

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-9-45-51>

## РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА $\alpha$ - И ПСЕВДО- $\alpha$ -ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

© Павел Валерьевич Андреев<sup>1,2\*</sup>, Ксения Евгеньевна Сметанина<sup>1</sup>, Дарья Алексеевна Гудзь<sup>1</sup>, Наталия Юрьевна Табачкова<sup>3,4</sup>, Яна Сергеевна Шадрина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского, Россия, 603105, г. Нижний Новгород, ул. Ашхабадская, д. 4.

<sup>2</sup> Институт химии высокочистых веществ имени Г. Г. Десятых РАН, Россия, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Тропинина, д. 49; \*e-mail: andreev@phys.unn.ru

<sup>3</sup> НИТУ «МИСИС», Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., д. 4.

<sup>4</sup> Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН, Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38.

*Статья поступила 22 мая 2020 г. Поступила после доработки 23 июня 2020 г.  
Принята к публикации 26 июня 2020 г.*

Титановые сплавы широко применяют в качестве материалов для элементов ядерных энергетических установок, к которым предъявляются высокие требования надежности. Цель данной работы — разработка методики рентгенодифракционного исследования образцов  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов ПТ-3В, ПТ-7М и VT1-0. Обработку поверхности образцов для испытаний с использованием рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD-7000 (CuK $\alpha$ -излучение) осуществляли с помощью полировки (механической и электрохимической) и химического травления. Установлено, что сплавы ПТ-3В и ПТ-7М характеризуются смешанной структурой, состоящей из  $\alpha$ - и  $\alpha'$ -фаз, по границам зерен которых наблюдается выделение субмикронных частиц  $\beta$ -фазы. Результаты рентгенофазового анализа, которые сопоставляли с данными металлографии и электронной микроскопии, в значительной степени зависят от способа, качества и продолжительности обработки поверхности. Электрохимическая полировка и обработка кислотой приводят к уменьшению ширины дифракционных максимумов и более явному проявлению их «тонкой» структуры. «Расщепление» основных рентгеновских пиков титана — следствие тонкой структуры первичного рентгеновского излучения (K $\alpha_{1,2}$ -дублет). Зависимость от способа и качества подготовки поверхности снижает достоверность количественного анализа фазового состава. Поэтому необходима верификация результатов с помощью прямых методик исследования структуры сплавов.

**Ключевые слова:** титановые сплавы; рентгеновский фазовый анализ; механическая полировка; электрохимическая полировка.

## X-RAY POWDER DIFFRACTION ANALYSIS OF THE PHASE COMPOSITION OF $\alpha$ - AND NEAR- $\alpha$ -TITANIUM ALLOYS

© Pavel V. Andreev<sup>1,2\*</sup>, Ksenia E. Smetanina<sup>1</sup>, Daria A. Gudzy<sup>1</sup>, Nataliya Yu. Tabachkova<sup>3,4</sup>, Yana S. Shadrina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lobachevsky State University, 4, ul. Ashkhabadskaya, Nizhny Novgorod, 603105, Russia.

<sup>2</sup> Institute of Chemistry of High-Purity Substances, RAS, 49, ul. Tropinina, Nizhny Novgorod, 603951, Russia; \*e-mail: andreev@phys.unn.ru

<sup>3</sup> National University of Science and Technology “MISIS”, 4, Leninsky pr., Moscow, 119049, Russia.

<sup>4</sup> Prokhorov General Physics Institute, RAS, 38, ul. Vavilova, Moscow, 119991, Russia.

*Received May 22, 2020. Revised June 23, 2020. Accepted June 26, 2020.*

Titanium alloys are widely used as materials for the elements of nuclear power plants, which are subject to high reliability requirements. The goal of the study is to develop X-ray diffraction analysis of the phase composition of  $\alpha$ - and near- $\alpha$ -titanium alloys. Surface treatment of the samples of titanium alloys PT-3V, PT-7M and VT1-0 was carried out by mechanical, electrochemical polishing and chemical etching. It is shown that PT-3V and PT-7M alloys are characterized by a mixed structure consisting of  $\alpha$ - and  $\alpha'$ -phases with precipitation of submicron particles of the  $\beta$ -phase along the grain boundaries. The results of X-ray diffraction analysis of the samples obtained on an X-ray diffractometer Shimadzu XRD-7000 (CuK $\alpha$  radiation) were compared with the data of metallography and electron microscopy. It is shown that the results of X-ray diffraction analysis strongly depend on the method, quality and duration of the surface treatment of the samples. Electrochemical polishing and acid treatment reduce the width of diffraction peaks and

lead to a more pronounced manifestation of their “fine” structure thus demonstrating the presence of at least two crystalline phases in the alloys. “Splitting” of the main X-ray peaks of titanium is a consequence of the fine structure of primary X-ray radiation ( $K\alpha_{1,2}$ -doublet). Presence of “fine” structure of X-ray peaks and correlation between the intensities of different peaks appears to depend essentially on the mode and quality of surface treatment of the titanium alloy thus reducing the reliability of quantitative analysis of the phase composition of titanium alloys without verification of the results by direct methods of studying alloy structure.

**Keywords:** titanium alloys; X-ray phase analysis; mechanical polishing; electromechanical polishing.

## Введение

В настоящее время к надежности ядерных энергетических установок (ЯЭУ), а соответственно, и к эксплуатационным характеристикам конструкционных материалов, применяемых для их изготовления, предъявляются повышенные требования [1 – 2]. Обеспечить необходимую эксплуатационную надежность теплообменного оборудования ЯЭУ позволяют титановые  $\alpha$ -сплавы с малым (не более 5 % об.) содержанием частиц  $\beta$ -фазы, характеризующиеся прочностью, пластичностью и устойчивостью к высоким нагрузкам и температурам [1 – 4].

Коррозионная стойкость сплавов в условиях воздействия повышенных температур и солевых отложений (так называемой горячей солевой коррозии) в значительной степени определяется их фазовым составом. Изменение структурно-фазового состояния границ зерен при интенсивной пластической деформации дает возможность существенно повысить стойкость ультрамелкозернистых титановых сплавов к горячей солевой коррозии и коррозионно-усталостному разрушению [5 – 7].

Фазовые превращения в титановых сплавах проходят с образованием метастабильных фаз, значительно влияющих на свойства металла. Так, при закалке из  $\beta$ -области в низколегированных сплавах наблюдается мартенситный переход  $\beta \rightarrow \alpha'$ , а в сплавах с переходными элементами — формирование мартенситной  $\alpha''$ -фазы [1, 8, 9]. Морфологическое подобие  $\alpha'$ - и  $\alpha''$ -фаз, образующихся в результате превращения  $\beta$ -фазы в низкотемпературную модификацию твердого раствора на основе  $\alpha$ -Ti [9], требует при металлографических испытаниях использования методов рентгенофазового анализа (РФА). Кристаллогра-

фические параметры фаз титана приведены в табл. 1.

Обычно подготовка образцов для РФА включает операции шлифования и полирования. Механическая полировка титана алмазной пастой сопровождается интенсивным наклепом поверхности, что приводит к необходимости электролитической полировки на завершающей стадии пробоподготовки. Особенность анодной обработки образца состоит в том, что при использовании в качестве электролитов кислот ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и др.) происходит быстрое пассивирование поверхности, и процесс растворения прекращается. Для эффективного анодного растворения требуется вводить в состав электролита активирующие добавки (например, плавиковую кислоту), в присутствии которых коррозионное разрушение пассивированной поверхности интенсифицируется и шлиф «перетравливается». Чтобы избежать этого, воду в электролите полностью или частично заменяют неводными растворителями (метанолом, безводной уксусной кислотой и др.) и снижают рабочую температуру [10 – 12]. Такой способ подготовки хорошо зарекомендовал себя при электронно-микроскопических исследованиях, однако электрохимическая полировка поверхности может менять характер дифракционной картины при РФА за счет «альфирования» (« $\alpha$ -case-эффекта»), возникающего при насыщении кислородом поверхностного слоя титана [13 – 15].

Цель работы — разработка методики рентгенодифракционного исследования  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов.

**Таблица 1.** Кристаллографическое описание фаз титана  
**Table 1.** Structural parameters of titanium crystal phases

Фаза	Сингония	Пространственная группа симметрии	Параметры элементарной ячейки		
			$a$ , Å	$b$ , Å	$c$ , Å
$\alpha$ -Ti	Гексагональная (ГПУ)	$P6_3/mmc$	2,90	—	4,67
$\alpha'$	Гексагональная	$P6_3/mmc$	2,94	—	4,67
$\alpha''$	Ромбическая	$Cmcm$	2,996	4,98	4,65
$\beta$	Кубическая (ОЦК)	$Im\bar{3}m$	3,27	—	—

## Материалы, методы, оборудование

Исследовали образцы промышленных титановых сплавов ПТ-7М, ПТ-3В и ВТ1-0, полученных по стандартным режимам термомеханической обработки. ПТ-7М и ВТ1-0 относятся к группе  $\alpha$ -, ПТ-3В — псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов. Химический состав сплавов представлен в табл. 2.

Испытания проводили на поверхности свежего среза. Поверхность готовили с использованием механической шлифовки и полировки алмазными пастами различной дисперсности. После обработки уровень шероховатости составлял менее 1 мкм (алмазная паста 1/0). Образующийся наклепанный слой устраняли при помощи электролитической полировки в электролите (75 %  $H_2SO_4$  + 25 %  $HF$ , напряжение — 9 В, сила тока — 2,5 А, продолжительность — 30, 120 с). Химическое травление шлифов осуществляли концентрированной плавиковой кислотой (продолжительность — 5 с).

Для РФА использовали порошковый дифрактометр Shimadzu XRD-700 (Япония) ( $CuK\alpha$ -излучение,  $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ , схема Брэгга – Брэнтанно, ориентация гониометра — вертикальная), для микроструктурных исследований — интерференционный (Leica IM DRM), растровый электронный (Jeol JSM-6490, с энергодисперсионным микроанализатором Oxford Instruments INCA 350) и просвечивающий электронный (Jeol JEM-2100, с энергодисперсионным микроанализатором JED-2300 EDS) микроскопы.

При выборе режимов рентгеновских испытаний с помощью теоретических дифрактограмм фаз  $\alpha$ - и  $\beta$ -Ti для  $CuK\alpha$ -излучения определяли необходимый диапазон углов съемки ( $2\theta = 34 - 42^\circ$ ), в котором наблюдались дифракционные пики (100), (002) и (101)  $\alpha$ -Ti. Принятые параметры съемки: ширина щели — 0,15 мм, шаг сканирования —  $0,02^\circ$ , время экспозиции — 6 с [5, 6]. «Глубина дифракции» для выбранных условий —  $\sim 8 \text{ мкм}$ .

Для большинства способов обработки основные пики  $\alpha$ -Ti состоят из двух или более близко расположенных дифракционных максимумов. Такое «расщепление» может свидетельствовать о наличии в структуре сплавов кристаллических фаз с близкими параметрами кристаллической решетки (например,  $\alpha$ -,  $\alpha'$ - и  $\alpha''$ -фазы). Поэтому это учитывали при выборе режима съемки.

## Обсуждение результатов

На рис. 1, 2 представлены результаты исследования микроструктуры образцов.

Видно, что микроструктура сплава ВТ1-0 неоднородна, в ней присутствуют достаточно круп-

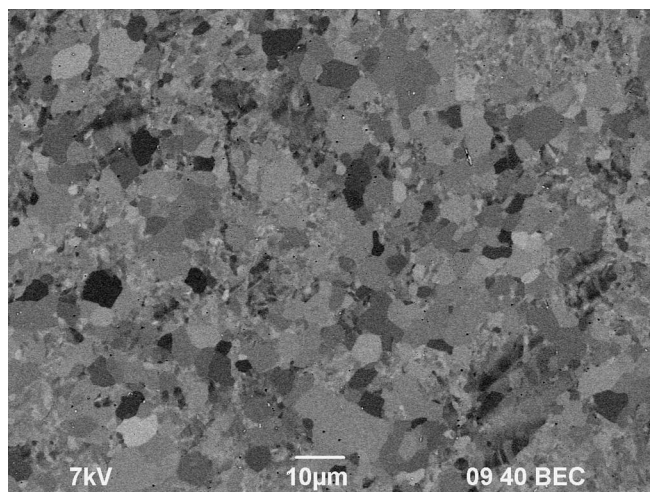


Рис. 1. Микроструктура  $\alpha$ -сплава ВТ1-0

Fig. 1. The microstructure of VT1-0  $\alpha$ -titanium alloy

ные рекристаллизованные зерна (средний размер — 10 – 20 мкм). Отметим, что зерна равноосной формы достаточно типичны для  $\alpha$ -фазы титана [8].

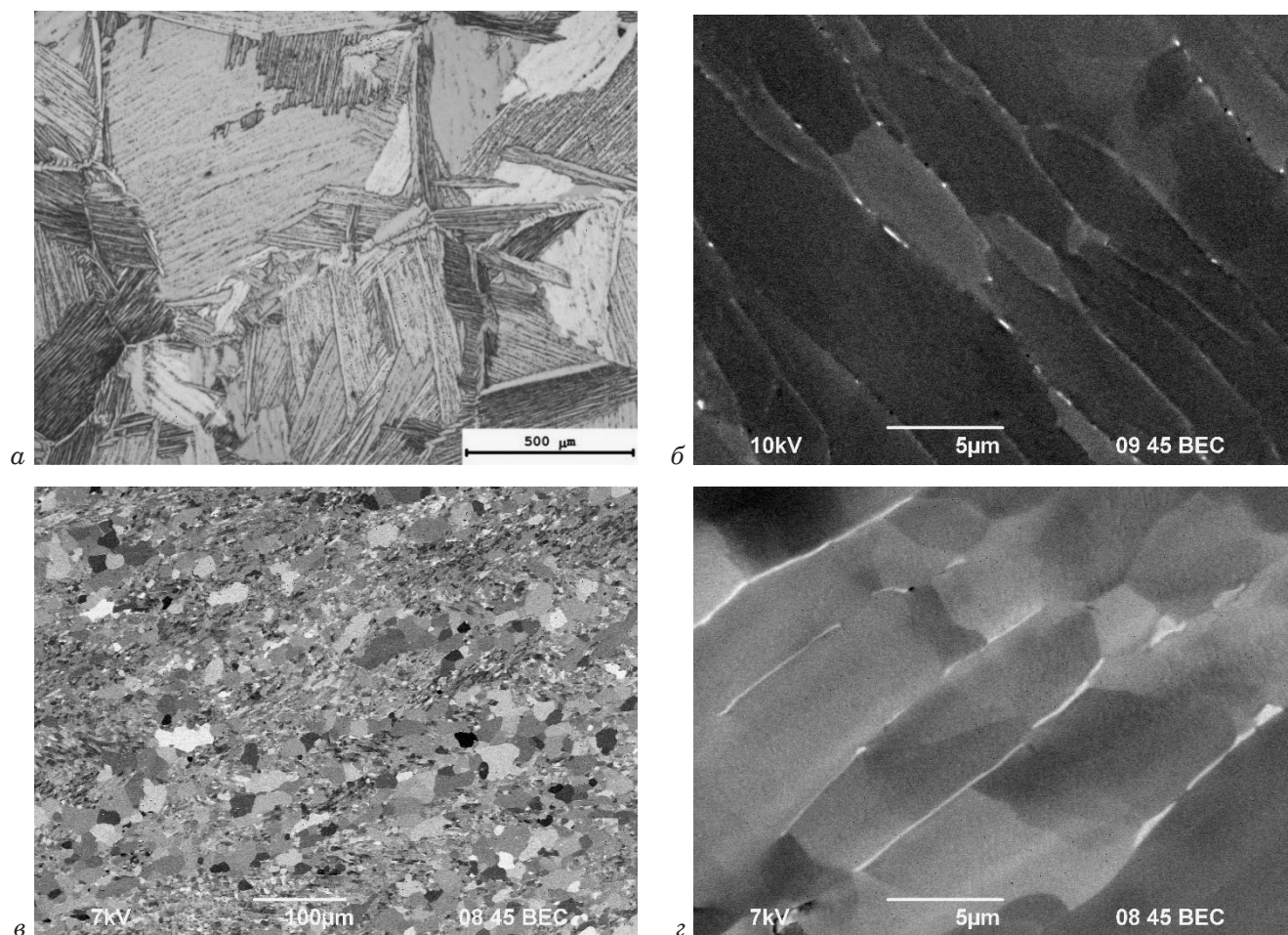
В случае ПТ-7М зерна титана имеют игольчатую форму, их можно охарактеризовать как  $\alpha'$ - или  $\alpha''$ -фаза [8]. На границах зерен (режим контраста от атомного номера — Z-контраста) прослеживаются субмикронные светлые частицы с повышенной концентрацией циркония.

Сплав ПТ-3В имеет разномасштабную микроструктуру, в которой участки с крупными (30 – 50 мкм) равноосными зернами  $\alpha$ -фазы чередуются с зернами  $\alpha'$ -фазы пластинчатой формы (размер — 3 – 5 мкм). На границах зерен  $\alpha'$ -фазы присутствуют светлые частицы, обогащенные ванадием. Поскольку ванадий —  $\beta$ -стабилизатор [8], можно предположить, что выделившиеся по

Таблица 2. Химический состав титановых сплавов (% масс.)

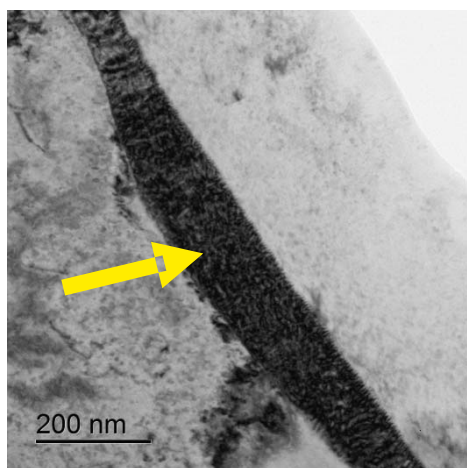
Table 2. Chemical composition of titanium alloys (wt.%)

	Сплав		
	ВТ1-0	ПТ-3В	ПТ-7М
Al	0,62	4,73	2,45
Zr	0,02	0,019	2,63
V	—	1,88	0,002
Si	0,016	0,03	0,02
Fe	0,059	0,11	0,086
Sn	—	—	0,005
Nb	—	—	0,024
O <sub>2</sub>	—	0,042	0,12
H <sub>2</sub>	—	0,004	0,001
N <sub>2</sub>	—	0,01	0,003
C	—	0,0024	0,028



**Рис. 2.** Микроструктура титановых сплавов ПТ-7М (а, б) и ПТ-3В (в, г), в том числе в режиме Z-контраста соответственно

**Fig. 2.** The microstructure of PT-7M (a, b) and PT-3V (c, d) titanium alloys including in Z-contrast mode, respectively



**Рис. 3.** Частицы β-фазы (указаны стрелкой) (сплав ПТ-3В)

**Fig. 3.** β-Phase particles in the light field (indicated by the arrow) (PT-3V alloy)

границам зерен частицы второй фазы — β-фаза. Причем их объемная доля и размер заметно больше, чем в сплаве ПТ-7М.

Данные просвечивающей электронной микроскопии (режим светлого поля) (рис. 3) и анализ электронограмм подтвердили, что параметры кристаллической решетки выделившейся частицы близки к кубической решетке β-фазы.

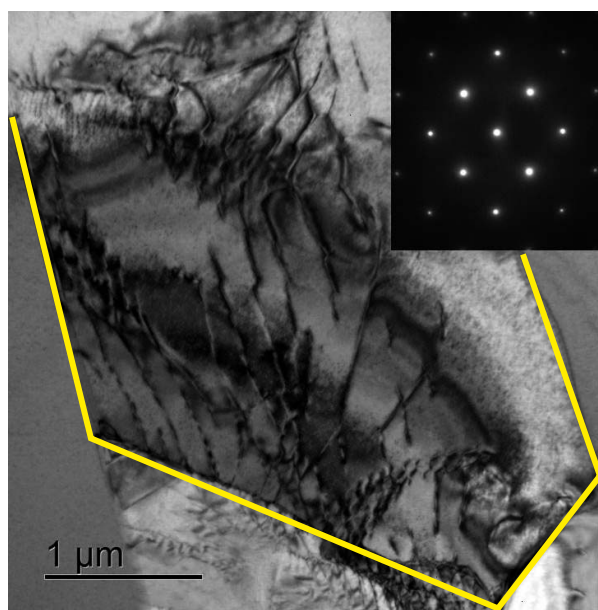
Электронно-микроскопические исследования микроструктуры свидетельствуют, что внутри мелких зерен α-фазы титана (данные дифракционных картин для отдельных зерен крупнокристаллического сплава свидетельствуют, что это именно зерна α-Ti) присутствуют хаотически расположенные решеточные дислокации (рис. 4). Углы разориентировки образуемых ими границ достигают 120° (в тройных стыках).

Обработку поверхности образцов проводили поэтапно:

1 – 4) механическая полировка алмазной пастой (дисперсность 20 – 28, 10 – 14, 3 – 5 и менее 1 мкм);

5 – 6) электрохимическая полировка в течение 30 и 120 с;

7) повторная механическая полировка алмазной пастой (дисперсность менее 1 мкм) с после-



**Рис. 4.** Равноосное зерно  $\alpha$ -Ti и его электронограмма (сплав ПТ-3В) (контур указывает границы зерна)

**Fig. 4.** The small  $\alpha$ -Ti grain and its TEM diffraction pattern (PT-3V alloy) (the contour indicates the grain boundaries)

дующей электрохимической полировкой в течение 120 с;

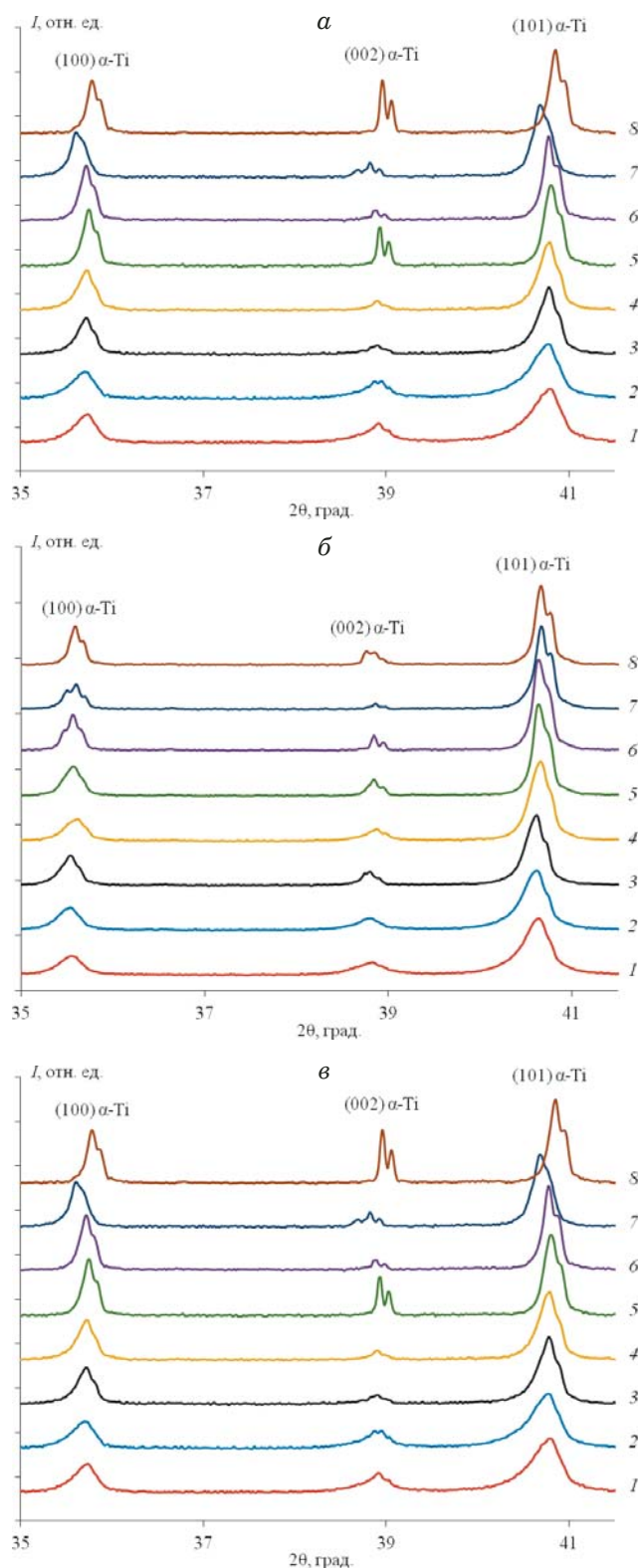
8) химическое травление в плавиковой кислоте.

После каждого из этапов осуществляли съемку дифрактограмм (рис. 5).

Выявили, что «тонкая» структура рентгеновских пиков отчетливо проявляется на этапах обработки 5 (сплавы ПТ-3В, VT1-0) и 8 (ПТ-7М), на других этапах она отсутствует. Это связано с шероховатостью или наклепом при механической обработке и с эффектом «альфирования» при химической обработке поверхности. Отметим, что «расщепление» пиков практически не фиксируется даже в случае весьма качественной механической полировки с помощью алмазных паст 3/5 и 1/0 (дифрактограммы 3 и 4). Пики, соответствующие частицам  $\alpha'$ - и  $\beta$ -фаз, не наблюдали, что, вероятно, обусловлено малостью их объемной доли и субмикронным размером.

Проявление «тонкой» структуры основных рентгеновских пиков (их «расщепление») — следствие тонкой структуры первичного рентгеновского излучения ( $K\alpha_{1,2}$ -дублет). Если качество дифрактограммы позволяет разделить пики дифракции от  $K\alpha_{1,2}$ -дублета, то можно утверждать, что качество эксперимента близко к предельно возможному для данного прибора.

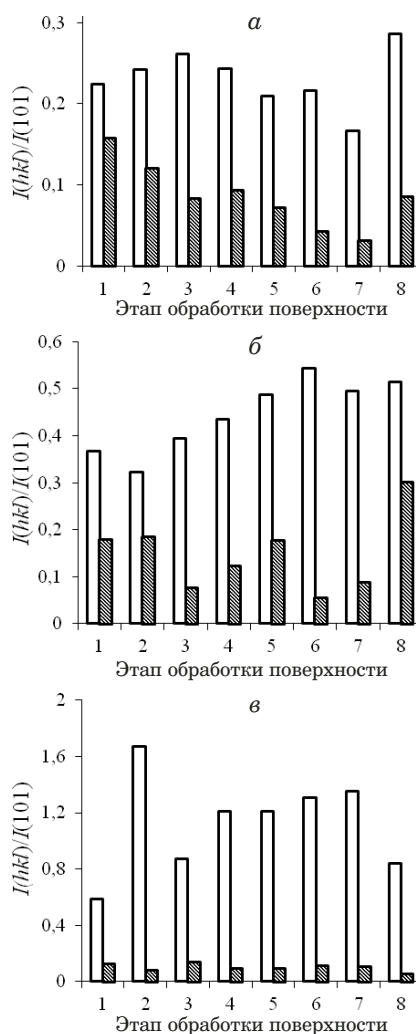
Для проведения количественного фазового анализа необходимо убедиться в отсутствии влияния дефектных поверхностных слоев на относительные интенсивности составляющих пика,



**Рис. 5.** Дифрактограммы сплавов ПТ-3В (а), ПТ-7М (б) и VT1-0 (в) (нумерация соответствует этапу обработки поверхности)

**Fig. 5.** The diffraction patterns of titanium alloys PT-3V (a), PT-7M (b), and VT1-0 (c) (numbering corresponds to the stage of surface treatment)

имеющего «тонкую» структуру. Для упрощения предположили, что каждая из имеющихся в со-



**Рис. 6.** Диаграммы относительных интенсивностей пиков  $\alpha$ -Ti для различных этапов обработки поверхности сплавов ПТ-3В (а), ПТ-7М (б) и ВТ1-0 (в) ( $\square$  —  $I(100)/I(101)$ ,  $\blacksquare$  —  $I(002)/I(101)$ )

**Fig. 6.** The diagrams of relative intensities of  $\alpha$ -Ti peaks for different stages of surface treatment of PT-3V (a), PT-7M (b), and VT1-0 (c) alloys ( $\square$  —  $I(100)/I(101)$ ,  $\blacksquare$  —  $I(002)/I(101)$ )

стае образца кристаллических фаз ( $\alpha$  или  $\alpha'$ ) вносит одинаковый вклад в наблюдаемые дифракционные пики. При этом критерий повторяемости результатов рентгенодифракционных испытаний — постоянство отношения интегральных интенсивностей пары анализируемых максимумов.

Для пиков на дифрактограммах (см. рис. 5) рассчитывали интегральные интенсивности и полуширину на полувысоте. Расчет проводили методом суммирования интенсивностей каждой экспериментальной точки пика без учета постоянной составляющей фонового сигнала с использованием пакета Wolfram Mathematica.

На рис. 6 для исследуемых образцов приведены значения относительных интегральных интенсивностей  $I(100)/I(101)$  и  $I(002)/I(101)$ . Видно,

что относительные интенсивности меняются при изменении способа обработки. Это свидетельствует о существенном влиянии состояния поверхностного слоя на соотношение интенсивностей дифракционных пиков.

Зависимость «тонкой» структуры рентгеновских пиков и соотношения между интенсивностями различных максимумов от способа и качества подготовки поверхности снижает достоверность количественного анализа фазового состава титановых сплавов. Для верификации результатов необходимо использовать прямые методики исследования структуры (металлографию, растровую и просвечивающую электронную микроскопию).

### Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что зависимость результатов рентгенодифракционных испытаний от способа подготовки поверхности титановых  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -сплавов высока. Электрохимическая полировка и обработка кислотой приводят к видимому уменьшению ширины дифракционных максимумов и более явному проявлению их «тонкой» структуры, связанной со спектром используемого источника рентгеновского излучения ( $K\alpha_{1,2}$ -дублет). При этом электрохимическая полировка, выполненная после предварительной механической шлифовки, ведет к изменению относительных интенсивностей дифракционных пиков при различной продолжительности обработки. Корректное количественное определение содержания  $\alpha'$ - и  $\beta$ -фаз в исследуемых образцах сплавов ПТ-3В, ПТ-7М и В1-0 с использованием рентгеновских методов может быть выполнено только в случае применения независимых методик, позволяющих достоверно оценить присутствие частиц второй фазы. Качественный анализ, включающий подготовку анализируемой поверхности и рентгеновскую съемку до и после испытания, возможен, если подготовленная поверхность не нарушается.

### Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-73-00295).

### Благодарности

Авторы благодарят П. В. Тряева (АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород) за предоставление образцов и проведение работ по анализу химического состава титановых сплавов, А. В. Пискунова (ННГУ имени Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород) за рекомендации по выбору режимов электрополировки образцов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горынин И. В., Чечулин Б. Б. Титан в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1990. — 400 с.
2. Горынин И. В., Орыщенко А. С., Леонов В. П. и др. Морские титановые сплавы — настоящее и будущее / Вопросы материаловедения. 2014. № 2. С. 36 – 47.
3. Горынин И. В., Леонов В. П., Кудрявцев А. С. и др. Титановые сплавы в паротурбиностроении / Вопросы материаловедения. 2014. № 2. С. 48 – 62.
4. Орыщенко А. С., Леонов В. П., Ртищева Л. П. и др. Современное состояние производства и применение труб из титановых сплавов в атомной энергетике и судостроении / Титан. 2018. № 3(61). С. 21 – 32.
5. Chuvildeev V. N., Kopylov V. I., Nokhrin A. V., et al. Study of mechanical properties and corrosive resistance of ultrafine-grained  $\alpha$ -titanium alloy Ti-5Al-2V / Journal of Alloys and Compounds. 2017. Vol. 723. P. 354 – 367. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.06.220.
6. Chuvildeev V. N., Kopylov V. I., Nokhrin A. V., et al. Effect of severe plastic deformation realized by rotary swaging on the mechanical properties and corrosion resistance of near- $\alpha$ -titanium alloy Ti-2.5Al-2.6Zr / Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 785. P. 1233 – 1244. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.01.268.
7. Chuvildeev V. N., Kopylov V. I., Berendeev N. N., et al. Corrosion fatigue crack initiation in ultrafine-grained near- $\alpha$  titanium alloy PT7M prepared by Rotary Swaging / Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 790. P. 347 – 362. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.03.146.
8. Чечулин Б. Б. Титановые сплавы в машиностроении. — Л.: Машиностроение, 1977. — 248 с.
9. Аношкин Н. Ф. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. — М.: Металлургия, 1980. — 464 с.
10. Попилов Л. Я., Зайцева Л. П. Электрополирование и электроотравление металлографических шлифов. — М.: Металлургиздат, 1963. — 410 с.
11. Cunying Xu, Yixin Hua. Electrochemical Preparation of Titanium and its Alloy in Ionic Liquid. Chapter 18 / Ionic Liquids — Current State of the Art. — IntechOpen, 2015. P. 481 – 503. DOI: 10.5772/59141.
12. Anasane S., Bhattacharyya B. Electrochemical Micromachining of Titanium and Its Alloys / Non-Traditional Micromachining Processes. — Springer International Publishing, 2017. P. 337 – 365. DOI: 10.1007/978-3-319-52009-4\_9.
13. Donachie M. J. Titanium: a technical guide. — ASM International, 2000. — 381 p.
14. Malinov S., Sha W., Guo Z., et al. Synchrotron X-ray diffraction study of the phase transformations in titanium alloys / Materials Characterization. 2002. Vol. 48. P. 279 – 295. DOI: 10.1016/S1044-5803(02)00286-3.
15. Boonchuduang T., Bootchanont A., Klysubun W., et al. Formation of Alpha-Case Layer During Investment Casting of Pure Ti and Ti-6Al-4V Using Comparative XRD and EXAFS Investigation / Metallurgical and Materials Transactions A. 2020. Vol. 51. P. 586 – 596. DOI: 10.1007/s11661-019-05541-1.

## REFERENCES

1. Gorynin I. V., Chechulin B. B. Titanium in mechanical engineering. — Moscow: Mashinostroenie, 1990. — 400 p. [in Russian].
2. Oryshchenko A. S., Gorynin I. V., Leonov V. P., et al. Marine Titanium Alloys — Present and Future / Inorg. Mater. Appl. Res. 2015. Vol. 6. P. 571 – 579. DOI: 10.1134/S2075113315060106.
3. Leonov V. P., Gorynin I. V., Kudryavtsev A. S., et al. Titanium alloys in steam turbine construction / Inorg. Mater. Appl. Res. 2015. Vol. 6. P. 580 – 590. DOI: 10.1134/S2075113315060076.
4. Oryshchenko A. S., Leonov V. P., Rtishcheva L. P., et al. Current state of production and use of pipes made of titanium alloys in nuclear power engineering and shipbuilding / Titan. 2018. Vol. 3(61). P. 21 – 32 [in Russian].
5. Chuvildeev V. N., Kopylov V. I., Nokhrin A. V., et al. Study of mechanical properties and corrosive resistance of ultrafine-grained  $\alpha$ -titanium alloy Ti-5Al-2V / Journal of Alloys and Compounds. 2017. Vol. 723. P. 354 – 367. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.06.220.
6. Chuvildeev V. N., Kopylov V. I., Nokhrin A. V., et al. Effect of severe plastic deformation realized by rotary swaging on the mechanical properties and corrosion resistance of near- $\alpha$ -titanium alloy Ti-2.5Al-2.6Zr / Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 785. P. 1233 – 1244. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.01.268.
7. Chuvildeev V. N., Kopylov V. I., Berendeev N. N., et al. Corrosion fatigue crack initiation in ultrafine-grained near- $\alpha$  titanium alloy PT7M prepared by Rotary Swaging / Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 790. P. 347 – 362. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.03.146.
8. Chechulin B. B. Titanium alloys in mechanical engineering. — Leningrad: Mashinostroenie, 1977. — 248 p. [in Russian].
9. Anoshkin N. F. Titanium alloys. Metallography of titanium alloys. — Moscow: Metallurgiya, 1980. — 464 p. [in Russian].
10. Popilov L. Ya., Zaitseva L. P. Electropolishing and Etching of Metallographic Grindings. — Moscow: Metallurgizdat, 1963. — 410 p. [in Russian].
11. Cunying Xu, Yixin Hua. Electrochemical Preparation of Titanium and its Alloy in Ionic Liquid. Chapter 18 / Ionic Liquids — Current State of the Art. — IntechOpen, 2015. P. 481 – 503. DOI: 10.5772/59141.
12. Anasane S., Bhattacharyya B. Electrochemical Micromachining of Titanium and Its Alloys / Non-Traditional Micromachining Processes. — Springer International Publishing, 2017. P. 337 – 365. DOI: 10.1007/978-3-319-52009-4\_9.
13. Donachie M. J. Titanium: a technical guide. — ASM International, 2000. — 381 p.
14. Malinov S., Sha W., Guo Z., et al. Synchrotron X-ray diffraction study of the phase transformations in titanium alloys / Materials Characterization. 2002. Vol. 48. P. 279 – 295. DOI: 10.1016/S1044-5803(02)00286-3.
15. Boonchuduang T., Bootchanont A., Klysubun W., et al. Formation of Alpha-Case Layer During Investment Casting of Pure Ti and Ti-6Al-4V Using Comparative XRD and EXAFS Investigation / Metallurgical and Materials Transactions A. 2020. Vol. 51. P. 586 – 596. DOI: 10.1007/s11661-019-05541-1.