

УДК 669.295

Н.А. Ночовная<sup>1</sup>, П.В. Панин<sup>1</sup>

## ФОРМИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ VT5, VT20 И VT6 ПРИ ТЕРМОВОДОРОДНОЙ ОБРАБОТКЕ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-1-1

*Рассмотрен комплексный подход к преобразованию структуры и свойств полуфабрикатов из титановых сплавов путем совмещения термоводородной обработки с пластической деформацией. Показано, что в листовых полуфабрикатах толщиной 2 мм из сплавов марок VT5, VT20 и VT6, легированных 0,7% (по массе) водорода, с помощью термоводородной обработки и пластической деформации можно создать гетерофазную структуру, в которой  $\alpha$ -фаза присутствует в виде двух структурных составляющих: первичной  $\alpha^1$ -фазы, обогащенной алюминием до состава  $\alpha_2$ -фазы на основе интерметаллида  $Ti_3Al$ , и вторичной  $\alpha_{deg}$ -фазы, обедненной алюминием.*

**Ключевые слова:** титановые сплавы, термоводородная обработка, пластическая деформация, фазовый состав, структура.

*A complex approach to structure and properties transformation of titanium alloys has been in focus, the approach including thermo-hydrogen treatment and plastic deformation combination. It has been shown that thermo-hydrogen treatment together with plastic deformation allow to obtain a multiphase structure in 2 mm sheet semi-finished products of VT5 (Ti–5,8Al), VT20 (Ti–6,2Al–1,2V–1Mo–2Zr), and VT6 (Ti–5,7Al–4,3V) titanium alloys (wt.%). The obtained structure contain  $\alpha$ -phase in two structural constituents: primary  $\alpha^1$ -phase enriched by aluminum up to  $Ti_3Al$ -based  $\alpha_2$ -phase, and secondary  $\alpha_{deg}$ -phase depleted by aluminum.*

**Keywords:** titanium alloys, thermo-hydrogen treatment, plastic deformation, phase composition, structure.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

Для изготовления элементов листовых конструкций авиационного назначения необходимо применение титановых сплавов средней и высокой прочности [1–5]. Типичными представителями этих групп сплавов 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. Для сплава VT6 хотя и существует возможность изменять структуру и свойства при помощи различных видов термической обработки, но потенциальный уровень прочности при этом реализуется не в полной мере.

С точки зрения обработки давлением для получения листовых полуфабрикатов и конечных изделий из них актуальной проблемой является создание гетерофазных ультрадисперсных структур в титановых сплавах с целью осуществления сверхпластической формовки [8]. Можно выделить два основных условия проявления эффекта сверхпластичности – это наличие протяженных межфазных границ и микро- или

субмикроструктурный масштаб структурных составляющих. В работах [9–11] показано, что и то и другое можно получить с помощью дополнительного легирования титановых сплавов водородом в процессе термоводородной обработки. Так, исследования в этой области позволили существенно повысить прочностные свойства и ресурс фасонных отливок из литейных сплавов ВТ5Л, ВТ6Л и ВТ20Л, увеличить термическую стабильность жаропрочных сплавов типа ВТ9, повысить прочность термически неупрочняемых титановых сплавов ВТ5 и ВТ20, снизить температуры или усилия деформации при обработке давлением деформируемых конструкционных сплавов средней и высокой прочности (ВТ6, ВТ23 и др.) [12–24].

Однако в научно-технической литературе приводится ограниченное количество данных о влиянии водорода на формирование структуры в наводороженных титановых сплавах в процессе пластической деформации. В связи с этим в данной статье рассматривается комплексный подход к преобразованию структуры и свойств полуфабрикатов из промышленно освоенных титановых сплавов ВТ5, ВТ20 и ВТ6 путем совмещения термоводородной обработки с пластической деформацией.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.1. «Фундаментально-ориентированные исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [25].

### Материалы и методы

В работе исследовали влияние обратимого легирования водородом и термоводородной обработки, совмещенной с пластической деформацией, на структуру и свойства деформированных полуфабрикатов (плит и листов) из титановых сплавов ВТ5, ВТ20 и ВТ6, полученных по промышленным и опытным технологиям. Исходные слитки для проведения термомеханической обработки получали методом вакуумно-дуговой плавки по технологии, аналогичной описанной в работах [26, 27]. Химический состав исследованных полуфабрикатов сплавов ВТ5, ВТ20 и ВТ6 приведен в таблице.

Химический состав полуфабрикатов из титановых сплавов

Сплав	Класс сплава	Вид полуфабриката (толщина)	Содержание элементов, % (по массе)						Примечание
			Ti	Al	V	Mo	Zr	Fe	
ВТ5	$\alpha$	Лист (2 мм)	Основа	5,8	–	–	–	0,10	Содержание примесей в соответствии с ГОСТ 19807–91
ВТ20	Псевдо- $\alpha$	Лист (2 мм)	Основа	6,2	1,2	1,0	2,0	0,10	
ВТ6	$\alpha+\beta$	Плита (20 мм)	Основа	5,7	4,2	–	–	0,35	
		Лист (2 мм)	Основа	5,7	4,3	–	–	0,35	

Насыщение образцов водородом проводили термодиффузионным способом в лабораторной установке Сивертса до концентраций 0,2–1,0% (по массе), с шагом 0,2% (по массе) в интервале температур 650–900°C. Принцип действия установки Сивертса основан на термическом разложении порошка гидроксида титана. Газообразный молекулярный водород собирается в баллон до достижения в нем расчетного давления, определяемого исходя из требуемой конечной концентрации водорода в образцах с учетом их суммарной массы. Водород из баллона через систему трубопроводов и вакуумных клапанов поступает в вакуумированную реторту, в которой находятся образцы при заданной температуре. После поглощения заданного количества водорода (о чем свидетельствует изменение давления в системе) реторта с образцами извлекается из печи и охлаждается в потоке воздуха от вентилятора, что обеспечивает скорость охлаждения 1 К/с в интервале температур – от 800 до 400°C. Концентрацию вводимого водорода контролировали с помощью взвешивания образцов на аналитических весах, а остаточного водорода после вакуумного отжига – спектральным методом.

Обработку давлением в наводороженном состоянии осуществляли методом прокатки при температурах  $(\alpha+\beta)$ -области. Низкотемпературный вакуумный отжиг после деформации проводили в печи типа СВНЭ-1.3.1/16-ИЗ в течение 7 ч.

Фазовый состав и структуру образцов изучали методами оптической микроскопии (по ПИ 1.2.785–2009), электронной микроскопии и микродифракции, а также рентгеноструктурного анализа на стандартных металлографических шлифах.

### Результаты

На первом этапе исследований изучали структурно-фазовое состояние листовых полуфабрикатов из титановых сплавов ВТ5, ВТ20 и ВТ6, полученных по промышленным технологиям.

Проведенный металлографический анализ показал, что микроструктура листа толщиной 2 мм из псевдо- $\alpha$ -сплава ВТ20, полученного по промышленной технологии, представлена  $\alpha$ -матрицей с небольшим количеством  $\beta$ -фазы (рис. 1, а), а лист той же толщины из сплава  $\alpha$ -класса ВТ5 имеет рекристаллизованную  $\alpha$ -структуру (рис. 1, б). Лист толщиной 2 мм из  $(\alpha+\beta)$ -сплава ВТ6, также полученный по промышленной технологии, имеет деформированную, частично рекристаллизованную структуру (рис. 1, в).

На следующем этапе работы проводили исследования формирования фазового состава и структуры в листовых полуфабрикатах толщиной 2 мм из сплавов ВТ5, ВТ20 и ВТ6, полученных по опытной технологии, включающей наводороживающий отжиг, прокатку в наводороженном состоянии в верхнем температурном интервале  $(\alpha+\beta)$ -области с промежуточными отжигами и заключительный низкотемпературный вакуумный отжиг, обеспечивающий удаление водорода до безопасных остаточных концентраций – не более 0,005% (по массе).

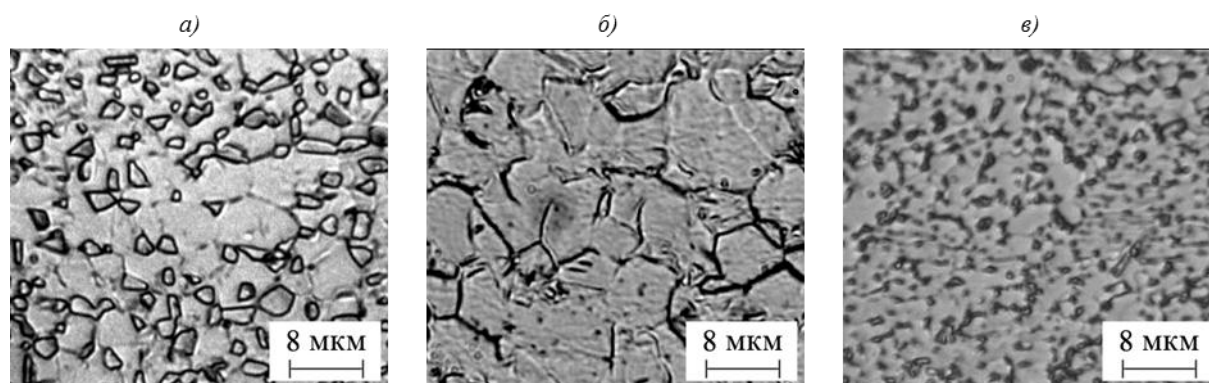


Рис. 1. Структура листов из сплавов ВТ20 (а), ВТ5 (б) и ВТ6 (в), полученных по промышленной технологии

Водород, как легирующий элемент, представляет собой мощный «инструмент», который позволяет управлять процессами структурообразования в титановых сплавах [12, 13]. Преимущество термоводородной обработки заключается в возможности введения водорода в сплав в твердофазном состоянии, т. е. без изменения номинального химического состава получать на промежуточных стадиях структурно-фазовые состояния, не свойственные сплавам в равновесных условиях, а также удалять водород из материала без расплавления, осуществляя тем самым «обратимое» легирование. При этом под обратимостью легирования понимается только возможность контролируемого введения/удаления водорода, в то время как фазовый состав и структура сплава изменяются необратимо.

Водород в титановых сплавах является сильным  $\beta$ -стабилизатором, поэтому он понижает температуру полиморфного превращения  $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$  ( $Ac_3$ ), уменьшает первую критическую скорость охлаждения и диффузионную подвижность основных легирующих элементов [12]. Это позволяет при одних и тех же условиях (температура нагрева, скорость охлаждения), изменяя только концентрацию водорода, получать в титановых сплавах целый спектр структур, который невозможно получить никакими другими технологическими способами.

Металлографический анализ плиты толщиной 20 мм из сплава ВТ6 в исходном состоянии (без дополнительного легирования водородом) показал, что плита характеризуется пластинчатой микроструктурой, достаточно хорошо проработанной на технологической стадии ее изготовления (рис. 2, *а*), в которой, однако, присутствуют отдельные микрообъемы с более ярко выраженной геометрической текстурой вдоль направления прокатки (рис. 2, *б*).

На следующем этапе работы исходную плиту из сплава ВТ6 толщиной 20 мм наводороживали при температуре 800°C до концентрации водорода 0,7% (по массе). Водород, как  $\beta$ -стабилизатор, расширяет область существования  $\beta$ -фазы, повышает ее стабильность и уменьшает критические скорости охлаждения. Кроме того, увеличение количества  $\beta$ -фазы способствует также уменьшению степени ее легирования как  $\beta$ -стабилизаторами, так и алюминием, вследствие сосредоточения его преимущественно в  $\alpha$ -фазе. Исследования показали, что после проведения наводороживающего отжига и охлаждения до комнатной температуры с максимально возможной (для используемой лабораторной установки Сиверта) скоростью 1 К/с в плите из сплава ВТ6 формируется структура, состоящая в основном из  $\beta$ -фазы и небольшого количества мартенситной фазы  $\alpha''$  (рис. 2, *в*, *г*).

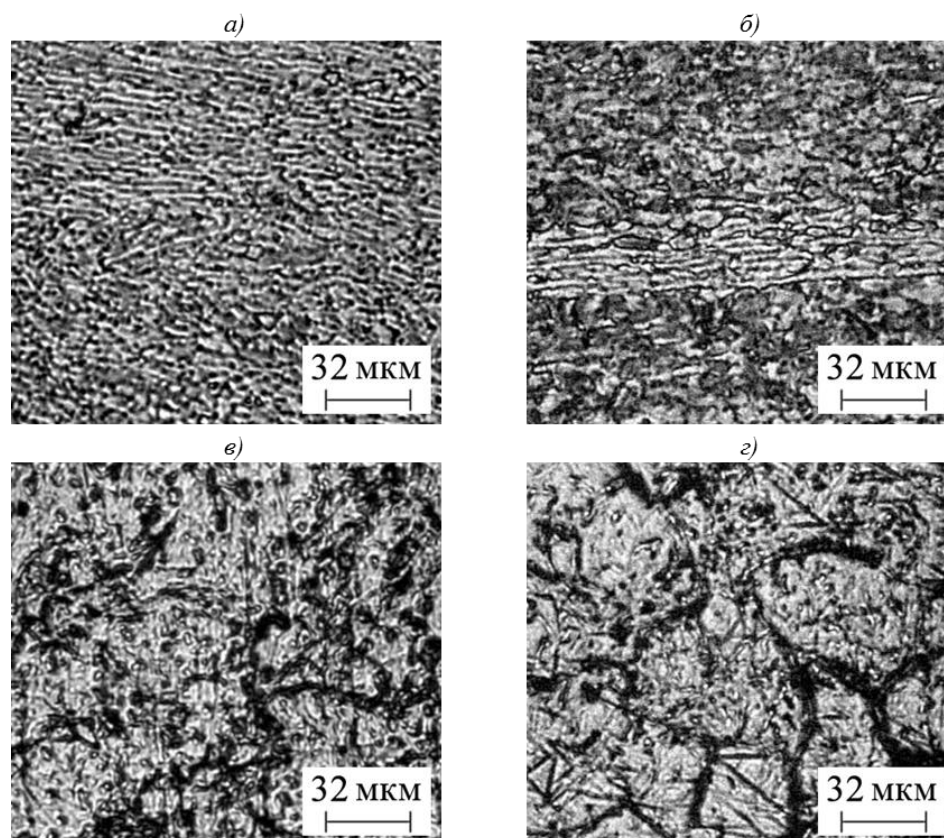


Рис. 2. Микроструктура плиты толщиной 20 мм из сплава ВТ6 в исходном состоянии (*а*, *б*) и после наводороживания до 0,7% (по массе) Н (*в*, *г*):

*а*, *в* – съемка с плоскости, перпендикулярной направлению прокатки; *б*, *г* – съемка с плоскости, параллельной направлению прокатки

После проведения наводороживающего отжига при  $800^{\circ}\text{C}$  плиту толщиной 20 мм прокатывали в наводороженном состоянии в температурном интервале  $(\alpha+\beta)$ -области (с промежуточными отжигами) до листа толщиной 2 мм с суммарной степенью обжатия 90%. В процессе деформации и охлаждения до комнатной температуры происходит выделение  $\alpha$ -фазы, обогащенной алюминием. Таким образом, после деформации структура сплава ВТ6 (рис. 3, а, б) представлена:

- мелкодисперсными частицами  $\alpha$ -фазы, обогащенной алюминием; в отдельных микрообъемах формируется  $\alpha_2$ -фаза на основе  $\text{Ti}_3\text{Al}$ ;
- деформированными зернами  $\beta$ -фазы, сильно обедненной алюминием и пересыщенной водородом;
- эвтектоидной смесью  $(\alpha+\delta)$ , так как в процессе охлаждения после деформации происходит уменьшение количества  $\beta$ -фазы, и вследствие ее пересыщения водородом она частично претерпевает эвтектоидный распад  $\beta \rightarrow \alpha+\delta(\text{TiH}_2)$ .

Последующий низкотемпературный вакуумный отжиг в течение 7 ч предварительно деформированных в  $(\alpha+\beta)$ -области листов из сплава ВТ6, дополнительно легированного водородом до концентрации 0,7% (по массе), приводит к формированию в полуфабрикате хорошо проработанной мелкодисперсной структуры (рис. 3, в, г).

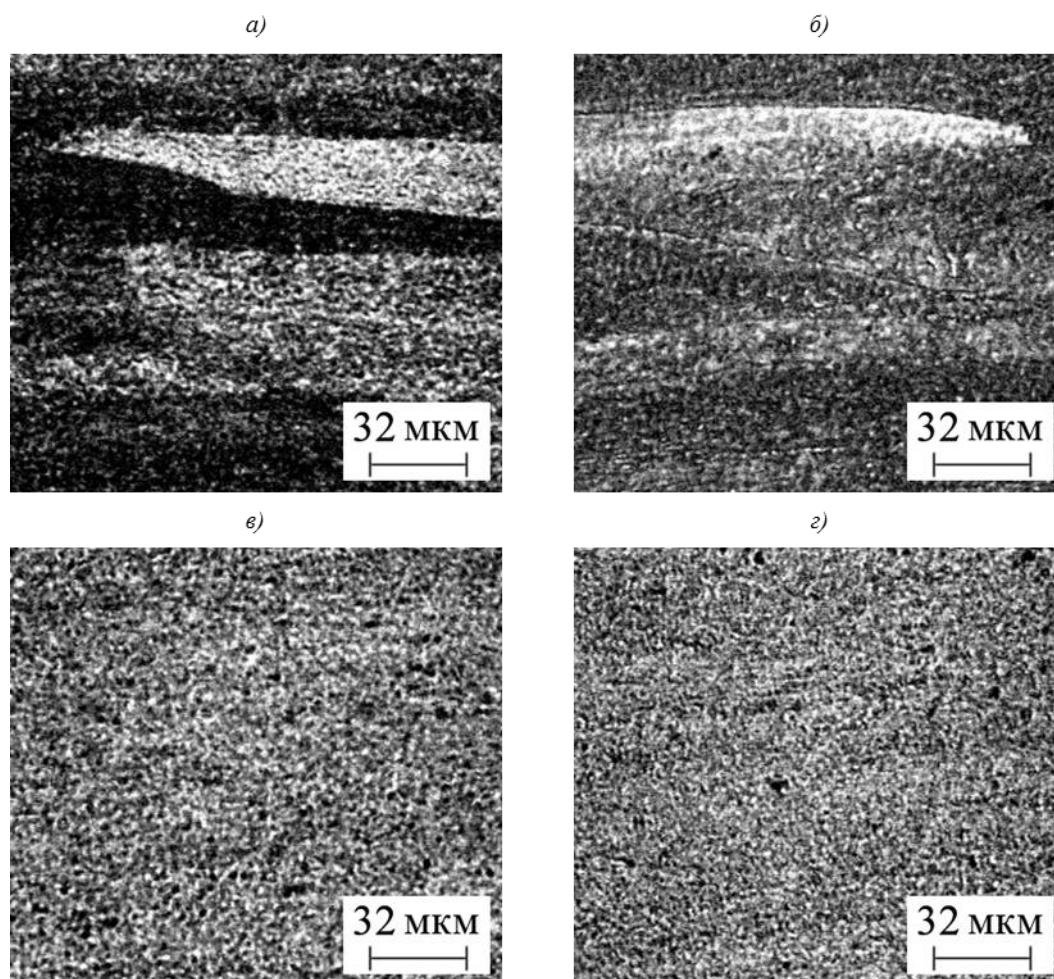


Рис. 3. Микроструктура листа толщиной 2 мм из сплава ВТ6 в наводороженном состоянии до концентрации 0,7% (по массе) (а, б) и после низкотемпературного вакуумного отжига (в, г):

а, в – съемка с плоскости, перпендикулярной направлению прокатки; б, г – съемка с плоскости, параллельной направлению прокатки

Водород, являясь  $\beta$ -стабилизатором, имеет высокую растворимость в  $\beta$ -фазе и практически не растворяется в  $\alpha$ -фазе. Под действием водорода происходит не только увеличение количества  $\beta$ -фазы, но и перераспределение основных легирующих элементов:  $\alpha$ -фаза обогащается алюминием, а  $\beta$ -фаза – ванадием. При пластической деформации в водородсодержащей  $\beta$ -фазе появляется большое количество новых дефектов кристаллического строения, в основном линейного характера (дислокации), которые при дегазации являются предпочтительными центрами зарождения частиц  $\alpha$ -фазы. Вследствие низкой диффузионной подвижности атомов основных легирующих элементов при вакуумном отжиге процессы зарождения частиц преобладают над процессами их роста, так как зарождение всегда происходит по сдвиговому механизму и не зависит от диффузионных процессов [28].

Низкотемпературный вакуумный отжиг приводит к выделению в  $\beta$ -фазе, которая обеднена алюминием, также обедненной алюминием  $\alpha_{\text{дег}}$ -фазы, поэтому при рентгеноструктурном анализе на дифрактограммах отчетливо видны дифракционные максимумы, полученные от двух  $\alpha$ -фаз – обогащенной и обедненной алюминием. Кроме того, после вакуумного отжига на дифрактограммах остаются и сверхструктурные рефлексы (10.1) и (11.0), свидетельствующие о присутствии  $\alpha_2$ -фазы (рис. 4, а).

Аналогичные результаты получены и для сплавов ВТ5 и ВТ20. Показано, что увеличение в сплавах ВТ5 и ВТ20 количества водорода с 0,3 до 0,7% (по массе) приводит к формированию гетерофазной структуры и уменьшению размера структурных составляющих  $\alpha$ -фазы после деформации и вакуумного отжига – с 1–2 мкм до 300–500 нм. С помощью рентгеноструктурного анализа показано, что в образцах толщиной 2 мм из листовых полуфабрикатов  $\alpha$ -сплава ВТ5 и псевдо- $\alpha$ -сплава ВТ20 совмещение термодородной обработки с пластической деформацией позволяет после вакуумного отжига создать двухфазную структуру, состоящую из первичной  $\alpha^1$ -фазы, обогащенной алюминием, и  $\alpha_{\text{дег}}$ -фазы, обедненной алюминием, так как она образуется из  $\beta$ -фазы в процессе дегазации, а низкие температуры вакуумного отжига замедляют процессы выравнивающей диффузии между двумя  $\alpha$ -фазами с различным содержанием алюминия (рис. 4, б, в).

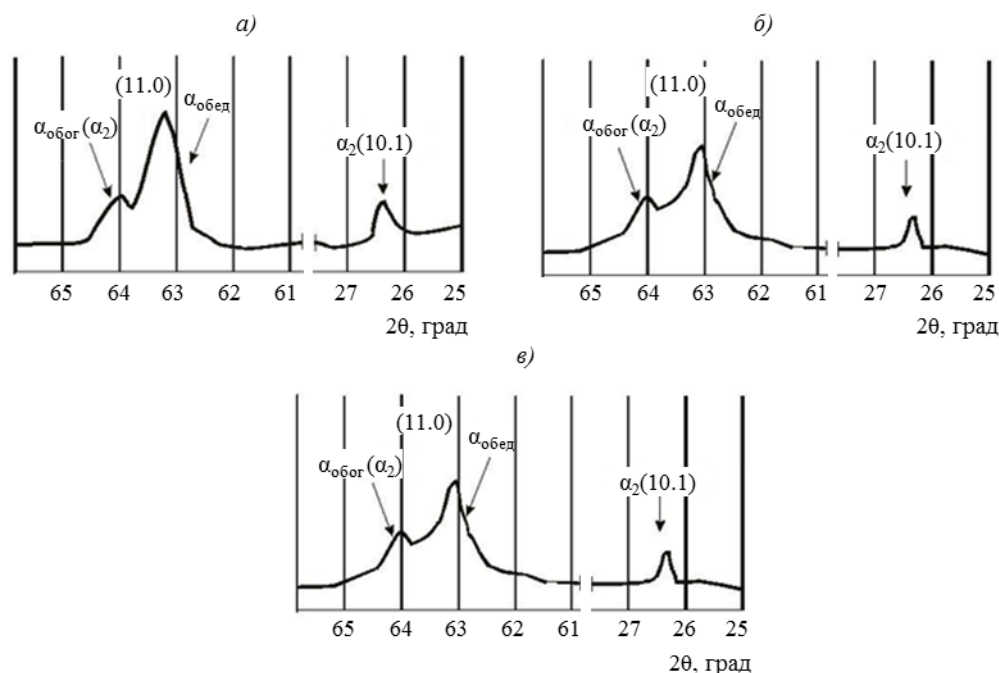


Рис. 4. Участки дифрактограмм листовых образцов толщиной 2 мм из сплавов ВТ5 (а), ВТ20 (б) и ВТ6 (в) после наводороживающего отжига, пластической деформации и вакуумного отжига

Проведенные электронно-микроскопические исследования образцов после вакуумного отжига показали, что сочетание термоводородной обработки с пластической деформацией позволило создать в листах субмикроструктурную гетерофазную структуру с размером частиц  $\alpha$ -фазы 300–500 нм [9, 11]. Исследования, проведенные методом темного поля и электронной микродифракции, подтвердили наличие в структуре отдельных (некогерентных) частиц  $\alpha_2$ -фазы.

### Обсуждение и заключения

Проведенные исследования показали, что обратимое легирование водородом до концентрации 0,7% (по массе) в сочетании с пластической деформацией в наводороженном состоянии позволяет создавать в листовых полуфабрикатах толщиной 2 мм субмикроструктурную гетерофазную структуру, в которой  $\alpha$ -фаза присутствует в виде двух структурных составляющих: первичной  $\alpha^1$ -фазы, обогащенной алюминием до состава  $\alpha_2$ -фазы на основе интерметаллида  $Ti_3Al$ , и вторичной  $\alpha_{дег}$ -фазы, обедненной алюминием. Размер структурных составляющих  $\alpha$ -фазы составляет при этом 300–500 нм. Важно отметить, что в зависимости от класса сплава формируются следующие структурно-фазовые состояния: в сплаве VT5 – двухфазная ( $\alpha+\alpha_2$ )-структура, в сплавах VT20 и VT6 – многофазная ( $\alpha+\alpha_2+\beta$ )-структура. Наличие упорядоченной  $\alpha_2$ -фазы подтверждается данными электронной микродифракции, а также появлением на рентгеновских дифрактограммах сверхструктурных рефлексов (10.1) и (11.0). Структура, содержащая  $\alpha_2$ -фазу на основе интерметаллидного соединения  $Ti_3Al$ , является метастабильной и не свойственна сплавам VT5, VT20 и VT6 в равновесных условиях. В связи с этим при последующем нагреве до температур обработки и/или эксплуатации возможно протекание диффузионных процессов, приводящих к преобразованию сформированной метастабильной структуры в равновесную. Для определения технологических (в первую очередь, температурно-временных) параметров дальнейшей обработки полуфабрикатов из сплавов VT5, VT20 и VT6, подвергнутых термоводородной обработке, необходимо исследовать температурные пределы стабильности гетерофазных структур, содержащих  $\alpha_2$ -фазу. Исследование термической стабильности ( $\alpha+\alpha_2+\beta$ )-структуры в сплаве VT6 проведено авторами и описано в работе [23].

### Благодарности

Авторы выражают благодарность одному из основоположников водородной технологии титановых сплавов в России академику РАН А.А. Ильину и сотрудникам его научной школы – д. т. н., профессору С.В. Скворцовой и д. т. н., профессору А.М. Мамонову – за помощь в получении и интерпретации экспериментальных результатов, обсуждение и критические замечания.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
2. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С. 7–27.
3. 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.
4. Балабуев П.В. Титановые сплавы в изделиях АНТК им. О.К. Антонова // Титан. 1998. №1 (10). С. 15–19.
5. Братухин А.Г., Колачев Б.А., Садков В.В. и др. Технология производства титановых самолетных конструкций. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.

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., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. 520 с.
8. Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов. М.: Наука, 2002. 438 с.
9. Панин П.В., Манохин С.С., Дзунович Д.А. Получение и исследование субмикроструктурной структуры в титановых сплавах при обратимом легировании водородом и пластической деформации // *Вопросы материаловедения*. 2016. №4 (88). С. 7–17.
10. Ильин А.А., Скворцова С.В., Панин П.В., Шалин А.В. Влияние термоводородной обработки и пластической деформации на структурообразование в титановых сплавах разных классов // *Авиационная промышленность*. 2009. №4. С. 31–36.
11. Панин П.В. Закономерности формирования фазового состава и структуры в титановых сплавах при термоводородной обработке и пластической деформации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МАТИ, 2009. 24 с.
12. Ильин А.А., Колачев Б.А., Носов В.К., Мамонов А.М. Водородная технология титановых сплавов. М.: МИСиС, 2002. 392 с.
13. Колачев Б.А., Ильин А.А., Носов В.К., Мамонов А.М. Достижения водородной технологии титановых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2007. №3. С. 10–26.
14. Овчинников А.В., Носов В.К., Афонин В.Е., Панин П.В. Основные закономерности деформации сплавов титан-водород // *Технология легких сплавов*. 2007. №3. С. 96–99.
15. Ильин А.А., Скворцова С.В., Мамонов А.М., Коллеров М.Ю. Фазовые и структурные превращения в титановых сплавах разных классов под действием водорода // *Титан*. 2007. №1 (20). С. 32–37.
16. Скворцова С.В., Попова Ю.А., Панин П.В., Грушин И.А., Курьшев Е.А. Влияние термической обработки на структуру и свойства сварных соединений из титанового сплава ВТ23 // *Титан*. 2011. №2 (32). С. 16–21.
17. Скворцова С.В., Панин П.В., Ночовная Н.А., Грушин И.А., Митропольская Н.Г. Влияние водорода на фазовые и структурные превращения в титановом сплаве ВТ6 // *Технология легких сплавов*. 2011. №4. С. 35–40.
18. Панин П.В., Дзунович Д.А., Засыпкин В.В. Создание двухфазной композитной структуры в альфа-сплаве Ti–6Al с помощью термоводородной обработки // *Научные труды (Вестник МАТИ)*. 2012. №19 (91). С. 33–37.
19. Панин П.В., Грушин И.А., Митропольская Н.Г. Исследование закономерностей изменения структурно-фазового состояния титанового сплава ВТ6 при дополнительном легировании водородом // *Научные труды (Вестник МАТИ)*. 2013. №20 (92). С. 31–34.
20. Панин П.В., Ширяев А.А., Дзунович Д.А. Построение температурно-концентрационной диаграммы фазового состава титанового сплава ВТ6, дополнительно легированного водородом // *Технология машиностроения*. 2014. №3 (141). С. 5–9.
21. Панин П.В., Дзунович Д.А., Алексеев Е.Б. Способы описания фазового состава титановых сплавов, дополнительно легированных водородом (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №3. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.08.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-3-3.
22. Панин П.В., Дзунович Д.А., Алексеев Е.Б. Фазовый состав и структура титанового сплава ВТ6, дополнительно легированного водородом, после вакуумного отжига // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №2 (38). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.08.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-5-5.
23. Панин П.В., Дзунович Д.А., Ширяев А.А. Исследование термической стабильности структуры титанового сплава ВТ6 после термоводородной обработки // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №3 (39). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.08.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-6-6.

- 
24. Дзунович Д.А., Шалин А.В., Панин П.В. Структура, текстура и механические свойства деформированных полуфабрикатов из сплава ВТ6, полученных по промышленным и опытным технологиям // Деформация и разрушение материалов. 2017. №6. С. 19–27.
  25. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
  26. Ночовная Н.А., Панин П.В., Кочетков А.С. Проблемы получения химически и структурно однородных слитков из жаропрочных сплавов на основе гамма-алюминидов титана // Материалы конф. «Проблемы производства слитков и полуфабрикатов из сложнолегированных и интерметаллидных титановых сплавов» (30 окт. 2015 г.). М.: ВИАМ, 2015. Ст. 03. 1 электр. оптич. диск (CD).
  27. Каблов Д.Е., Панин П.В., Ширяев А.А., Ночовная Н.А. Опыт использования вакуумно-дуговой печи ALD VAR L200 для выплавки слитков жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана // Авиационные материалы и технологии. 2014. №2 (31). С. 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
  28. Ильин А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. М.: Наука, 1994. 304 с.