



УДК 539.2,539.19

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДВОЙНИКОВАНИЯ В ТИТАНЕ VT1-0
ПОСЛЕ МЕХАНИКО-ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ****RESEARCH OF THE PROCESSES OF TWINNING IN TITANIUM VT1-0
AFTER MECHANICS-THERMAL EFFECTS****Н.В. Камышанченко, А.В. Гальцев, В.А. Беленко
N.V. Kamyshanchenko, A.V. Gal'tsev, V.A. Belenko**Белгородский национальный исследовательский университет, Россия, 308015, г. Белгород,
ул. Победы, 85

Belgorod National Research University, 85 Pobedy St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: kamysh@bsu.edu.ru, galtsev@bsu.edu.ru, vbelenko@bsu.edu.ru

Аннотация

При температуре отжига 7000С деформированного технически чистого титана практически не наблюдается двойниковых прослоек. Проведенные эксперименты с титаном марки VT1-0 обнаружили зуб текучести, что характерно для протекания процесса двойникования в технически чистом титане, а уширение пиков на рентгенограммах говорит о наличии остаточных внутренних напряжений, которые и способствуют образованию дислокаций с дефектами упаковки.

Abstract

While annealing of deformed commercially pure titanium at 7000 C twinned layers are scarcely observed. The conducted experiments with titanium VT1-0 (VT1-0) revealed yield drop which is typical for the process of twinning in commercially pure titanium, while peak broadening seen at X-ray patterns indicates the presence of residual internal stresses which cause dislocations with stacking faults.

Ключевые слова: ГПУ-структура, титан, двойникование, плоскости двойникования.**Keywords:** HCP-structure, titanium, twinning, the plane of twinning.**Введение**

Двойникование не является преобладающим видом деформации в металлах и не похоже на процесс индивидуального скольжения, которое, хотя и осуществляется путем сдвига, все же ограничивается одной кристаллографической плоскостью и по своей структуре является двумерным дефектом.

Двойникование при определенных условиях происходит во всех металлах, но является характерным для металлов с ограниченными плоскостями скольжения, например, в гексагональных плотно упакованных (ГПУ) структурах.

В металлах с ГПУ структурой отношение осей не равно теоретическому значению для плотной упаковки, и поэтому в решетке нет кристаллографической плоскости, зеркальное отражение от которой получилось бы неким кристаллографическим сдвигом. Поэтому плоскости скольжения в них не совпадают с плоскостями двойникования и двойникование осуществляется движением либо по одной двойнивающей дислокации по всей стопке атомных плоскостей с переходом последовательно в каждый слой, либо совместным движением стопки таких дислокаций, если она уже есть [1]. Процесс двойникования находится в зависимости не только от величины отношений осей c/a , но и от других факторов: чистоты металла, размеров зерна, температуры воздействия. Так если, в титане ($c/a=1,586$) с поликристаллической структурой при комнатной температуре двойникова-



ние было обнаружено в трех двойникующих плоскостях ($\{10\bar{1}2\}\{11\bar{2}1\}\{11\bar{2}2\}$) [2,3], то в цирконии ($c/a=1,593$) при таких же условиях обнаружено четыре плоскости двойникования ($\{10\bar{1}2\}\{11\bar{2}1\}\{11\bar{2}2\}$ и $\{11\bar{2}3\}$) [4]. Двойникование усиливается с увеличением размера зерна, чистоты металла и упорядочиванием текстуры. Так, при температуре жидкого кислорода в сравнении с комнатной у крупнозернистого титана имеется две плоскости двойникования, тогда как при 500°C обнаружена одна плоскость двойникования $\{10\bar{1}2\}$ [2], но при 700°C образование двойников практически не наблюдается [5], а при 800°C двойникование уже происходит по плоскостям ($\{10\bar{1}2\}\{11\bar{2}1\}$ и $\{11\bar{2}2\}$) [6].

Одним из главных факторов, влияющих на зарождение двойника, является наличие концентраторов напряжений в объеме кристалла, которое может быть создано интенсивной деформацией, закалкой от высоких температур и другими способами.

Экспериментально установлено, что в монокристаллическом титане при температуре 20°C с $\epsilon=10\%$ двойники обнаруживаются в 80-90% зерен исследуемого материала, а при $\epsilon=30\%$ они занимают только 60% объема зерна [7].

Полученные экспериментальные результаты и базирующиеся на них теоретические обоснования, казалось бы, охватывают все важнейшие направления, дающие право утверждать о всестороннем изучении свойств титана. Однако широта применения этого материала в различных отраслях производства активизировало проведение новых или углубленного изучения старых научно-исследовательских работ с целью объяснения поведения изделий из титана в сложных технологических и эксплуатационных процессах.

Целью данного исследования является изучение формирования структуры технически чистого поликристаллического титана марки ВТ1-0, полученной в результате интенсивного деформирования и последующего температурного воздействия.

Технология и результаты эксперимента

В качестве материала исследования выбран поликристаллический титан технической чистоты марки ВТ1-0, химический состав которого представлен в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Химический состав титана ВТ1-0 (ГОСТ 2649-85)
Chemical composition of titanium ВТ1-0 (GOST 2649-85)

Материал	Химический состав, %																
	Ti	Al	V	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Nb	Sn	Si	Zr	Pb	Ru	O	N	H
Титан ВТ1-0	99.750	0.0050	0.0305	0.0050	0.0100	0.0232	0.0050	0.0100	0.0050	0.0168	0.0100	0.0135	0.0287	0.0100	0.0600	0.0123	0.0050

Заготовки из титана подвергались пластической деформации на вальцах «ВЭМ-ЗСМ» при 500°C с обжатием за проход 15-20%. Полученные полосы толщиной около 1,5 мм и $\epsilon=75\%$ отжигались в вакуумной печи «СНВЭ-131/14» с остаточным давлением не ниже 10^{-5} Па при температурах 550°C - 850°C в течение 60 мин с последующим остыванием со скоростью $18^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ с печью. Для определения макроструктуры, микроструктуры, рентгенографических данных и др. из полосы вырезались электроэрозионным способом на установке AQ300L образцы размером 10x10 мм, которые подвергались шлифовке и последующей полировке на установке «Strues TenuPol-5». Морфология поверхности образцов исследовалась с помощью микроскопа «OLYMPUS GX51», микроструктура – при помощи просвечивающегося электронного микроскопа «JEM-2100», оснащенного 200 КВ



электронной пушкой с полевой эмиссией и энергетическим фильтром. Определение средних размеров зерен было выполнено методом «случайных секущих» по ГОСТ 5639-82. Рентгеноструктурный анализ осуществлялся на рентгеновском спектрометре «ARL X'TRA». Уровень напряжений определялся качественно по полуширине пиков в сравнении с эталонным образцом. Съемка проводилась в излучениях меди $\text{CuK}\lambda$ ($\lambda=0.154178$ nm) с напряжением 40кВ и током 40мА.

Сравнивая некоторые характеристики титана в исходном состоянии (табл. 2) и полученных в результате механико-термического воздействия (табл. 3), можно выделить существенные различия по всем рассматриваемым показателям.

Таблица 2
Table 2

Механические свойства исходного материала марки BT1-0
The mechanical properties of the starting material of the brand BT1-0

Материал	σ_s , МПа	σ_B , МПа	H_V 100	Средний размер зерна, мкм
Титан BT1-0	173	318	150	85,72

Таблица 3
Table 3

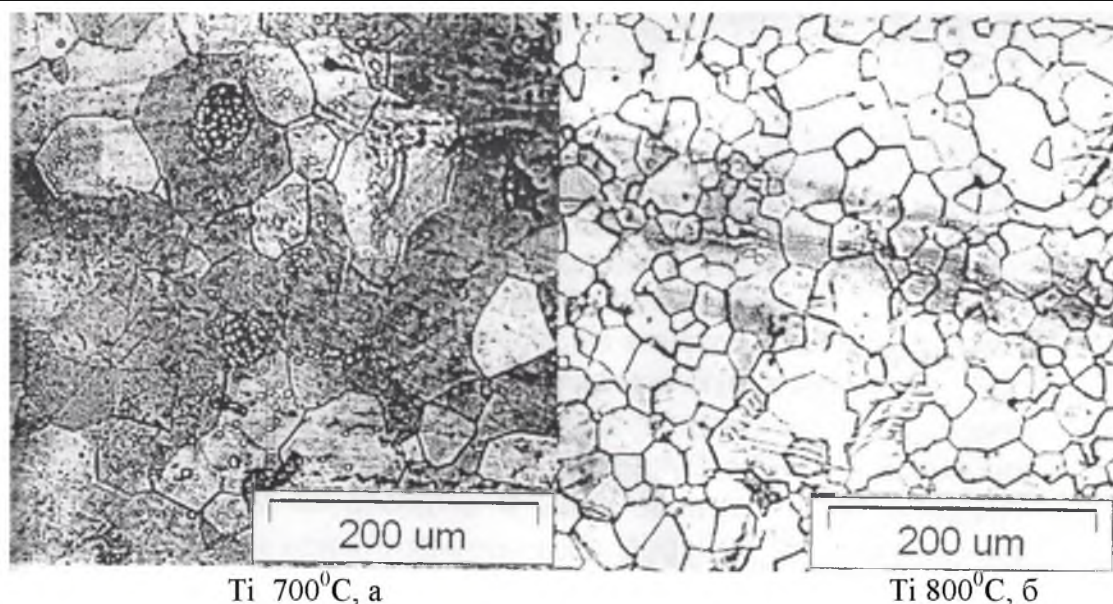
Свойства титана BT1-0 после термообработки
The properties of titanium BT1-0 after heat treatment

№	Температура отжига, °С	Размер зерна (d), мкм	Микротвердость, HV	σ_s , МПа	σ_B , МПа	Коэффициент Холла-Петча, МПа м ^{1/2}
1.	550	7,3	217	430	580	0,75
2.	600	21	192	360	440	0,93
3.	650	29	187	340	420	0,99
4.	700	47,8	183	314	393	1,1
5.	850	53,1	175	280	380	0,94

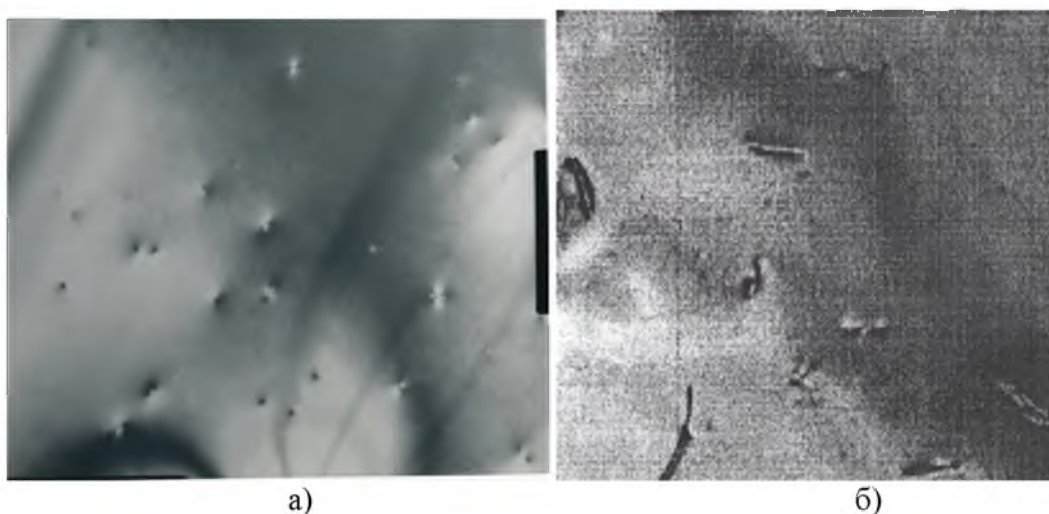
В результате пластического деформирования образовалась мелкозернистая структура с сохранением α -модификации. Исследование установило, что деформация поликристаллического α -Ti осуществляется, в основном, скольжением по призматическим плоскостям $\{\bar{1}012\}$ и, как вторичное, по пирамидальным плоскостям $\{10\bar{1}1\}$ и $\{\bar{1}012\}$. Скольжение по этим плоскостям развивается вдоль плотноупакованных направлений $\langle 1210 \rangle$, лежащих в плоскости базиса [8,9].

Отжиг титановых образцов при температурах 150-250-350-500⁰С не приводит к заметному изменению характера микроструктуры. Так, при температурах 150⁰С в образцах только выделяются фрагменты субзерен неравновесной формы, вытянутые вдоль прокатки. С повышением температуры отжига до 500⁰С в образцах наблюдается незначительный рост структурных элементов, что говорит о начале процессов рекристаллизации. После отжига при температурах 500⁰С-600⁰С начинают появляться элементы зеренной микроструктуры, что характерно для начальных стадий рекристаллизации и позволяет утверждать о термостабильности титана в данном диапазоне температур.

При отжиге в диапазоне 700⁰С-800⁰С в титане происходит дальнейший рост зерен и совершенствование зеренных границ (рис. 1), а в зернах отмечается повышенная концентрация дислокаций и обнаружено присутствие двойников (рис. 2).



Тi 700⁰С, а
 Тi 800⁰С, б
 Рис. 1. Микроструктура титана после нагрева от 700⁰С (а) и 800⁰С (б)
 Fig. 1. Microstructure of titanium after heating from 700⁰С (а) and 800⁰С (б)



а) б)
 Рис. 2. Фрагменты микроструктуры титана после отжига при 700⁰С. (а. Метка на фото соответствует 500 нм) и 800⁰С. (б. Метка на фото соответствует 250 нм)
 Fig. 2. Fragments of microstructure of titanium after annealing at 700⁰С. (а. The label in the photo corresponds to 500 nm) and 800⁰С. (б. The label on the photo corresponds to 250 nm)

В результате полного отжига при температуре близкой к температуре полиаморфного превращения происходит собирательная рекристаллизация и размеры зерен, независимо от степени деформации, становятся практически одинаковыми [10].

О наличии этапа возврата в процессе изотермического отжига говорят данные измерения прочностных характеристик титана (табл. 3).

Пластическая деформация сопровождается образованием дефектов различного типа и характер их распределения в объеме разнообразен. Устранение этих дефектов, их преобразование происходит путем различных элементарных процессов, совершающихся с различной скоростью, в различных температурных интервалах и с различной энергией активации. Рентгеноструктурный анализ пластически деформированного титана показал наличие больших внутренних напряжений второго и третьего рода, о чем свидетельствует уширение пиков по сравнению с параметрами эталонного образца [11] (рис. 3).

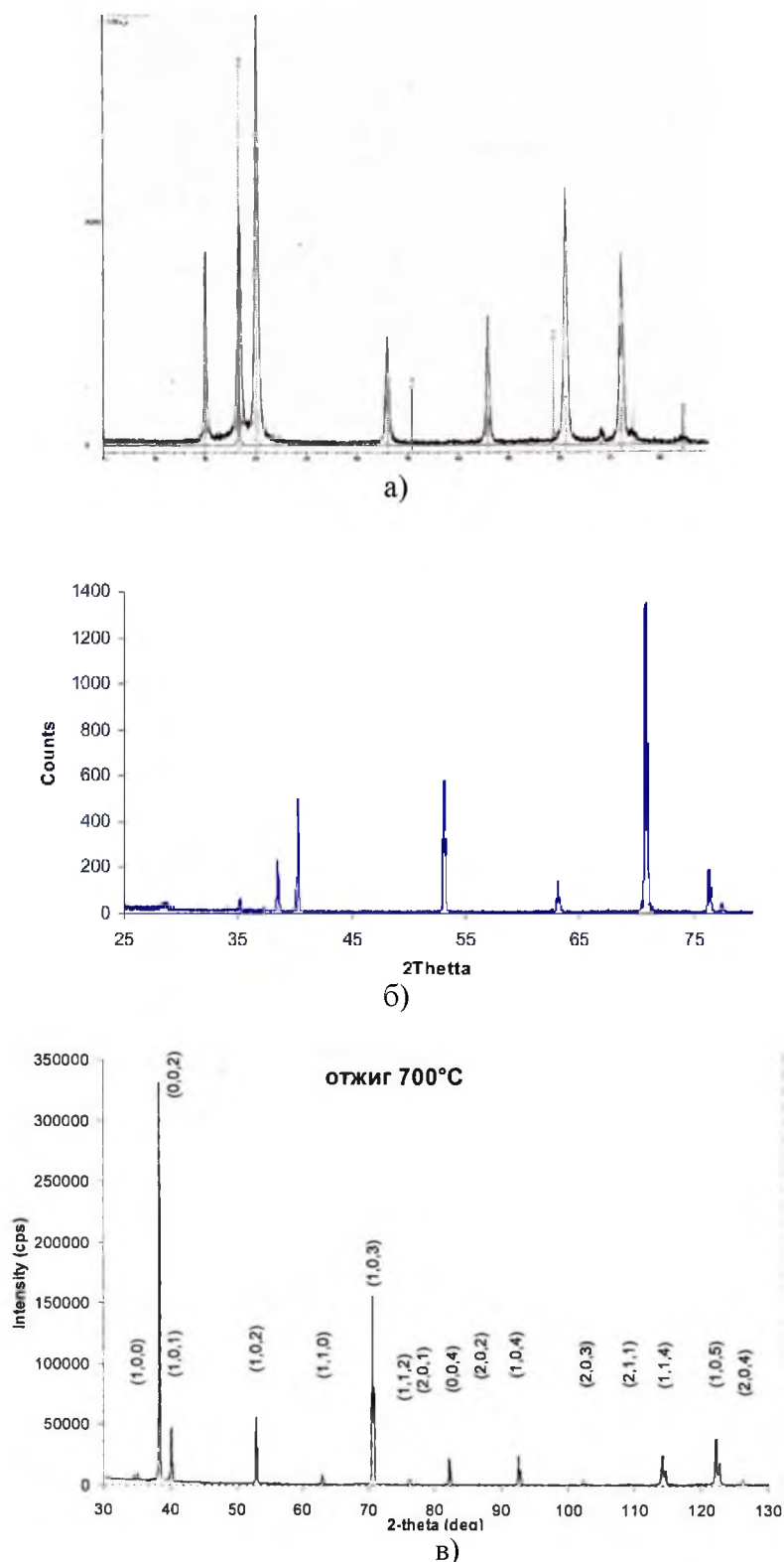


Рис. 3. Результаты рентгеноструктурного анализа для: а) – эталонного образца; б) – прокатанных на $\epsilon=75\%$ при 500°C в) отожженных при 700°C

Fig. 3. Results of x-ray diffraction for: a) reference sample; б) is laminated on $\epsilon=75\%$ at 500°C в) annealed at 700°C

Пластическое деформирование при $\epsilon=75\%$ привело к значительным изменениям структуры и механических параметров исследуемого титана. В частности, в деформированных растяжением образцах, прошедших дополнительный отжиг при 700°C , был обна-



ружен зуб текучести [12], что характерно для протекания процесса деформации двойникованием. Одновременное уменьшение микротвердости дает возможность предположить об уменьшении порогового значения внутреннего напряжения.

Наличие перечисленных факторов дает возможность предположить о наличии условий для образования двойникующих дислокаций, движения их вдоль плоскости двойникования (рис. 2, в левом верхнем угле), аннигиляции или выходе на поверхность образца в виде плоскопараллельных прослоек. Вблизи образованной плоскопараллельной двойниковой прослойки наблюдается участок свободный от внутренних дислокаций (рис. 2,а). Но с увеличением температуры отжига на поверхности образца наблюдаются их выход на поверхность в виде дислокационных петель характеризующиеся наличием дефекта упаковки (рис. 2,б).

Выводы

Наличие дефектов упаковки свидетельствует о диссоциации дислокаций с образованием частичных дислокаций, что позволяет сделать вывод о влиянии температуры отжига на структурное состояние глубоко деформированного исследуемого титана.

Присутствие плоскопараллельных двойниковых прослоек позволяет утверждать о наличии остаточных внутренних напряжений и значительное количество дефектов вокруг двойникующих дислокаций при неполной температуре отжига пластически деформированного титана.

Обнаруженное наличие двойниковой прослойки при температуре отжига 700⁰С позволяет утверждать об их возможности образования при выбранных условиях механико-термического воздействия.

Список литературы

References

1. Yoo M.H. 1981.– Met Trans. A. v12, №3: 409
2. Rosi F.D., Dube C.A., Alexander B.H. 1953. Mexchanism of plastic flow in Ti, determination of slip and twinning elements. AIME, 197: 257-265.
3. Белов С.П., Брун М.Я., Глазунов С.Т. 1992. Металловедение титана и его сплавов. М.: Metallurgy, 352.
Belov S. P., Brun M. Ya., Glazunov S. T. 1992. Metallography of titanium and its alloys. M.: Metallurgy, 352.
4. Дуглас Д. 1975. Металловедение циркония. Перев. с англ./Под ред. А.С. Займовского. М.: Атомиздат, 357.
Douglas D. 1975. Metallography of zirconium. Pens. s angl./Under the editorship of A. S. Tymovskogo. M.: Atomizdat, 357.
5. Lii Y., Reed-Hill R.E. 1970. Some aspects of the variation of the strain anisotropy in Ti. – Met.Trans., 1: 447-453.
6. Me Hargue C.J., Hammond J.P. 1953. Deformations in Ti at elevated temperatures. – Acta Met., 1: 700-705.
7. Mullins S., Patchett B.M. 1981. Met. Trans. A. V12. №5, 853.
8. Цвиккер У. 1979. Титан и его сплавы. Пер. с нем. – М.: Metallurgy, 512.
Tsvikker U. 1979. Titanium and his alloys. The lane with him. – М.: Metallurgy, 512.
9. Montefro S.N. 1973. Reed-Hill R.E. An analysis stress-strain curves. Metallurgy Trans, V4: 1011-1015.
10. Козырин Г.И. Титановые сплавы в машиностроении – Л: Машиностроение, 2004. – 320с.
Kozyrin G. I. 2004. Titanium alloys in mechanical engineering – Leningrad: Mashinostroenie, 320.



11. Камышанченко Н.В., Кузьменко И.Н., Кунгурцев М.С. и др. 2010. Температурная зависимость механических свойств титана марки VT1-0// Упрочняющие технологии и покрытия. №7, 2010. – С.3-7.

Kamyshanchenko, N. In. Kuzmenko, I. N., Kungurtsev, M. S., etc. 2010. Temperature dependence of the mechanical properties of titanium grade VT1-0// Hardening technology and coatings. No. 7: 3-7.

12. Закономерности процессов двойникования, обусловленные дефектной структурой, сформированной механико-термическим воздействием, на примере технически чистого титана : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.07 / И. С. Никулин. - Белгород, 2010. - 117 с.

Regularities of the processes of twinning due to the defective structure formed mechanical-thermal action, for example, commercially pure titanium : Diss. kand. Fiz.-Mat. Sciences : 01.04.07 / I. S. Nikulin. - Belgorod, 2010. - 117 p..