерен (рис.3, а). При ТЭМ наблюдении обнаруживается присутствие экстинкционных контуров (рис.3, б), которые говорят о непрерывном изменении разориентации в пределах одного зерна [5]. Вероятно, за счет торможения трансляционного движения рождающихся в процессе деформирования дислокаций, и их скопления в группы, образуются области с высоким изгибом кристаллической решетки [6]. Таким образом, при деформировании двухфазного  $\beta$ + $\alpha$  сплава на начальных этапах происходит обычное дислокационное скольжение, а при достижении высокой плотности дислокаций ( $\epsilon \sim 30\%$ ) трансляционная мода сменяется на изгибную [7].

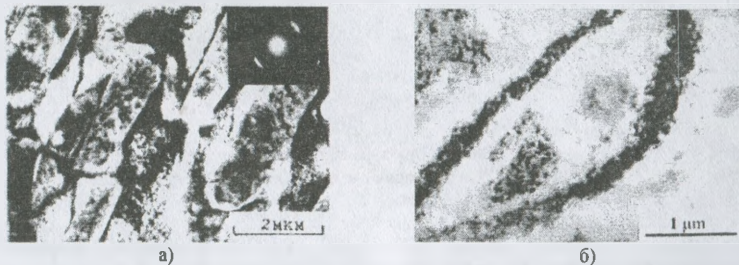


Рис.3. Структура двухфазного сплава 45% $\beta$  + 55% $\alpha$  после деформации  $\epsilon = 30\%$  (ТЭМ) а) фрагментация зерен, б) изгибный экстинкционный контур в  $\beta$ -зерне.

Зависимости механических характеристик от степени деформации для двухфазного сплава показаны на рис.4. Наблюдается некоторое различие характера кривых в двухфазном сплаве по сравнению с однофазным. Отсутствует плато на кривой прочности в области небольших деформаций. Если в однофазном состоянии удлинение обеспечивается за счет однородной деформации всего образца, то в двухфазном большой вклад вносит локализация пластического течения в шейке.

Измерения модуля Юнга, проведенные в данном сплаве методом внутреннего трения, показали, что в двухфазном сплаве модуль Юнга равен 110 ГПа, в то время, как в однофазном состоянии – 68 ГПа [8]. Такое существенное понижение модуля в титановых сплавах наблюдалось также авторами работы [9], а состояние с пониженным модулем получило название «резинового» (“rubber-state”). Мы полагаем, что столь существенное изменение модуля связано с перераспределением легирующих элементов между  $\alpha$  и  $\beta$  фазами, а именно, с обогащением  $\beta$ -фазы атомами легирующих примесей при выделении  $\alpha$ -фазы.

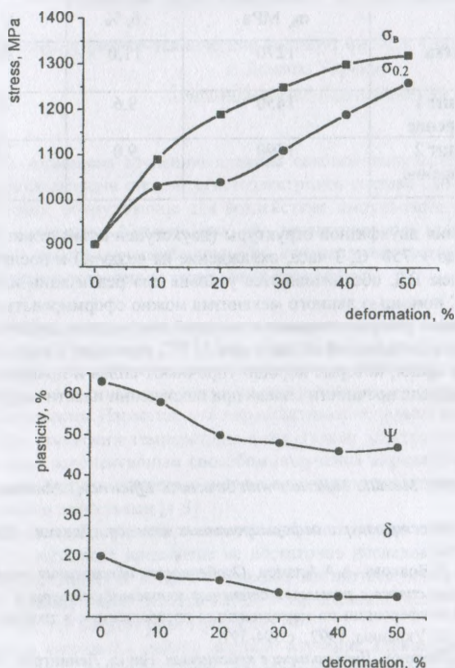


Рис. 4. Влияние деформации ВД на механические характеристики двухфазного 45%  $\beta$  + 55%  $\alpha$ -сплава

Изменение состава и тонкой структуры одно- и двухфазных состояний сплава является причиной изменения упругого модуля, и, как следствие, причиной различия в механизмах деформации. Состояние с высокой жесткостью (высокомодульное состояние) позволяет реализоваться изгибному механизму деформации. При низких значениях модуля («резиновое» состояние) жесткость понижена, растет сдвиговая неустойчивость сплава, и реализуется возможность для образования мартенсита деформации (ротационного механизма).



## ВЫВОДЫ

Полученные представления о механизмах пластической деформации позволили целенаправленно выбрать режим обработки и получить хорошее сочетание прочности и пластичности. Установлено, что такими условиями обработки являются ступенчатый отжиг в сочетании с промежуточной деформацией и последующим старением (см. табл.).

| Режимы обработки                                            | $\sigma_b$ , МПа | $\delta$ , % | $\Psi$ , % |
|-------------------------------------------------------------|------------------|--------------|------------|
| Стандартная обработка<br>$\epsilon = 0$                     | 1270             | 11,0         | 36,0       |
| Предлагаемый вариант 1<br>отжиг + $\epsilon$ 30% + старение | 1450             | 9,6          | 29,7       |
| Предлагаемый вариант 2<br>Отжиг + $\epsilon$ 50% + старение | 1590             | 9,0          | 23,5       |

После формирования двухфазной структуры (двухступенчатый отжиг 850 °С, 1,5 час, охлаждение с печью + 750 °С, 3 часа, охлаждение на воздухе) и последующей деформации с применением ВД, обеспечиваются условия для реализации изгибного механизма деформации. С помощью данного механизма можно сформировать структуру с непрерывно меняющимися разориентациями и высокой плотностью дислокаций. Дальнейшее старение сплава в двухфазной области при 515°С, приводит к выделению высокодисперсных частиц  $\alpha$ -фазы, которые хорошо упрочняют сплав и приводят к существенному повышению предела прочности сплава при сохранении пластичности.

## Список литературы

1. D.B.Miracle. *NATO ARW, Metallic Materials with Structural Efficiency*, Abstracts, Kyiv-2003, p.9.
2. Т.Е. Константинова. *Мезоструктура деформированных сплавов*. Донецк, ДонФТИ НАН Украины, 1997, - 170 с.
3. Т.Е. Константинова, Г.К. Волкова, А.А. Адамец. *Особенности образования мартенсита деформации в титановом сплаве с различной степенью метастабильности  $\beta$ -фазы*. В кн. Доклады Всесоюзной конференции по мартенситным превращениям в твердом теле. Киев, Ин-т металлофизики АН Украины, 1992, с.394-397.
4. В.И.Владимиров, А.Е. Романов. *Дислокации в кристаллах*. Наука, Ленинград, 1986. - 224 с.
5. Т.Е. Константинова, Н.В.Токий, В.Б.Примислер, А.А.Добриков. *Анализ экстинкционного контура от локального изгиба кристаллической решеткой с дипольной кривизной*. В кн. Электронная микроскопия и прочность материалов. Киев, ИПМ, 1994, с.60-70.
6. Н.В. Токий, Т.Е.Константинова, В.Н. Варюхин. *Дислокационная модель центральной области локального изгиба кристаллической решетки*. Металлофизика и новейшие технологии, 1998, т.20, №11, с. 71-79.
7. Т.Е.Константинова, В.Б.Примислер, А.А.Добриков. *Изгиб кристаллической решетки как самостоятельный вид пластической деформации*. Металлофизика и новейшие технологии, 1996, т.18, № 10, с.68-78.
8. Т.Е.Константинова, Т.А.Рюмшина, И.К.Носолев, Н.П.Пилипенко. *Исследование внутреннего трения в титановом сплаве BT22*. ФТВД, 2003, т.13, N 1, с.60-66.
9. Takashi Saito, Tadahiko Furuta, Junh-Hwan Hwang. *Science*, Vol.300, 18 April 2003, p. 464