

РАЗДЕЛ 2. МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Научная статья

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

УДК 669.017; 620.186

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.008

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ЗАГОТОВКИ ПЕРЕД ТЕПЛОЙ ПРОКАТКОЙ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT22

Екатерина Юрьевна Классман^{1†}, Рамиль Яватович Лутфуллин²

^{1,2} Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина, 39, 450001 Уфа, Россия

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

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

Аннотация. Комплексно-легированный титановый сплав VT22 является высокопрочным сплавом, из которого изготавливают ответственные изделия авиакосмического назначения. Как правило, этот сплав используют в крупнозернистом состоянии и проблемными вопросами являются низкая технологическая пластичность и высокая нестабильность механических свойств материала в изделиях. Наиболее заметно эти проблемы проявляются при изготовлении тонкостенных полых конструкций. Последние можно успешно изготовить сверхпластической формовкой из листовых заготовок с мелко- или ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой. УМЗ структура в листовых заготовках сплава VT22 может быть получена в результате изотермической прокатки. Однако изотермическая прокатка существенно удорожает производство, делая его экономически непривлекательным. В этой связи исследовали возможность получения УМЗ листов титанового сплава VT22 теплой прокаткой на холодных валках при температурах нагрева исходных заготовок в интервале температур 600–750 °С. Результаты проведенных исследований показывают, что листовая прокатка заготовок нагретых до температуры 600 °С позволяет получить УМЗ состояние в титановом сплаве VT22 с параметрами зеренно-субзеренной структуры менее 300 нм. Микротвердость полученных листовых заготовок выше на 20 % по сравнению с крупнозернистым сплавом VT22. Вытянутость зерен сплава вдоль плоскости прокатки уменьшается со снижением температуры нагрева заготовок перед прокаткой в исследованном интервале температур. Полученные данные могут быть полезными, в частности, для оптимизации условий получения тонких листов с УМЗ или нанокристаллической структурой.

Ключевые слова: титановые сплавы, микроструктура, листовая прокатка, микротвердость.

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. Влияние температуры нагрева заготовки перед теплой прокаткой на структуру и свойства титанового сплава VT22 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 2. С. 205–211. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.008.

Original article

EFFECT OF HEATING TEMPERATURE OF THE BILLET BEFORE WARM ROLLING ON THE MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF VT22 TITANIUM ALLOY

Ekaterina Yu. Klassman^{1†}, Ramil Ya. Lutfullin²

^{1,2} Institute for Metals Superplasticity Problems of Russian Academy of Sciences, Khalturina Str., 39, Ufa, 450001, Russia

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

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

Abstract. Complex-alloyed VT22 titanium alloy is a high-strength alloy to made critical aerospace products. This alloy is usually used in a coarse-grained state, and the problems are low technological plasticity and high instability of mechanical properties of the material in products. These problems are most apparent in the manufacture of thin-walled hollow-core construction, which can be successfully produced by superplastic forming from sheet blanks with a fine- or ultrafine-grained (UFG) microstructure. The UFG microstructure in sheet blanks of VT22 alloy can be obtained as a result of isothermal rolling. However, isothermal rolling significantly increases the cost of production, making it economically unprofitable. In this regard, we investigated the possibility of producing UFG sheets of titanium alloy VT22 by warm rolling on cold rollers at the temperature range of 600-750 °C. The results of the studies show that sheet rolling of billets heated to a temperature of 600 °C makes it possible to obtain a UFG state in VT22 titanium alloy with grain-subgrain microstructure parameters of less than 300 nm. The microhardness of the obtained sheet blanks is 20 % higher compared to the coarse-grained VT22 alloy. Grain elongation along the rolling plane decreases as the heating temperature of the workpieces prior to rolling is reduced in the temperature range studied. Such results can be particularly useful in optimizing the conditions for obtaining thin sheets with UFG or nanocrystalline structure.

Keywords: titanium alloys, microstructure, sheet rolling, microhardness.

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. (2024). Effect of heating temperature of the billet before warm rolling on the microstructure and properties of VT22 titanium alloy. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(2), 205–211. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.008.

Введение

Титановый сплав VT22 (аналог зарубежного сплава Ti-55531) – высокопрочный сплав с повышенными усталостными характеристиками, широко используемый в аэрокосмической области [1, 2]. Механические свойства титановых сплавов тесно связаны с их микроструктурой [3, 4]. В целом титановые сплавы с мелкозернистой структурой имеют лучшие механические характеристики, чем сплавы с крупнозернистой структурой [5, 6].

Наиболее широко используемый промышленный метод измельчения зерна – ковка, а параметры деформации, такие как температура, скорость и степень деформации, играют определяющую роль [6-8]. В то же время, для широкого внедрения металлических материалов в промышленности есть необходимость в проведении дополнительной обработки, например, методом прокатки, придавая заготовкам форму листа [8-10]. Однако после деформации сплава в нем может возникнуть металлографическая и/или кристаллографическая текстура [11, 12]. В тоже время, наличие, например, металлографической текстуры в материале может оказаться востребованным для получения многослойных композиционных материалов из титановых сплавов [10].

Применительно к комплексно-легированному титановому сплаву VT22 имеются работы, где, например, показано, что винтовая прокатка в диапазоне температур 850-750 °C приводит к образованию ультрамелкозернисто-субзернистой структуры, характеризующейся размером элементов ~ 500 нм и мелкими частицами α -фазы размером ~ 300 нм [13]. Кроме того, снижение температуры деформации до 600 °C замедляет процессы динамического восстановления в β -фазе, приводит к более глубокому измельчению матрицы, а также значительно снижает газонасыщение заготовок [14, 15]. Энергоемкая изотермическая прокатка полуфабрикатов из комплексно-легированного титанового сплава VT22 при пониженных температурах позволяет получить тонкие листы со средним размером зеренно-субзернистой структуры 300 нм без металлографической текстуры [16].

Следует отметить, что в литературе практически отсутствуют исследования применительно к высоколегированным титановым сплавам, деформация которых производится методом плоской теплой прокатки в обычных, неизотермических условиях при температурах ниже 800 °C, что и является целью исследования.

Материал и методики исследования

Объектом исследования был комплексно-легированный титановый сплав VT22 стандартного химического состава по ГОСТ 19807-91. Температура полного полиморфного превращения, определенная методом пробных закалок, соответствовала $T_{\text{п.п}} = 860 \pm 10$ °С. Исходная микроструктура сплава представлена ти-

пично пластинчатыми выделениями α - и β -фаз с размером пластин до 10 мкм (рис.1). Микротвердость по Виккерсу при этом составила $HV_{0,98} = 346 \pm 15$.

Микротвердость измеряли методом Виккерса при нагрузке 100 г в продольном сечении прокатанного образца на приборе МНТ-10 Microhardness Tester.

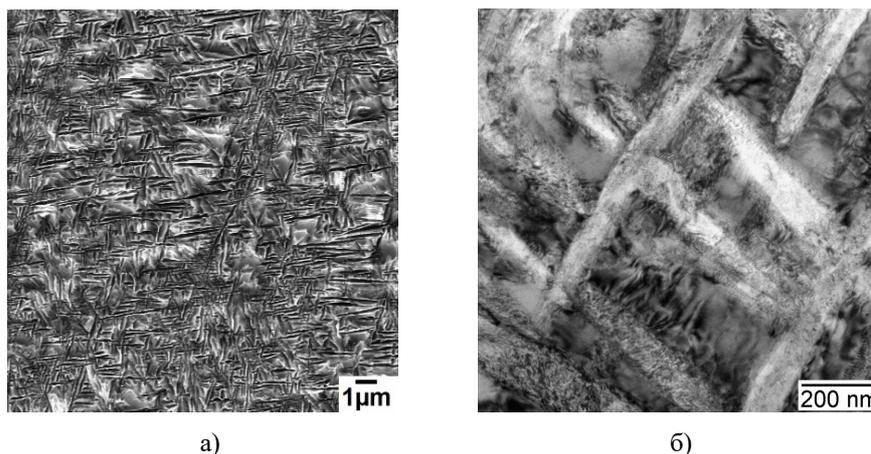


Рис.1. Исходная микроструктура образца из сплава VT22: а – растровая электронная микроскопия (РЭМ), б – просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ)

Fig.1. Initial microstructure of the VT22 alloy sample: а – scanning electron microscopy (SEM), б – transmission electron microscopy (TEM)

Прокатку для получения листовых заготовок проводили на лабораторном стане ДУО-300 в холодных валках со скоростью деформации $\sim 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ с суммарной степенью обжатия 83 %. Температура нагрева заготовок перед прокаткой составила 750-600 °С. Микроструктуру изучали методом растровой и просвечивающей электронной микроскопии с использованием соответственно микроскопов Mira 3LMH (TESCAN) и JEM-2000EX. Средние размеры структурных элементов $d_{\text{ср}}$ в продольном и поперечном направлениях измерялись по соответствующим микрофотографиям методом секущей. Для оценки вытянутости зерен был введен коэффициент вытянутости $K = d_{\text{ср.в}}/d_{\text{ср.п}}$, где $d_{\text{ср.в}}$ и $d_{\text{ср.п}}$ – средний размер структурных элементов в продольном и поперечном направлениях, соответственно.

Результаты и обсуждение

Тонкая структура листов сплава VT22 после прокатки, наблюдаемая в просвечивающем электронном микроскопе показана на рис.2.

Для всех исследованных температур после деформации в изготовленных листах в плоскости прокатки наблюдаются вытянутые зерна в направлении прокатки (рис.2а). При этом встречаются как области с сильно вытянутыми вдоль направления прокатки зернами, так и области с относительно равноосными зернами (рис.2а,г,д), что может быть связано с неравномерностью распределения деформации. Например, в толстом листе в результате локализации, средняя скорость деформации на поверхности составляет $1,9 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ и уменьшается к середине листа до $5,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Известно [17], что в толстом листе деформация растянута по времени за счет большей ширины очага деформации. Некоторые зерна имеют повышенную плотность дислокаций, отмеченные стрелкой (рис.2). Вытянутая форма зерен по направлению прокатки, может в дальнейшем вносить некоторый вклад в анизотропию механических свойств [18, 19]. Коэффициент вытянутости вдоль направления прокатки в зависимости от температуры нагрева заготовок увеличивается от 1,8 при $T = 600$ °С до 2,8 при $T = 750$ °С (табл.1).

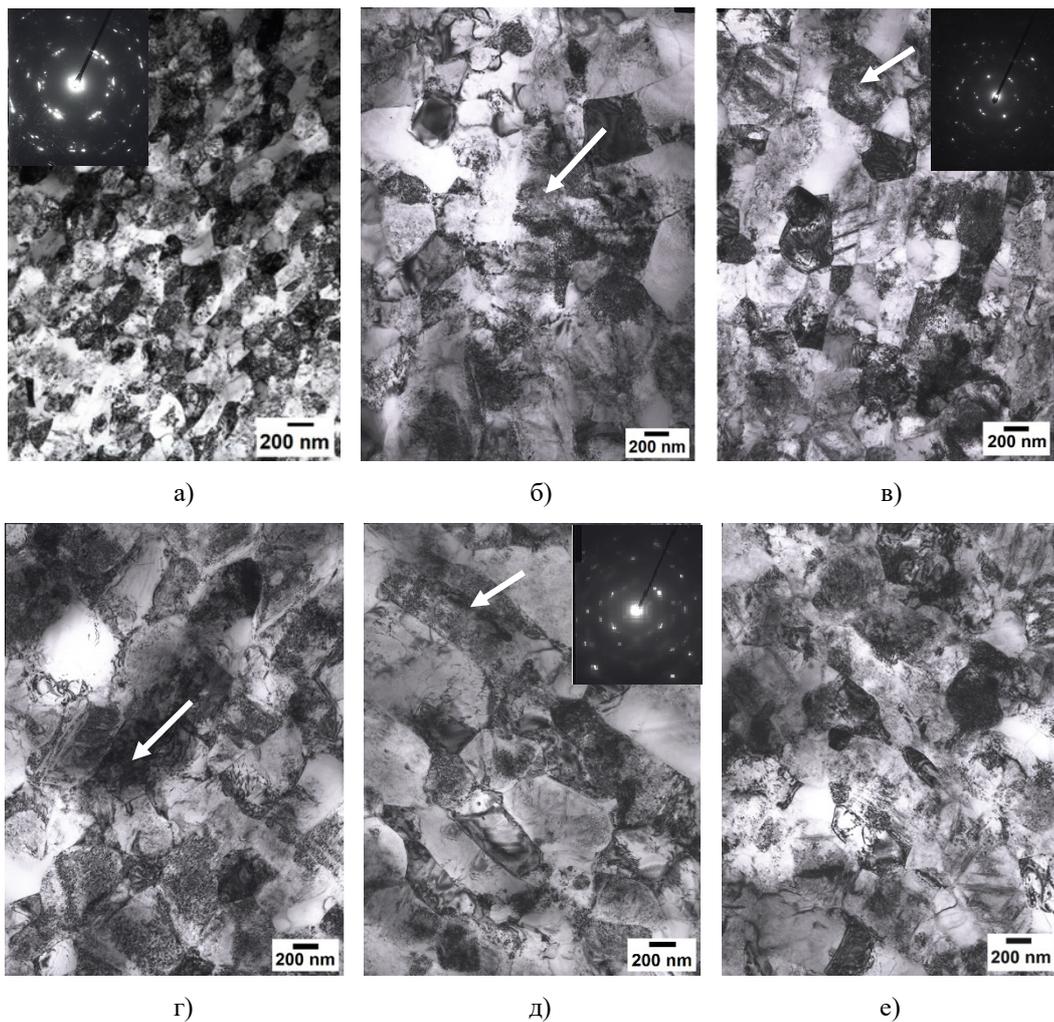


Рис.2. Тонкая структура сплава VT22 после прокатки с предварительным нагревом исходных заготовок до: а – 600 °С вдоль направления прокатки, б – 600°С поперек направления прокатки, в – 650 °С, г – 700 °С, д – 750 °С – вдоль направления прокатки, е – 750°С поперек направления прокатки. Стрелкой указаны зерна с повышенной плотностью дислокаций

Fig.2. Fine structure of the VT22 alloy after rolling with preheating of the initial blanks to: a – 600 °C along the rolling direction, b – 600 °C across the rolling direction, c – 650 °C, d – 700 °C, e – 750 °C – along rolling direction, f – 750 °C across the rolling direction. The arrow indicates grains with an increased dislocation density

Таблица 1. Зависимость коэффициента вытянутости зерен по направлению прокатки от температуры нагрева заготовки перед прокаткой

Table 1. Dependence of the grain elongation coefficient in the rolling direction on the heating temperature of the workpiece before rolling

Температура нагрева заготовки перед прокаткой, °С	600 °С	650 °С	700 °С	750 °С
Коэффициент вытянутости, К	1,8	2,2	2,3	2,8

Поперек направления прокатки наблюдается относительно равноосная форма зерен (рис.2б,е). Средний размер равноосных субзерен колеблется от 244 до 551 нм. Такая сложная микроструктура, состоящая из зерен и субзерен, типична для материалов, обработанных

методом интенсивной пластической деформации (ИПД) [19, 20].

Фактически, при нагреве заготовки до 600 °С были получены листы с параметрами микроструктуры аналогичными как при изотермической прокатке [16].

На дифракционных картинах во всех случаях наблюдались многочисленные отдельные рефлексы, равномерно расположенные по окружности (рис.2а). Подобные дифракционные картины характерны для УМЗ металлических образцов, изготовленных методом ИПД, что

позволяет предположить о формировании наблюдаемых зерен с большеугловыми границами [19].

Измеренные значения микротвердости листов сплава BT22 представлены в таблице 2.

Таблица 2. Зависимость микротвердости от температуры нагрева заготовки перед прокаткой

Table 2. Dependence of microhardness on the heating temperature of the workpiece before rolling

Температура нагрева заготовки перед прокаткой, °С	600 °С	650 °С	700 °С	750 °С
Микротвердость, HV _{0,98}	414 ± 8	408 ± 16	381 ± 18	363 ± 13

С учетом погрешности измерений, прослеживается тенденция к росту микротвердости с понижением температуры нагрева заготовок перед деформацией. Для листов, полученных из заготовок, нагретых при температуре 600 °С, она увеличивается до HV_{0,98} = 414 ± 8. Одной из вероятных причин увеличения микротвердости, может быть, увеличение доли межфазных и межзеренных границ в структуре сплава BT22 после теплой прокатки заготовок, нагретых до более низких температур в исследованном температурном интервале. Другой возможной причиной этого явления может быть наличие нановыделений избыточных фаз с ОЦК решеткой, отмеченных авторами статьи [21] на технически чистом титане 4 класса, содержащим значительные примеси железа. Однако последняя гипотеза требует дальнейших, более глубоких структурных исследований и электронно-микроскопического анализа.

Заключение

Таким образом, при использовании теплой прокатки на стане ДУО-300 со скоростью деформации $\sim 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ успешно получен листовой прокат из титанового сплава BT22 со средним размером зерна/субзерна менее 300 нм, что сопоставимо с результатами после использования изотермической прокатки. При этом, предложенный нами технологический вариант является менее энергозатратным. Микротвердость материала листов по сравнению с исходными заготовками сплава BT22 увеличилась на 20 %. Полученные данные могут быть информативно полезными для разработки технологии теплой прокатки листовых полуфабрикатов из высоколегированных титановых сплавов.

Список литературы

1. Хорев А.И. Перспективы применения титановых сплавов // Технология машиностроения. 2022. № 2. С. 5–7.
2. Kolli R.P., Devaraj A. A Review of Metastable Beta Titanium Alloys // Metals. 2018. V. 8, N 7. 506.
3. Wang M., Wang Y., He Q., Wei W., Guo F., Su W. A strong and ductile pure titanium // Materials Science and Engineering: A. 2022. V. 833. 142534.
4. Estrin Y., Vinogradov A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science // Acta Materialia. 2013. V. 61, N 3. P. 782–817.
5. Bézi Z., Krállics G., El-Tahawy M., Pekker P., Gubicza J. Processing of ultrafine-grained titanium with high strength and good ductility by a combination of multiple forging and rolling // Materials Science and Engineering: A. 2017. V. 688, P. 210–217.
6. Zhrebtsov S., Kudryavtsev E., Kostjuchenko S., Malysheva S., Salishchev G. Strength and ductility-related properties of ultrafine grained two-phase titanium alloy produced by warm multi-axial forging // Materials Science and Engineering: A. 2012. V. 536. P. 190–196.
7. Мулюков Р.Р., Имаев Р.М., Назаров А.А. и др. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: эксперимент, теория, технологии. М.: Наука, 2014. 284 с.
8. Djavanroodi F., Janbakhsh M. Formability Characterization of Titanium Alloy Sheets. From the edited volume Titanium Alloys. Edited by Jan Sieniawski and Waldemar Ziaja. 2013. 158 p.
9. Shagiev M.R., Kruglov A.A., Rudenko O.A., Murzinova M.A. Superplastic forming of ti-

tanium alloys at 700 °C // *Letters on Materials*. 2022. V. 12, N 4. P. 332–335.

10. Sarkeeva A.A., Kruglov A.A., Lutfullin R.Ya., Gladkovskiy S.V., Zhilyaev A.P. et al. Corrigendum to “Characteristics of the mechanical behavior of Ti–6Al–4V multilayer laminate under impact loading” [*Compos B* 187 (2020) 107838] // *Composites Part B: Engineering*. 2020. V. 200. 108390.

11. Fan J., Huang H., Xue X., Zhang W., Wang Y. et al. Hot Rolled Ti6321 Alloy Sheets With Different Initial Microstructures: Microstructure, Mechanical Properties, and Anisotropy Characteristics // *Structural Materials*. 2020. V. 7. 110.

12. Chen W., Lv Y., Zhang X., Chen C., Lin Y.C. et al. Comparing the evolution and deformation mechanisms of lamellar and equiaxed microstructures in near β -Ti alloys during hot deformation // *Materials Science and Engineering: A*. 2019. V. 758. P. 71–78.

13. Naydenkin E.V., Ratochka I.V., Mishin I.P., Lykova O.N. Evolution of the Structural-Phase State of a VT22 Titanium Alloy During Helical Rolling and Subsequent Aging // *Russian Physics Journal*. 2015. V. 58. P. 1068–1073.

14. Zherebtsov S.V., Murzinova M.A., Klimova M.V., Salishchev G.A., Popov A.A. et al. Microstructure evolution during warm working of Ti–5Al–5Mo–5V–1Cr–1Fe at 600 and 800 °C // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. V. 563. P. 168–176.

15. Классман Е.Ю., Астанин В.В., Лутфуллин Р.Я. Газонасыщение поверхности листовых полуфабрикатов из титанового сплава VT22 // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2021. Т. 18, № 2. С. 203–209.

16. Классман Е.Ю., Астанин В.В. Низкотемпературная сверхпластичность титанового сплава VT22 // *Письма о материалах*. 2020. Т. 10, № 1(37). С. 10–15.

17. Классман Е.Ю., Астанин В.В. Получение тонких листов из титанового сплава методом изотермической прокатки // *В сб. трудов XII Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики*. 2019. Т. 3. С. 318–320.

18. Pippin R., Scheriau S., Taylor A., Hafok M., Hohenwarter A. et al. Saturation of Fragmentation During Severe Plastic Deformation // *Annual Review of Materials Research*. 2010. V. 40. P. 319–343.

19. Sabirov I., Perez-Prado M.T., Molina-Aldareguia J.M., Semenova I.P., Salimgareeva

G.Kh. et al. Anisotropy of mechanical properties in high-strength ultra-fine-grained pure Ti processed via a complex severe plastic deformation route // *Scripta Materialia*. 2011. V. 64, N 1. P. 69–72.

20. Edalati, K., Bachmaier, A., Beloshenko, V. & Beygelzimer Y. et al. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances // *Materials Research Letters*. 2022. V. 10, No. 4. P. 163–256.

21. Rezyapova L.R., Valiev R.R., Sitdikov V.D., Valiev R.Z. Study of second phase precipitates in nanostructured commercially pure titanium // *Letters on Materials*. 2021. V. 11, No. 3. P. 345–350.

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. Khorev, A. I. (2022). Prospects for the use of titanium alloys. *Mechanical engineering technology*, (2), 5–7. (In Russ.).

2. Kolli, R. P. & Devaraj, A. (2018). A Review of Metastable Beta Titanium Alloys. *Metals*, 8(7), 506.

3. Wang, M., Wang, Y., He, Q., Wei, W., Guo, F. & Su, W. (2022). Chongxiang Huang A strong and ductile pure titanium. *Materials Science and Engineering: A*, 833, 142534.

4. Estrin, Y. & Vinogradov, A. (2013). Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science. *Acta Materialia*, 61(3), 782–817.

5. Bézi, Z., Krállics, G., El-Tahawy, M., Pekker, P. & Gubicza, J. (2017). Processing of ultrafine-grained titanium with high strength and good ductility by a combination of multiple forging and rolling. *Materials Science and Engineering: A*, 688, 210–217.

6. Zherebtsov, S., Kudryavtsev, E., Kostjuchenko, S., Malysheva, S. & Salishchev, G. (2012). Strength and ductility-related properties of ultrafine grained two-phase titanium alloy produced by warm multiaxial forging. *Materials Science and Engineering: A*, 36, 190–196.

7. Mulyukov, R. R., Imayev, R. M. & Nazarov, A. A. et al. (2014). Superplasticity of ul-

- trafine-grained alloys: Experiment, theory, technologies. Moscow, Nauka. P. 284. (In Russ.).
8. Djavanroodi, F. & Janbakhsh, M. (2013). Formability Characterization of Titanium Alloy Sheets. The edited volume Titanium Alloys. Edited by Jan Sieniawski and Waldemar Ziaja. P. 158.
9. Shagiev, M. R., Kruglov, A. A., Rudenko, O. A. & Murzinova, M. A. (2022). Superplastic forming of titanium alloys at 700 °C. *Letters on Materials*, 12(4), 332–335.
10. Sarkeeva, A. A., Kruglov, A. A., Lutfullin, R. Ya., Gladkovskiy, S. V. & Zhilyaev, A. P. et al. (2020). Corrigendum to “Characteristics of the mechanical behavior of Ti–6Al–4V multilayer laminate under impact loading” [Compos B 187 (2020) 107838]. *Composites Part B: Engineering*, 200, 108390.
11. Fan, J., Huang, H., Xue, X., Zhang, W. & Wang, Y. et al. (2020). Hot Rolled Ti6321 Alloy Sheets With Different Initial Microstructures: Microstructure, Mechanical Properties, and Anisotropy Characteristics. *Structural Materials*, 7, 110.
12. Chen, W., Lv, Y., Zhang, X., Chen, C. & Lin, Y. C. et al. (2019). Comparing the evolution and deformation mechanisms of lamellar and equiaxed microstructures in near β -Ti alloys during hot deformation. *Materials Science and Engineering: A*, 758, 71–78.
13. Naydenkin, E. V., Ratochka, I. V., Mishin, I. P. & Lykova, O. N. (2015). Evolution of the Structural-Phase State of a VT22 Titanium Alloy During Helical Rolling and Subsequent Aging. *Russian Physics Journal*, 58, 1068–1073.
14. Zherebtsov, S. V., Murzinova, M. A., Klimova, M. V., Salishchev, G. A. & Popov, A. A. et al. (2013). Microstructure evolution during warm working of Ti–5Al–5Mo–5V–1Cr–1Fe at 600 and 800 °C. *Materials Science and Engineering: A*, 563, 168–176.
15. Klassman, E. Yu., Astanin, V. V. & Lutfullin R. Ya. (2021). Gas saturation of the surface of sheet semi-finished products from titanium alloy VT22. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 18(2), 203–209. (In Russ.).
16. Klassman, E. Yu. & Astanin, V. V. (2020). Low-temperature superplasticity of titanium alloy VT22. *Letters on Materials*, 10(1), 10–15. (In Russ.).
17. Klassman, E. Yu. & Astanin, V. V. (2019). Production of thin sheets from titanium alloy by isothermal rolling. *V sb. trudov XII Vserossiyskogo s'yezda po fundamental'nyim problemam teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki*, 3, 318–320. (In Russ.).
18. Pippan, R., Scheriau, S., Taylor, A., Hafok M. & Hohenwarter, A. et al. (2010). Saturation of Fragmentation During Severe Plastic Deformation. *Annual Review of Materials Research*, 40, 319–343.
19. Sabirov, I., Perez-Prado, M. T., Molina-Aldareguia, J. M., Semenova, I. P. & Salimgareeva, G. Kh. et al. (2011). Anisotropy of mechanical properties in high-strength ultra-fine-grained pure Ti processed via a complex severe plastic deformation route. *Scripta Materialia*, 64(1), 69–72.
20. Edalati, K., Bachmaier, A., Beloshenko, V. & Beygelzimer, Y. et al. (2022). Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances. *Materials Research Letters*, 10(4), 163–256.
21. Rezyapova, L. R., Valiev, R. R., Sitdikov, V. D. & Valiev, R. Z. (2021). Study of second phase precipitates in nanostructured commercially pure titanium. *Letters on Materials*, 11(3), 345–350.

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 04.04.2024; одобрена после рецензирования 29.04.2024; принята к публикации 02.05.2024.

The article was received by the editorial board on 04 Apr. 24; approved after reviewing 29 Apr. 24; accepted for publication 02 May 24.