

УДК 669.295:661.882

***А. С. Ушакова, Н. А. Худякова, Н. А. Баранникова, Ф. В. Водолазский, А. Г. Илларионов\****

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

\* *illarionovag@mail.ru*

## СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА $\alpha$ -СПЛАВА ТИТАНА ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ

Исследованы микроструктура, фазовый состав, твердость и модуль упругости в горячедеформированном сплаве ПТ-7М при закалке с температур нагрева вблизи  $T_{пп}$ .

*Ключевые слова:* титановый сплав ПТ7-М, горячая деформация, микроструктура, фазовый состав, микротвердость, модуль упругости.

***A. S. Ushakova, N. A. Khudyakova, N. A. Barannikova, F. V. Vodolazsky, A. G. Illarionov***

## STRUCTURE, PHASE COMPOSITION AND PROPERTIES $\alpha$ -TITANIUM ALLOY AFTER QUENCHING

The study of the microstructure, phase composition, hardness and modulus of elasticity in the hot-deformed PT-7M alloy during quenching with heating temperatures near polymorphic transformation temperature.

*Keywords:* titanium alloy PT7-M, hot deformation, microstructure, phase composition, microhardness, modulus of elasticity.

Сплав ПТ-7М относится к  $\alpha$ -сплавам титана, обладает высокой коррозионной стойкостью в морской, пресной воде и широко используется для производства труб, работающих при комнатной и повышенных температурах [1]. При нагреве деформированных полуфабрикатов вблизи температуры полиморфного ( $\alpha+\beta$ ) $\rightarrow\beta$ -превращения ( $T_{пп}$ ) сплава возможно протекание фазовых и структурных превращений, которые существенным образом влияют на формирование физико-механических свойств сплава.

В связи с этим целью данной работы является анализ изменения фазового состава, структуры и свойств при закалке сплава ПТ-7М с температур вблизи  $T_{пп}$ .

В качестве материала для исследования использовали промышленный горячедеформированный полуфабрикат из сплава ПТ-7М (Ti-2,2Al-2,7Zr (масс. %)). Исследование микроструктуры проводилось на

микроскопе «OLYMPUS GX51». Рентгеноструктурный фазовый анализ осуществляли на дифрактометре «Bruker D8 Advance» в медном  $K_{\alpha}$ -излучении с помощью позиционно-чувствительного детектора LynxEye. Микротвердость по Виккерсу и контактный модуль упругости определяли микроиндентированием на приборе CSM Instruments при нагрузке 9 Н.

В результате микроструктурного анализа сплава ПТ-7М выявлено, что в исследованном температурном интервале закалок 910...960 °С  $\alpha$ -фаза фиксируется до температуры закалки 940 °С (рис. 1, б). При закалке с 910 °С (рис. 1, а) в структуре фиксируется появление  $\beta$ -фазы в виде светлой зернограничной оторочки, что свидетельствует о нагреве в двухфазную ( $\alpha+\beta$ )-область. Так как при 910 °С количество  $\beta$  – фазы не превышает 1–3 %, то температура  $\alpha\rightarrow(\alpha+\beta)$ -превращения лежит чуть ниже данной температуры закалки. При более высоких температурах нагрева находят развитие процессы растворения  $\alpha$ -фазы вплоть до полного ее исчезновения (выше  $T_{\text{пп}}$ ), роста  $\beta$ -зерна (выше 940 °С) и увеличения в структуре объемной доли  $\beta$ -фазы, испытывающей при закалке мартенситное  $\beta\rightarrow\alpha'$ -превращение в диапазоне температур закалки 950...960 °С в структуре выявлен лишь пластинчатый  $\alpha'$ -мартенсит в исходном  $\beta$ -зерне (рис. 1, в). Исходя из этого  $T_{\text{пп}}$  находится в диапазоне 940...950 °С и по методике, описанной в работе [2] за  $T_{\text{пп}}$  принимаем среднюю температуру в этом интервале – 945 °С.

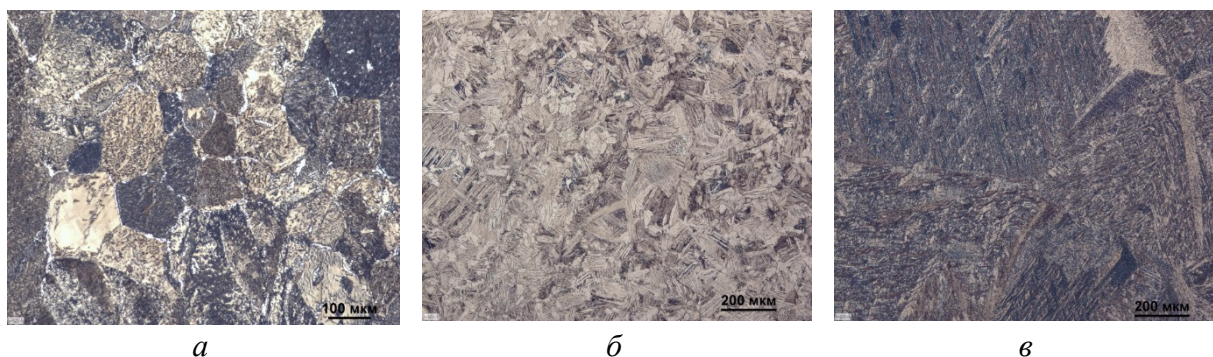


Рис. 1. Структура сплава ПТ-7М, закаленного с температур:  
*a* – 910 °С; *б* – 940 °С; *в* – 960 °С

Анализируя дифрактограммы образцов после закалки с различных температур из сплава ПТ-7М (рис. 2) можно отметить, что на них присутствуют линии фазы с ГПУ-решеткой, которую в равной степени можно отнести как к  $\alpha$ -, так и к  $\alpha'$ -мартенситу. При сопоставлении этих дифрактограмм выявлено, что с увеличением в структуре  $\alpha'$ -мартенсита изменяется соотношение интенсивности линий фаз, связанное с отличием кристаллографической ориентации  $\alpha'$ -мартенсита по отношению к  $\alpha$ -фазе (рис. 2).

Полученные значения параметра «с/а»  $\alpha(\alpha')$ -фаз составляют около 1,591, и это выше, чем у чистого титана (1,587), что характерно для сплавов, легированных алюминием [2]. Отсутствие активного изменения параметра «с/а» с температурой закалки, очевидно связано с тем, что в сплав не легирован  $\beta$ -стабилизаторами, которые как известно [3] могут существенно влиять на этот параметр, присутствуя в фазах ( $\alpha$  ( $\alpha'$ )).

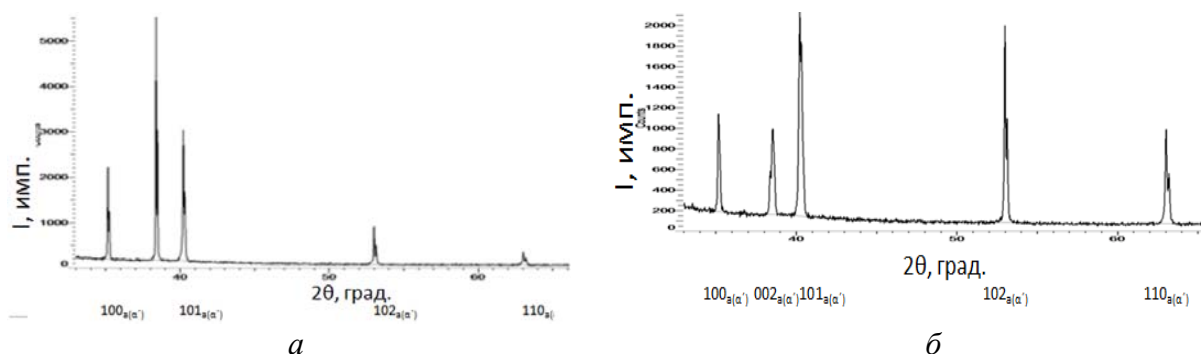


Рис. 2. Дифрактограммы образцов из сплава ПТ-7М после закалки с температур:  $a - 940\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $b - 960\text{ }^{\circ}\text{C}$

Для оценки изменения объемной доли  $\alpha'$ -мартенсита в структуре с увеличением температуры закалки был проведен анализ уширения линий на дифрактограммах, которое обычно увеличивается в присутствии  $\alpha'$ -мартенсита. С этой целью было измерено уширение линии 110 (рис. 3), так как она встречается на всех дифрактограммах в исследованном диапазоне температур, при сопоставимых интенсивностях.

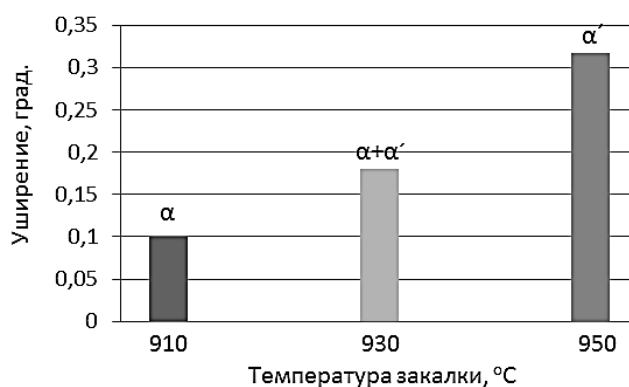


Рис. 3. Изменение уширения линии 110  $\alpha$  ( $\alpha'$ ) от температуры закалки

Из рис. 3 видно, что с повышением температуры закалки с 910 до 950  $^{\circ}\text{C}$  наблюдается рост уширения линии 110, что связано с увеличением в структуре объемной доли  $\alpha'$ -фазы вплоть до  $T_{\text{пп}}$  и согласуется с данными микроструктурных исследований (рис. 1).

Анализ изменения твердости с температурой закалки (рис. 4) в сопоставлении с структурой показал, что после закалки с 910 и 920  $^{\circ}\text{C}$

твердость в основном определяется твердостью преобладающей в структуре  $\alpha$ -фазы, а снижение твердости после выдержки при 920 °С связано с более активным разупрочнением деформированного металла при повышении температуры нагрева.

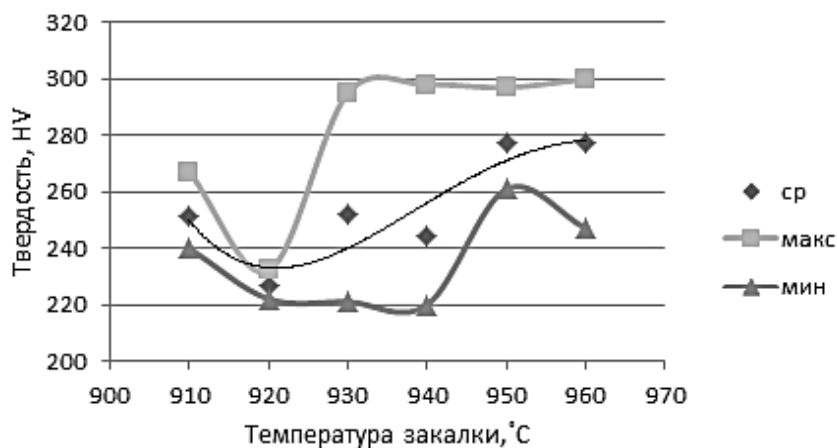


Рис. 4. Зависимость изменения микротвердости сплава ПТ-7М от температуры закалки

Начиная с температуры 930 °С вплоть до 950 °С, средние значения твердости имеют тенденцию к повышению за счет увеличения в структуре (рис. 1) объемной доли  $\alpha'$ -мартенсита более твердого, чем  $\alpha$ -фаза. При этом максимальные значения микротвердости, характерные для  $\alpha'$ -мартенсита во всем диапазоне температур измерения, имеют близкие значения на уровне около 300 НВ. Что касается микротвердости  $\alpha$ -фазы, то ее минимальные значения фиксируется на уровне около 220 НВ в диапазоне температур 920...940 °С. В диапазоне температур закалки выше  $T_{\text{ни}}$  (950...960 °С) средние значения твердости выходят на постоянный уровень, а минимальные значения несколько ниже при закалке с 960 °С из-за укрупнения структуры фиксируемого  $\alpha'$ -мартенсита (рис. 1).

На рис. 5 приведены данные по изменению среднего значения модуля упругости закаленных образцов.

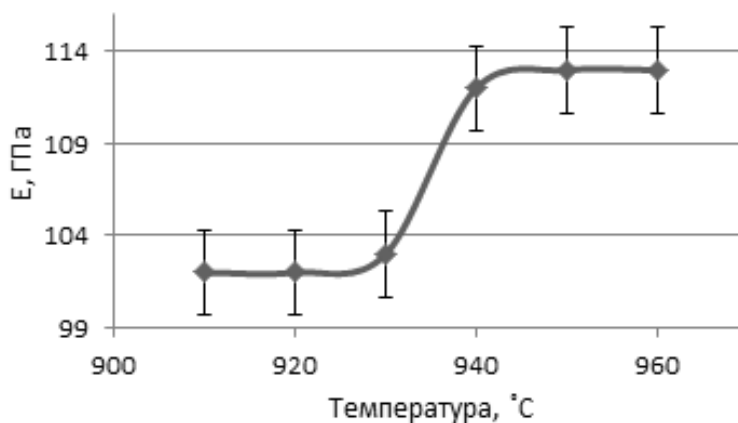


Рис. 5. Зависимость изменения среднего модуля упругости от температуры закалки

При температурах закалки 910, 920 °С модуль упругости примерно постоянный, что связано с преобладанием в структуре  $\alpha$ -фазы близкой кристаллографической ориентации. В интервале температур 930...950 °С происходит повышение характеристик модуля упругости за счет увеличения в структуре объемной доли  $\alpha'$ -мартенсита, имеющего ту же что и  $\alpha$ -фаза ГПУ-решетку [4], но другую кристаллографическую ориентацию (рис. 2). При получении в структуре 100 %  $\alpha'$ -мартенсита при закалке с 950 °С и выше модуль упругости выходит на постоянный уровень.

Таким образом, анализ изменения микротвердости и модуля упругости в закаленных образцах из сплава ПТ-7М показывает хорошую корреляцию с изменением фазового состава и преимущественной кристаллографической ориентацией фаз.

На основании проделанной работы сделаны следующие выводы:

1. При структурном анализе исходного деформированного полуфабриката установлено, что  $\alpha \rightarrow (\alpha + \beta)$ -превращение реализуется при температуре нагрева 910 °С за счет образования  $\beta$ -фазы в виде оторочки, окаймляющей  $\alpha$ -зерна, а при более высоких температурах нагрева находят развитие процессы растворения  $\alpha$ -фазы вплоть до полного ее исчезновения (выше  $T_{\text{ин}}$ ), роста  $\beta$ -зерна (выше 940 °С) и увеличения в структуре объемной доли  $\beta$ -фазы, испытывающей при закалке  $\beta \rightarrow \alpha'$ -превращение.

2. Рентгенографически качественное изменение при закалке доли в структуре  $\alpha'$ -мартенсита оценено по уширению и соотношению интенсивностей  $\alpha(\alpha')$ -линий.

3. Для образцов из сплава ПТ-7М, закаленных с температур в интервале 910...960 °С, показана хорошая корреляция между уровнем микротвердости, модуля упругости и изменением структуры, а также объемной доли в совокупности с преимущественной кристаллографической ориентацией фиксируемых при закалке фаз ( $\alpha$ ,  $\alpha'$ ).

*Авторы выражают признательность ОАО «РосНИТИ» за предоставление материала для исследований.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник / А. А. Ильин, Б. А. Колачёв, И. С. Полькин. Москва : ВИЛС-МАТИ, 2009. 520 с.
2. Полуфабрикаты из титановых сплавов / В. К. Александров [и др.]. Москва : Металлургия, 1979. 512 с.
3. Цвиккер У. Титан и его сплавы / У. Цвиккер. Москва : Металлургия, 1979. 512 с.
4. Колачев Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов. Москва : МИСИС, 1999. 416 с.