

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 669.017; 620.186

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.013

## ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ЛИСТОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT22 (Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe)

Екатерина Юрьевна Классман<sup>1†</sup>, Рамиль Яватович Лутфуллин<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина, 39, 450001, Уфа, Россия

<sup>1</sup> klassman@mail.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-1984-5137>

<sup>2</sup> lutfullin.ramil@imsp.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4638-3206>

**Аннотация.** Термическая обработка метастабильных  $\beta$ -титановых сплавов включает, по существу, две стадии: обработку на твердый раствор в  $\beta$ - или  $\alpha+\beta$ -области и старение при более низких температурах. Экспериментально показано, что оптимальный комплекс механических свойств ( $\sigma_b \sim 1400$  МПа,  $\delta \sim 7,4$  %) в листовых полуфабрикатах проявляется после закалки с температуры 780 °С и последующего старения при температуре 540 °С в течение 4 часов. Отмечена определенная нестабильность механических свойств, вероятно связанная с неравномерностью горячей деформации при прокатке в процессе изготовления листов. У образцов, вырезанных из середины листовой полосы, показатели прочности на  $\sim 7$  % выше, чем у образцов, вырезанных из других участков. А вот показатели пластичности имеют иную закономерность: у образцов, вырезанных с края прокатанной полосы пластичность выше на  $\sim 35$  %.

**Ключевые слова:** титановые сплавы, микроструктура, листовая прокатка, механические свойства, термическая обработка.

**Благодарности:** Все микроструктурные исследования и механические испытания проводились на базе ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов» в рамках Госзадания ИПСМ РАН № НИОКТР 122011900474-5.

**Для цитирования:** Классман Е.Ю., Лутфуллин Р.Я. Термическая обработка опытных листов титанового сплава VT22 (Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe) // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 1. С. 109–114. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.013.

Original article

## HEAT TREATMENT OF EXPERIMENTAL SHEETS OF TITANIUM ALLOY VT22 (Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe)

Ekaterina Yu. Klassman<sup>1†</sup>, Ramil Ya. Lutfullin<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Institute for Problems of Superplasticity of Metals of the Russian Academy of Sciences, Stepan Khalturina Str., 39, Ufa, 450001, Russia

<sup>1</sup> klassman@mail.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-1984-5137>

<sup>2</sup> lutfullin.ramil@imsp.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4638-3206>

**Abstract.** Heat treatment of metastable  $\beta$ -titanium alloys essentially includes two stages: solid solution treatment in the  $\beta$ - or  $\alpha+\beta$ -region and aging at lower temperatures. It has been experimentally shown that the optimal mechanical properties ( $\sigma_s \sim 1400$  MPa,  $\delta \sim 7.4$  %) in sheet semi-finished products appears after hardening from a temperature of 780 °C and subsequent aging at a temperature of 540 °C for 4 hours. A certain instability of mechanical properties is noted, probably associated with inhomogeneity of hot deformation during rolling in the process of manufacturing sheets. The strength indicators are about 7 % higher for samples from the middle of a sheet, than for ones from other sections. As for the plasticity indicators it has a different pattern: for samples from the edge of the rolled sheet, plasticity is about 35 % higher than ones from other sections.

**Keywords:** titanium alloys, microstructure, sheet rolling, mechanical properties, heat treatment.

**Acknowledgements:** The present work was accomplished in terms of the state assignment of the Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences No. 122011900474-5. Microstructural studies and mechanical tests were carried out on the facilities of shared services center of IMSP RAS «Structural and Physical-Mechanical Studies of Materials».

**For citation:** Klassman, E. Yu. & Lutfullin, R. Ya. (2023). Heat treatment of experimental sheets of titanium alloy VT22 (Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe). *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(1), 109–114. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.013.

## Введение

Высокая удельная прочность и превосходная коррозионная стойкость материалов на основе титана делают их привлекательным выбором для применения в различных отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая промышленность, производство биоматериалов и автомобилестроение [1-7].

Для изготовления элементов листовых конструкций авиационного назначения необходимо применение титановых сплавов средней и высокой прочности [6, 7]. Типичными представителями этих групп являются сплавы марок VT5, VT20 и VT6, которые часто используются для изготовления листовых полуфабрикатов [6]. Однако сплавы VT5 и VT20 относятся к термически неупрочняемым [7], т.е. для них практически отсутствует возможность изменения структуры и свойств в процессе термического воздействия. Высокопрочный титановый сплав критического состава – VT22 отличается максимальным эффектом упрочняющей термообработки (ТО), относится к классу наиболее высокопрочных титановых сплавов, применяется, главным образом, в виде крупногабаритных прутков и поковок с крупнозернистой структурой. Механические свойства и структура листовых заготовок после термообработки мало изучены и недостаточно представлены в литературе.

В настоящее время в России и за рубежом наблюдается повышенный интерес к процессам распада в псевдо- $\beta$  титановых сплавах и разработке режимов упрочняющей термической обработки, которые позволяют эффективно управлять структурно-фазовым состоянием титановых сплавов, возможности которых до конца не исчерпаны [8-13].

В процессе старения обработанный на твердый раствор сплав подвергают термообработке в интервале температур 480-620 °С в течение 2-16 ч. Эта термообработка приводит к выделению мелкодисперсной  $\alpha$ -фазы в

$\beta$ -матрице, и эти выделения препятствуют движению дислокаций, затрудняя деформацию [16]. Объемная доля и морфология  $\alpha$ -фазы определяют прочность, тогда как пластичность зависит от размера зерна  $\beta$ -фазы [16]. В частности, в работе [12] был представлен режим упрочняющей термической обработки сплава VT22, включающий закалку на воздухе с 830 °С и двойное старение (500 °С, 8 ч + 600 °С, 1 ч), который обеспечивает получение высокопрочного состояния ( $\sigma_B \geq 1450$  МПа;  $\delta \geq 8$  %;  $KCU \geq 0,32$  МДж/м<sup>2</sup>). Авторы работы [13] предлагают наряду с термической обработкой проводить предварительно измельчение элементов зеренной структуры, после чего старение в интервале температур 420-550 °С в течение 3-5 ч приводит к формированию в зернах  $\beta$ -фазы мартенситной тонкоигольчатой (толщиной несколько нанометров) структуры. Механические свойства при этом: предел прочности 1700 МПа, а пластичность 2 %. По мнению исследователей сплава Ti55531 (разработанного на основе Российского титанового сплава VT22) режим термической обработки заключается в следующем: растворение при 880 °С в течение 1,5 ч плюс обработка старением при 620 °С в течение 10 ч, в этом состоянии прочность составляет 1178 МПа [8]. В то же время, для широкого внедрения металлических материалов в промышленности есть необходимость в проведении дополнительной обработки, например, методом плоской прокатки, придавая заготовкам форму листа.

В научно-технической литературе приводится ограниченное количество данных о режимах упрочняющей ТО применительно к листовым полуфабрикатам из данного сплава, при этом все известные режимы термической обработки являются многоступенчатыми и длительными. В связи с вышеперечисленным, актуальным является вопрос рассмотрения с последующей разработкой менее затратных и трудоемких режимов упрочняющей термической обработки для листовых заготовок из титанового сплава VT22.

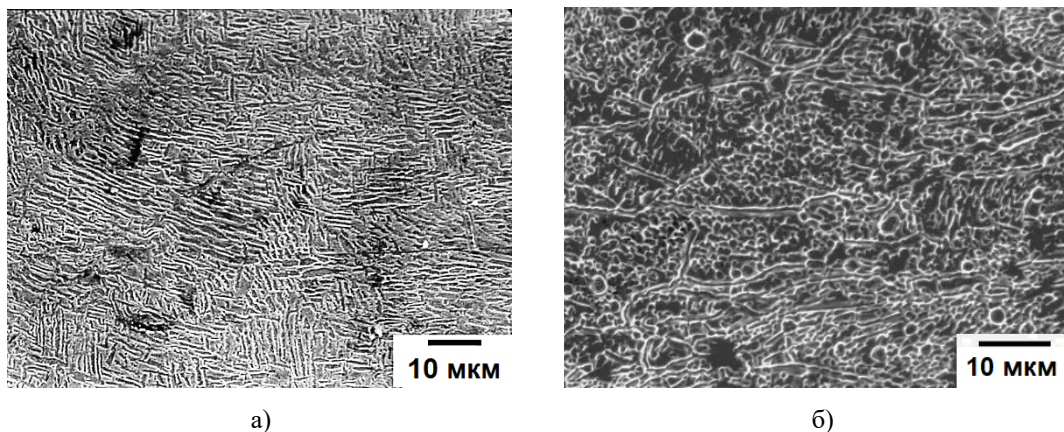
### Материал и методики исследования

Объектом исследования был титановый сплав VT22 стандартного химического состава. Температура полного полиморфного превращения, определенная методом пробных закалок, соответствовала  $T_{\text{п.п}} \sim 860$  °С. Прокатку для получения листовых заготовок проводили на лабораторном стане ДУО-300 при температуре 850 °С, суммарная степень деформации  $e$  составила  $\sim 3$ . Для нахождения оптимального режима упрочняющей термической обработки, опираясь на литературные данные, были выбраны несколько режимов для выявления общих закономерностей изменения механических свойств. Механические испытания на растяжение проводили на универсальном динамометре Instron-1185 при комнатной температуре. Микроструктуру изучали методом растровой и про-

свечивающей электронной микроскопии с использованием микроскопов Mira 3LMH (TESCAN) и JEM-2000EX.

### Результаты и обсуждение

Исходная микроструктура сплава представлена типично пластинчатыми выделениями  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз соотношением 40-60 % с размером пластин до 10 мкм, коэффициентом вытянутости  $K = 5$  и (рис.1а). После прокатки при температуре 850 °С (в  $\alpha+\beta$ -области) размер  $\beta$ -превращенных зерен достигает порядка 60-80 мкм, оторочка  $\alpha$ -фазы по границам частично раздроблена (рис.1б). Толщина оторочки порядка 1 микрона. В структуре также присутствуют выделения первичной  $\alpha$ -фазы, имеющие глобулярную форму и размер около 3-5 мкм.



**Рис.1.** Структура образца из сплава VT22 (РЭМ): а – исходное состояние, б – после прокатки при  $T = 850$  °С

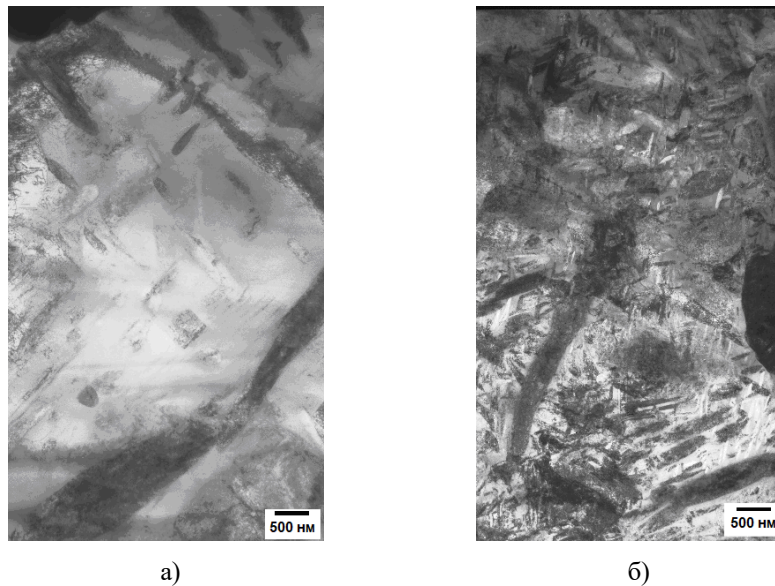
**Fig.1.** Structure of a sample made of VT22 alloy (SEM): a – initial state, b – after rolling at  $T = 850$  °С

Согласно результатам механических испытаний мы получили комплекс механических свойств после закалки с температуры 780 °С с дальнейшим старением при температуре 540 °С в течение 4 часов:  $\sigma_{0,2} \cong 1360$  МПа,  $\sigma_b \cong 1400$  МПа,  $\delta \cong 7,4$  %.

Известно [10-14], что структура сплава является одним из определяющих факторов его механических свойств. На рис.2 представлена тонкая структура образца после упрочняющей ТО. После закалки (рис.2а), образовались  $\beta_m$ - и  $\alpha'$ -фаза, имеющая характерное для мартенсита игольчатое строение и большую плотность дислокаций [7]. При старении (рис.2б) из метастабильных фаз образуется третичная  $\alpha$ -фаза, имеющая форму пластин, расположенных хаотически [7]. Также присутствуют выделения

первичной  $\alpha$ -фазы [7], имеющие глобулярную форму и размер частиц около 3 мкм, которые сохранились при нагреве под закалку.

Морфология структуры не претерпевает существенных изменений в зависимости от различных температурно-временных режимов старения. Анализ тонкой структуры показал, что в процессе старения образуются пластины, имеющие преимущественно прямолинейные границы с большой плотностью дислокаций в пластинах. Их объемная доля порядка 15 %. Наряду с ними присутствуют пластины, практически свободные от дислокаций и гораздо более меньших размеров – порядка 0,35 мкм в длину и толщиной порядка 0,05 мкм. Их объемная доля невелика и составляет 2 %.



**Рис.2.** а – тонкая структура после закалки с 780 °С; б – тонкая структура после ТО: закалка 780 °С + старение 540 °С, выдержка 4 ч

**Fig.2.** a – fine structure after quenching from 780 °С; b – fine structure after HT: quenching 780 °С + aging 540 °С, exposure 4 hours

При анализе результатов механических испытаний была замечена некоторая нестабильность механических свойств (табл.1), что, видимо, связано с условиями горячей деформации,

так как деформация при практически любом способе обработки давлением не бывает равномерной [6].

**Таблица 1.** Механические свойства листов сплава VT22 после упрочняющей ТО

**Table 1.** Mechanical properties of VT22 alloy sheets after hardening HT

Свойства	Середина	2/5 по ширине	Край
$\sigma_{0,2}$ , МПа	1395±69	1375±81	1300±104
$\sigma_b$ , МПа	1440±67	1410±90	1350±107
$\delta$ , %	6,5±0,4	7,3±0,5	8,5±0,7

У образцов, вырезанных из середины листовой полосы, отмечена тенденция к повышению прочности на ~ 7 % в сравнении с образцами, вырезанными из других участков. А вот показатели пластичности имеют иную закономерность: у образцов, вырезанных с края прокатанной полосы пластичность оказалась выше на ~ 35 %.

### Заключение

Оптимальный комплекс механических свойств ( $\sigma_{0,2} = 1360$  МПа,  $\sigma_b = 1400$  МПа,  $\delta = 7,4$  %,  $\psi = 14$  %) в листовых полуфабрикатах проявляется после закалки с температуры 780 °С и последующего старения при температуре 540 °С в течение 4 часов. Отмечена опре-

деленная нестабильность механических свойств, вероятно связанная с неравномерностью горячей деформации при прокатке.

### Список литературы

1. Koll i R.P., Devaraj A. A Review of Metastable Beta Titanium Alloys // Metals. 2018. 8(7). 506.
2. Sahoo R., Kabir A.S. Effect of Heat Treatments on Microstructures and Mechanical Properties of Ti-5553 Alloy // TMS 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. 2020. P. 1799–1807.
3. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их

- создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. 8–18.
4. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. 7–27.
5. Ночовная Н.А. Перспективы и проблемы применения титановых сплавов // Сб. докл. «Перспективы развития и применения титановых сплавов для самолетов, ракет, двигателей и судов». М.: ВИАМ. 2007. С. 4–8.
6. Скворцова С.В., Ильин А.А., Бецофен С.Я., Филатов А.А., Дзунович Д.А., Панин П.В. Анизотропия механических свойств и текстура листовых полуфабрикатов из титановых сплавов // Технология легких сплавов. 2006. № 1–2. С. 81–87.
7. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС–МАТИ. 2009. 520 с.
8. Chuan Wu, Mei Zhan Microstructural evolution, mechanical properties and fracture toughness of near  $\beta$  titanium alloy during different solution plus aging heat treatments // Journal of Alloys and Compounds. 2019. V. 805. P. 1144–1160.
9. Fan-Jiao Gong-Ye et. al. Effect of cyclic heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr alloy // Mater. Res. Express. 2021. V. 8. 076511.
10. Li Z.Y., Wu G.Q., Huang Z. Relationships between microstructure and mechanical properties of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr alloy // Mater. Res. Express. 2018. V. 5. 036518.
11. Campanelli L.C., Carvalho P.S. et al. High cycle fatigue and fracture behavior of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr alloy with BASCA and double aging treatments // Materials Science & Engineering A. 2016. 658. P. 203–209.
12. Нарыгина И.В. Структурные и фазовые превращения в ( $\alpha$ + $\beta$ )-титановых сплавах переходного класса при термическом и деформационном воздействии: дис. канд. технич. наук. Екатеринбург, 2010. 184 с.
13. Мишин И.П., Найденкин Е.В., Раточка И.В. и др. Исследование влияния деформации прокаткой с последующими отжигами на механические свойства титанового сплава BT22 // INTERNATIONAL WORKSHOP «Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems». Издательский Дом ТГУ, 2019. С. 264.
14. Shashi Shekhara, Rajdeep Sarkara, Sujoy Kumar et al. Effect of solution treatment and aging on microstructure and tensile properties of high strength  $\beta$  titanium alloy, Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr // Materials & Design. 2015. V. 66, Part B, P. 596–610.
15. Srinivasu G., Natraj Y., Bhattacharjee A., Nandy T.K., Nageswara Rao G.V.S Tensile and fracture toughness of high strength  $\beta$  titanium alloy, Ti-10V-2Fe-3Al, as a function of rolling and solution treatment temperatures // Materials & Design. 2013. V. 47. P. 323–330.
16. Sudhagara Rajan S, Geetha Manivasagam et al. Heat Treatment of Metastable Beta Titanium Alloys. IntechOpen. 2020. 270 p.

### Информация об авторах

Е. Ю. Классман – аспирант, инженер Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

Р. Я. Лутфуллин – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

### References

1. Kolli, R. P. & Devaraj, A. (2018). A Review of Metastable Beta Titanium Alloys. *Metals*, 8(7), 506.
2. Sahoo, R. & Kabir, A.S. (2020). Effect of Heat Treatments on Microstructures and Mechanical Properties of Ti-5553 Alloy. *TMS 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*, P. 1799–1807.
3. Kablov, E. N. (2016). What is the future to be made of? Materials of a new generation, technologies for their creation and processing – the basis of innovation. *Wings of the Motherland*, 5, 8–18. (In Russ.).
4. Kablov, E. N. (2007). Materials for aerospace engineering. *All materials. Encyclopedic reference book*, 5, 7–27. (In Russ.).
5. Nochovnaya, N. A. (2007). Prospects and problems of application of titanium alloys. *Sat. report «Prospects for the development and use of titanium alloys for aircraft, rockets, engines and ships»*. М.: VIAM, 4–8. (In Russ.).
6. Skvortsova, S. V., Il'in, A. A., Betsofen, S. Ya., Filatov, A. A., Dzunovich, D. A. & Panin, P. V. (2006). Anisotropy of mechanical properties and texture of sheet semi-finished products from titanium alloys. *Technology of light alloys*, 1–2, 81–87. (In Russ.).
7. Ilyin, A. A., Kolachev, B. A. & Polkin, I. S. (2009). *Titanium alloys. Composition, structure, properties: a reference book*. М.: VILS-MATI. P. 520.

8. Wu, Chuan & Zhan, Mei (2019). Microstructural evolution, mechanical properties and fracture toughness of near  $\beta$  titanium alloy during different solution plus aging heat treatments. *Journal of Alloys and Compounds*, 805, 1144–1160.
9. Fan-Jiao, Gong-Ye et al. (2021). Effect of cyclic heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ti–5Al–5Mo–5V–3Cr–1Zr alloy. *Mater. Res. Express*, 8, 076511.
10. Li, Z. Y., Wu G. Q. & Huang, Z. (2018). Relationships between microstructure and mechanical properties of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr alloy. *Mater. Res. Express*, 5, 036518.
11. Campanelli, L. C. & Carvalho, P. S. et al. (2016). High cycle fatigue and fracture behavior of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr alloy with BASCA and double aging treatments. *Materials Science & Engineering A*, 658, 203–209.
12. Narygina, I. V. (2010). Structural and phase transformations in ( $\alpha$ + $\beta$ )-titanium alloys of the transition class under thermal and deformation effects. dis. cand. tech. Nauk. Yekaterinburg. P. 184. (In Russ.).
13. Mishin, I. P., Naidenkin, E. V. & Ra-tochka, I. V. et al. (2019). Investigation of the effect of deformation by rolling followed by annealing on the mechanical properties of VT22 titanium alloy. At. *INTERNATIONAL WORKSHOP «Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems»*. TSU Publishing House. P. 264. (In Russ.).
14. Shekhara, Sh., Sarkara, R. & Kumar, S. et al. (2015). Effect of solution treatment and aging on microstructure and tensile properties of high strength  $\beta$  titanium alloy, Ti–5Al–5V–5Mo–3Cr. *Materials & Design*, 66, B, 596–610.
15. Srinivasu, G., Natraj, Y. & Bhattacharjee, A. et al. (2013). Tensile and fracture toughness of high strength  $\beta$  titanium alloy, Ti-10V-2Fe-3Al, as a function of rolling and solution treatment temperatures. *Materials & Design*, 47, 323–330.
16. Sudhagara Rajan, S. & Geetha, Manivasagam et al. (2020). Heat Treatment of Metastable Beta Titanium Alloys. IntechOpen. P. 270.

#### **Information about the authors**

*E. Yu. Klassman – Post-graduate Student, Engineer at the Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences.*

*R. Ya. Lutfullin – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher at the Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 23.12.2022; одобрена после рецензирования 16.01.2023; принята к публикации 31.01.2023.

The article was received by the editorial board on 23 Dec. 22; approved after reviewing 16 Jan. 23; accepted for publication 31 Jan. 23.