

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT22

Уникальные свойства титановых сплавов определяют широкие возможности их применения в авиастроении. Особенно эффективно их применять для изготовления высоконагруженных деталей, а также деталей, работающих в условиях нагрева до температур 300...600 °С.

В авиастроении широко применяется высоколегированный титановый сплав VT22. Из него изготавливают детали шасси, детали крепления силовой установки, используют для изготовления основных элементов силового набора, высоконагруженных болтов, шпилек и т.д. Поэтому изучение режимов упрочняющей термической обработки титанового сплава VT22 является актуальным.

Сплав VT22 является двухфазным  $\alpha$ + $\beta$ -сплавом, т.е. может эффективно упрочняться закалкой с последующим старением. Его химический состав: 4,5...5,9% Al, 4,0...5,5% Mo, 4,0...5,5% V, 0,5...2,0% Cr, 0,5...1,5% Fe. Таким образом,  $\alpha$ - и  $\beta$ -твердые растворы достаточно сильно упрочнены Al, Mo, V, Cr и Fe. Сплав характеризуется высокой гетерогенностью структуры ( высокая дисперсность смеси  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз в связи с примерно одинаковым их количеством в структуре сплава), обладает существенным эффектом упрочняющей обработки и высокой прокаливаемостью.

Температура ( $\alpha$ + $\beta$  $\leftrightarrow$  $\beta$ )-превращения сплава VT22 зависит от изменения в пределах допуска химического состава и колеблется в интервале 840...870 °С.

В работе исследовано влияние режимов закалки и старения на структуру и свойства титанового сплава VT22. С этой целью образцы подвергались закалке при температурах ниже, равной и выше температуры ( $\alpha$ + $\beta$  $\leftrightarrow$  $\beta$ )-превращения: 750, 850 и 900 °С с последующим старением при температурах 400, 500 и 600 °С.

Анализ микроструктуры образцов проведен с помощью растрового электронного микроскопа с системой энергодисперсионного микроанализа РЭМ-106.

Металлографические исследования показали, что при температурах закалки 750 и 850 °С образуется структура, состоящая из  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз (рис. 1). Структура сплава представлена мелкими частицами  $\alpha$ -фазы на фоне  $\beta$ -матрицы, причем по мере повышения температуры закалки частицы  $\alpha$ -фазы укрупняются, коагулируют, расстояние между ними увеличивается, а количество  $\beta$ -фазы увеличивается по сравнению с количеством  $\alpha$ -фазы.

При закалке с температуры 900 °С, что выше температуры  $\alpha+\beta\leftrightarrow\beta$ -превращения, структура представляет собой  $\beta$ -фазу в форме крупных равноосных зерен (рис. 2).

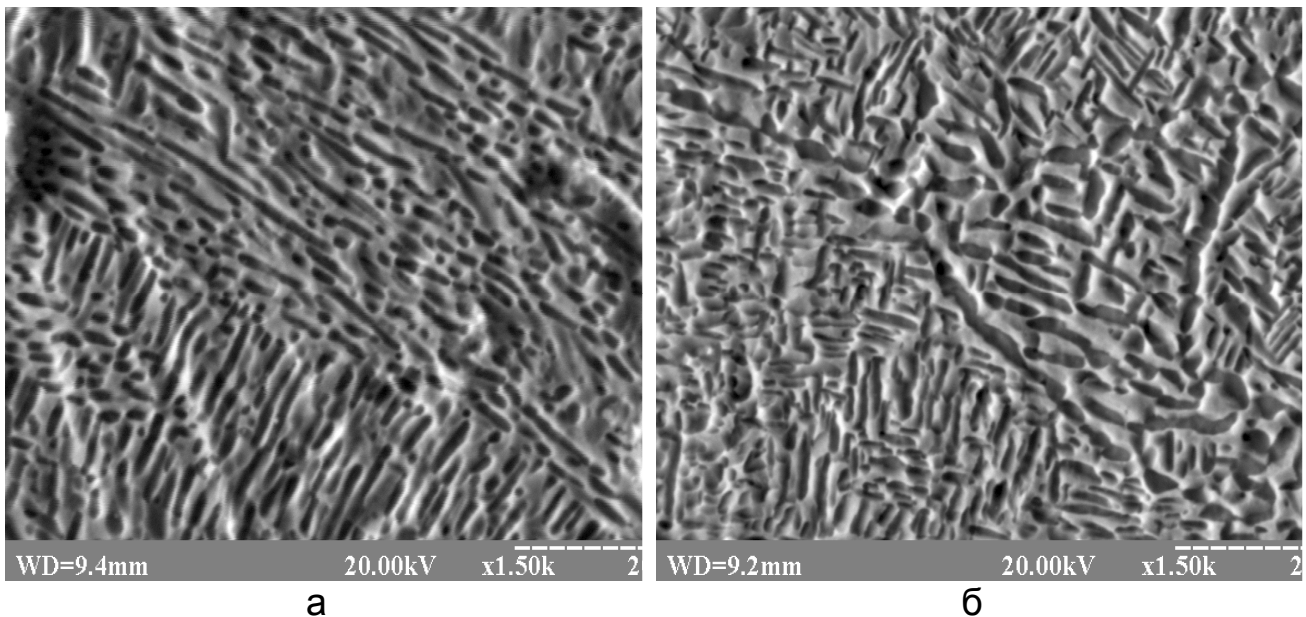


Рисунок 1 – Микроструктура сплава ВТ22 в закаленном состоянии, вода, x1500: а –  $t = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; б –  $t = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$

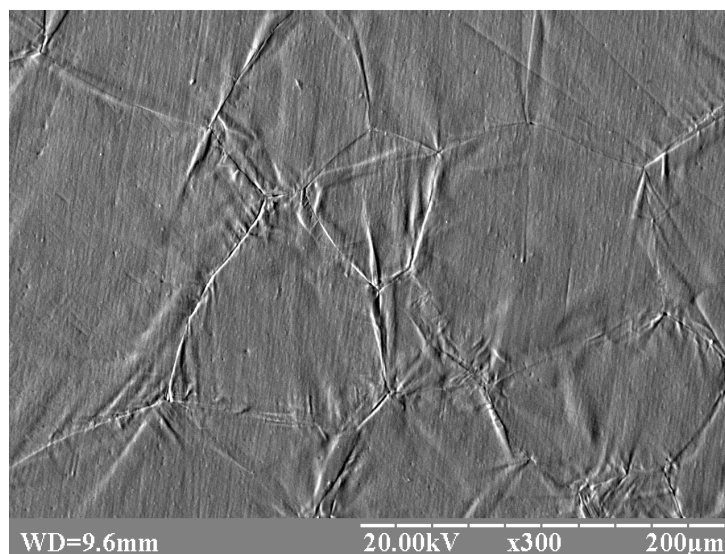


Рисунок 2 – Микроструктура сплава ВТ22, закаленного при температуре 900 °С, вода, x300

В ходе исследования с использованием растрового электронного микроскопа с системой энергодисперсионного микроанализа РЭМ-106 проанализировано распределение легирующих элементов в  $\alpha$ - и  $\beta$ -твердых растворах. Поскольку после термической обработки  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазы характеризуются высокой дисперсностью, то для анализа выбран

образец с наибольшими размерами фаз, а именно, закаленный образец при температуре 850 °С (рис. 3).

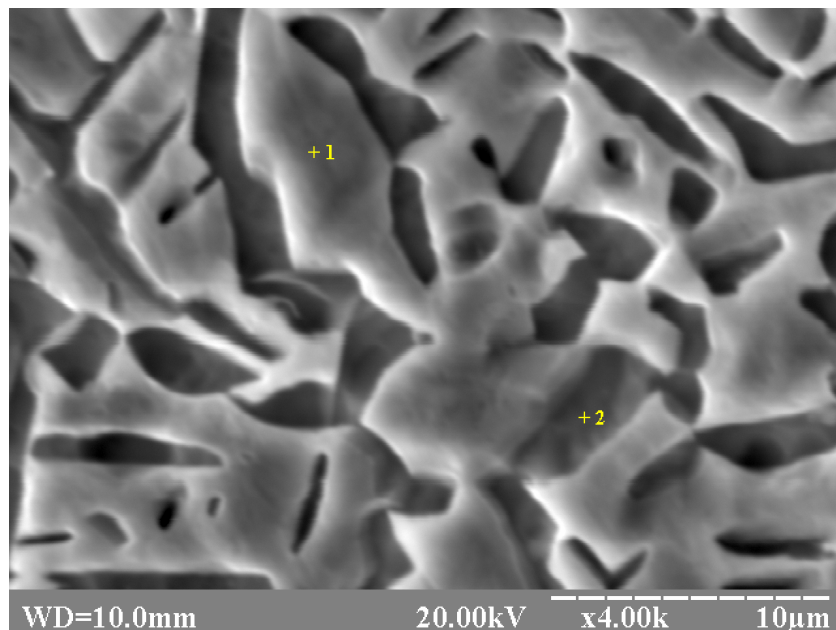


Рисунок 3 – Микроструктура сплава VT22 в закаленном состоянии (850 °С, вода), x4000

На рис. 3 выделено две области, которые соответствуют  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазам: 1 –  $\alpha$ -фазе, 2 –  $\beta$ -фазе. Результаты измерений показали, что размер  $\alpha$ -фазы составил 15,3...30,8 мкм, расстояние между ними – 1,56...2,04 мкм. Распределение легирующих элементов в  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазах после закалки показано на рис. 4.

Информация			
Напряжение (кВ): 20.00			
Сумма %: 100.00			
Элемент	К	Инт.	С %
Ti	K	54477	84.69
V	K	3791	6.46
Mo	L	1745	4.59
Al	K	2245	2.14
Fe	K	403	1.03
Cr	K	318	0.78
Si	K	387	0.31

Информация			
Напряжение (кВ): 20.00			
Сумма %: 100.00			
Элемент	К	Инт.	С %
Ti	K	58974	93.33
V	K	1926	3.36
Al	K	2173	1.96
Mo	L	386	0.99
Fe	K	73	0.19
Si	K	215	0.17

а

б

Рисунок 4 – Химический состав  $\alpha$  и  $\beta$ -фаз при закалке 850 °С:  
а – состав  $\alpha$ -фазы; б – состав  $\beta$ -фазы

Анализируя состав фаз, можно прийти к выводу, что общее количество легирующих элементов в  $\alpha$ -фазе превышает в 2,3 раза количество легирующих элементов в  $\beta$ -фазе. Так, в  $\alpha$ -фазе железа больше в 5,4 раза, молибдена – в 4,6 раза, а ванадия – в 1,9 раза, чем в  $\beta$ -фазе. При этом содержание алюминия мало отличается, а хром присутствует только в  $\alpha$ -фазе.

При температурах старения 400...600 °С происходит перераспределение легирующих элементов между  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазами, что приводит к стабилизации последней.

Для анализа распределения легирующих элементов между  $\alpha$ - и  $\beta$ -твердыми растворами взят образец, состаренный при температуре 400 °С (рис. 5). На рисунке выделено две области, которые соответствуют  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазам: 1 –  $\alpha$ -фазе, 2 –  $\beta$ -фазе. Результаты измерений показали, что размер  $\alpha$ -фазы составил 4,4...8,4 мкм, расстояние между ними – 0,465...0,8 мкм.

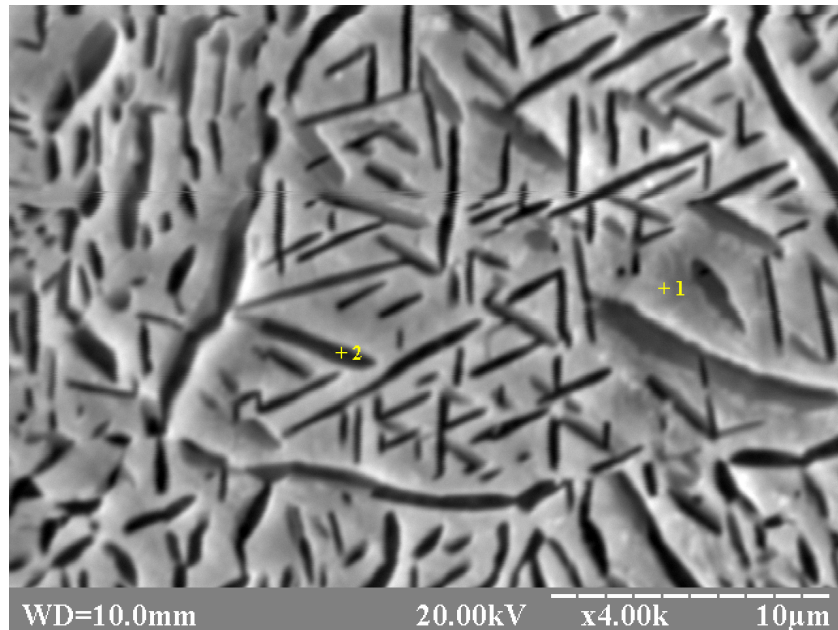


Рисунок 5 – Микроструктура сплава VT22 в состаренном состоянии, x4000

Распределение легирующих элементов в  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазах после старения показано на рис. 6.

Анализируя состав фаз, можно прийти к выводу, что при старении действительно происходит перераспределение легирующих элементов между  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазами, при этом  $\beta$ -фаза становится более легированной.

При изучении влияния температур закалки на упрочнение сплава образцы, закаленные с температур 750, 850 и 900 °С, подвергались старению при температурах 400, 500 и 600 °С в течение 2 часов.

Информация			
Напряжение (кВ): 20.00			
Сумма %: 100.00			
Элемент	Инт.		С %
Ti	K	55406	88.16
V	K	3080	5.38
Mo	L	1147	3.06
Al	K	2283	2.18
Fe	K	251	0.66
Cr	K	119	0.30
Si	K	321	0.26

а

Информация			
Напряжение (кВ): 20.00			
Сумма %: 100.00			
Элемент	Инт.		С %
Ti	K	55914	87.97
V	K	3381	5.84
Mo	L	1306	3.42
Al	K	1716	1.62
Fe	K	318	0.83
Si	K	338	0.27
Cr	K	24	0.06

б

Рисунок 6 – Химический состав  $\alpha$  и  $\beta$ -фаз при старении 400 °С:  
а – состав  $\alpha$ -фазы; б – состав  $\beta$ -фазы

В ходе исследования проанализированы изменения твердости сплава VT22 после различных режимов закалки и старения. Так, при повышении температуры закалки эффект упрочнения сплава после старения растет. Например, твердость после закалки при  $t = 750\text{ °C}$  и старения при  $t = 500\text{ °C}$  (рис. 7) составила 38 HRC.

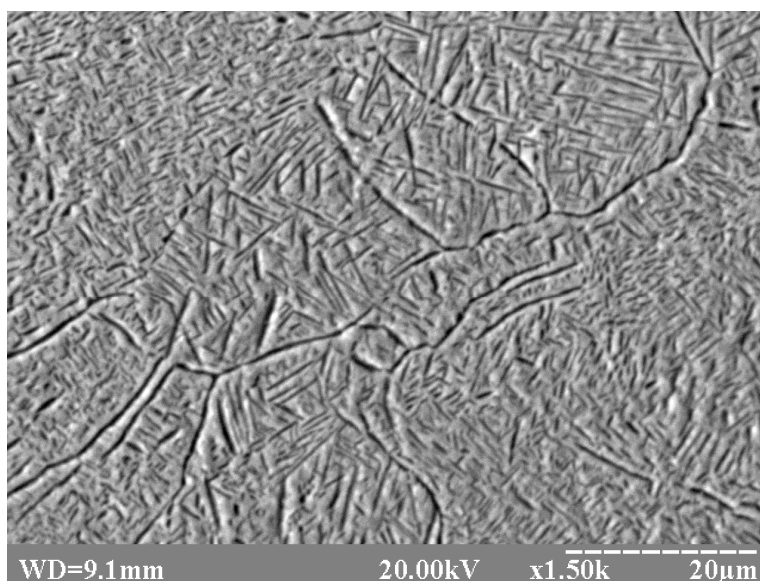


Рисунок 7 – Микроструктура титанового сплава VT22 после закалки 750 °С и последующего старения при температуре 500 °С, x1500

Твердость после закалки при  $t = 900\text{ °C}$  и старения при  $t = 500\text{ °C}$  составила 46 HRC. Увеличение твердости объясняется тем, что с повышением температуры закалки и скорости охлаждения фиксируется, а следовательно, и распадается при старении большее количество  $\beta$ -фазы, т.е. растет эффект упрочнения сплава. Максимальная твердость сплава наблюдалась при температуре старения 500 °С.



С повышением температуры старения происходит некоторое снижение твердости. Это объясняется коагуляцией высокодисперсных частиц вторичной  $\alpha$ -фазы при увеличении времени выдержки и повышении температуры старения. Так, при закалке при  $t = 750^\circ\text{C}$  и старении при  $t = 500^\circ\text{C}$  размер частиц вторичной  $\alpha$ -фазы составил  $2,26...3,95$  мкм, расстояние между ними –  $0,2...0,4$  мкм; при старении при  $t = 600^\circ\text{C}$  размер частиц вторичной  $\alpha$ -фазы –  $5,4...8,98$  мкм, расстояние между ними –  $0,7...0,89$  мкм (рис. 8).

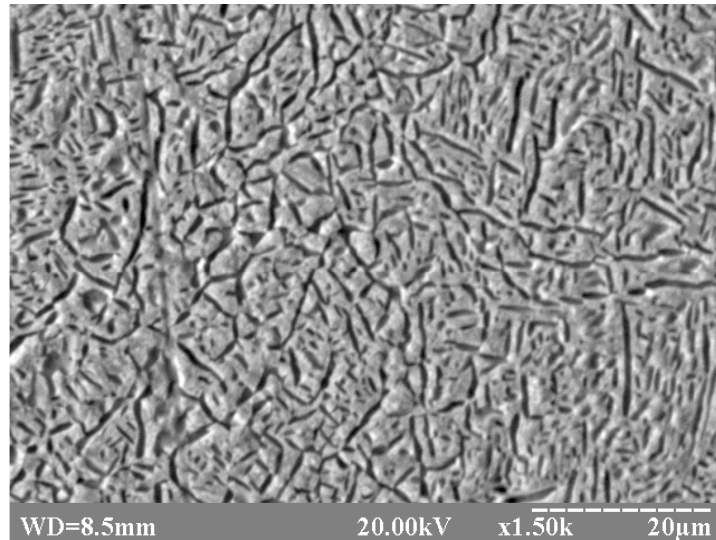


Рисунок 8 – Микроструктура титанового сплава ВТ22 после закалки при  $750^\circ\text{C}$  и последующего старения при температуре  $600^\circ\text{C}$ ,  $\times 1500$

Выводы. Анализ результатов исследований показал:

- при старении титанового сплава ВТ22 происходит перераспределение легирующих элементов между  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазами, при этом  $\beta$ -фаза становится более легированной;
- большие температуры закалки в рекомендуемом интервале температур дают больший эффект упрочнения сплава после старения;
- наилучшее сочетание свойств титанового сплава ВТ22 достигается закалкой при температуре  $750^\circ\text{C}$  и последующем старении при температуре  $500^\circ\text{C}$ .

Список использованных источников

1. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов/ Е.А. Борисова, Г.А. Бочвар и др. – М.: Металлургия, 1980. – 464 с.
2. Структура и свойства титановых сплавов: Сб. статей/под. ред. С.Г. Глазунова, А.И. Хорева / М.: ОНТИ, 1972. – 255 с.
3. Вульф В.К. Термическая обработка титановых сплавов/ В.К. Вульф – М.: Металлургия, 1969. – 376 с.

*Поступила в редакцию 10.06.2010 г.*

*Рецензент: д-р техн. наук, ст. науч. сотр. В.И. Сливинский  
УкрНИИТМ, г. Днепропетровск*