

УДК 669.295:661.882

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

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

**illarionovag@mail.ru*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛИМОРФНОГО ($\alpha+\beta$) $\rightarrow\beta$ -ПРЕВРАЩЕНИЯ В α -СПЛАВЕ ТИТАНА РАСЧЕТНЫМИ МЕТОДАМИ

Проведена оценка возможности определения $T_{\text{пп}}$ в α -сплаве титана ПТ-7М расчетными методами, включая программный продукт ThermoCalc, с точностью, сопоставимой с методом пробных закалок.

Ключевые слова: титановый сплав ПТ-7М, температура полиморфного превращения, метод пробных закалок, ThermoCalc.

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

DETERMINATION OF TEMPERATURE OF POLYMORPHOUS ($\alpha+\beta$) $\rightarrow\beta$ -TRANSFORMATION OF α -TITAN ALLOY BY CALCULATED METHODS

The possibility of determining the β -transus in the α - titanium alloy PT-7M by calculation methods, including the software product ThermoCalc with an accuracy comparable to the test hardening method, was estimated.

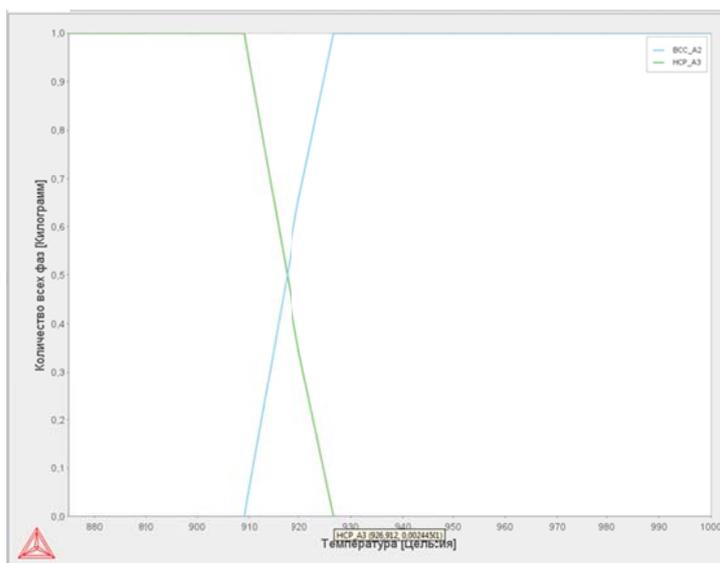
Keywords: PT-7M titanium alloy, temperature of poly-morphological transformation, test hardening method, ThermoCalc.

ПТ-7М – это малолегированный, высокопластичный α -титановый деформируемый сплав системы Ti–Al–Zr [1]. Из сплава ПТ-7М в основном производится трубная продукция в форме горячепрессованных, горячекатаных и холоднодеформированных труб. Температурные параметры проведения горячей деформации при получении труб связаны с конкретной температурой полиморфного ($\alpha+\beta$) $\rightarrow\beta$ -превращения ($T_{\text{пп}}$) сплава, которая в производственных условиях определяется достаточно трудоемким методом пробных закалок [2], но может так же быть рассчитана [3–6], но не всегда с необходимой точностью.

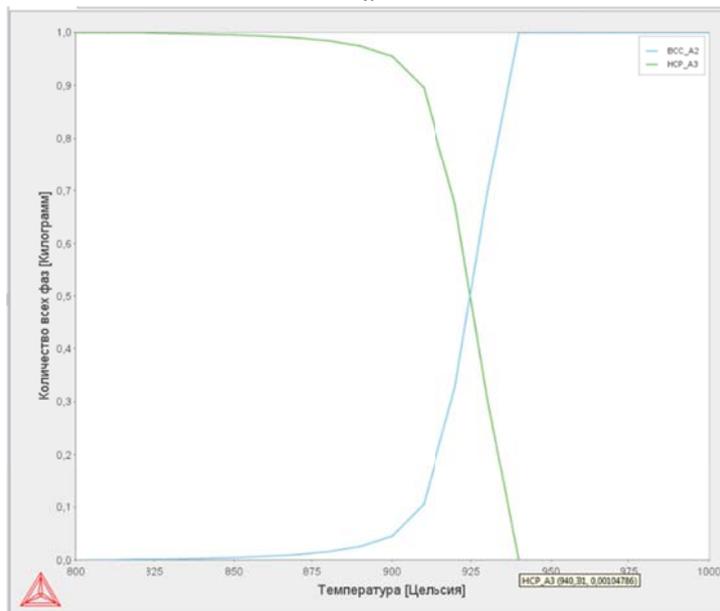
Целью данной работы является оценка возможности определения $T_{\text{пп}}$ сплава расчетными методами, включая программный продукт ThermoCalc с точностью, сопоставимой с методом пробных закалок.

Материалом для исследования служила горячедеформированная заготовка из сплава ПТ-7М (Ti-2,2Al-2,7Zr (масс. %)), полученная промышленным способом, у которой $T_{\text{пн}}$, определенная методом пробных закалок составила 945 °С.

На рис. *а* приведена зависимость изменения количества фаз в сплаве ПТ-7М (с учетом содержания только легирующих элементов – алюминия и циркония) от температуры, полученная в программе ThermoCalc.



а



б

Рис. Изменение объемной доли фаз в сплаве ПТ-7М от температуры нагрева по данным программы ThermoCalc: *а* – учтены только легирующие элементы; *б* – учтены легирующие элементы и примеси

Из рис. *а* видно, что образование β -фазы по данным расчета начинается при температуре 909 °С и по мере увеличения температуры

количество α -фазы уменьшается пропорционально увеличению количества β -фазы. Переход в β -область в соответствии с расчетом происходит при температуре 927 °С, которая характеризует в данном случае значение $T_{\text{пп}}$ сплава. Полученное значение $T_{\text{пп}}$ является существенно заниженным, по сравнению, полученным методом пробных закалок (945 °С). По-видимому, для получения более точных результатов необходим расчет по полному химическому составу сплава (см. ниже).

На рис. б приведена зависимость изменения количества фаз от температуры уже с учетом полного химического состава анализируемого сплава ПТ-7М как по легирующим элементам, так и примесям. Анализ полученной на рис. б зависимости показал, что развитие $\alpha \rightarrow (\alpha + \beta)$ -превращения по этим расчетам начинается при температуре 840 °С, то есть раньше, чем в первом случае, а завершается $(\alpha + \beta) \rightarrow \beta$ -превращение при более высокой температуре около 940 °С, которую можно принять за расчетную $T_{\text{пп}}$ в данном случае. Исходя из этого следует, что для получения расчетных значений $T_{\text{пп}}$ в сплаве ПТ-7М с использованием программы ThermoCalc сопоставимых с экспериментальными данными, полученными методом пробных закалок необходимо при расчете указывать состав сплава с учетом содержания как легирующих элементов, так и примесей.

Результаты определения значения $T_{\text{пп}}$ сплава по имеющимся в литературе [3, 4, 5, 6] расчетным формулам, исходя из химического состава представлены ниже:

$$A_{\text{сз}} = T_{\text{пп}} = 890 + 22 \cdot C_{\text{Al}} + 0 \cdot C_{\text{Zr}} - 17 \cdot C_{\text{Fe}} = \\ = 890 + 22 \cdot 2,2 + 0 \cdot 2,7 - 17 \cdot 0,04 = 938 \text{ } ^\circ\text{C}. [3]$$

$$T_{\text{пп}} = 885 + 14 \cdot (0 - 2 \%) C_{\text{Al}} + 23 \cdot (C_{\text{Al}} - 2 \%) + 0 \cdot C_{\text{Zr}} - 16,5 \cdot C_{\text{Fe}} + \\ + 200 \cdot C_{\text{O}} - 550 \cdot C_{\text{H}} + 550 \cdot C_{\text{N}} + 0,15 \cdot C_{\text{C}} = 885 + 14 \cdot 2,2 + 23 \cdot (2,2 - 2) + 0 \cdot 2,7 - \\ - 16,5 \cdot 0,04 + 200 \cdot 0,08 - 550 \cdot 0,001 + 550 \cdot 0,01 + 0,15 \cdot 0,02 = 939 \text{ } ^\circ\text{C}. [4]$$

$$T_{\text{пп}} = 882 + 21,1 C_{\text{Al}} - 6,9 \cdot C_{\text{Zr}} + 23,3 \cdot C_{\text{Si}} - 15,4 \cdot C_{\text{Fe}} + 123 \cdot C_{\text{O}} = \\ = 882 + 21,1 \cdot 2,2 - 6,9 \cdot 2,7 + 23,3 \cdot 0,03 - 15,4 \cdot 0,04 + 123 \cdot 0,08 = 920 \text{ } ^\circ\text{C}. [5]$$

$$T_{\text{пп}} = 872 + 23,4 \cdot C_{\text{Al}} - 4,3 \cdot C_{\text{Zr}} + 32,1 \cdot C_{\text{Si}} - 8,4 \cdot C_{\text{Fe}} = \\ = 872 + 23,4 \cdot 2,2 - 4,3 \cdot 2,7 + 32,1 \cdot 0,03 - 8,4 \cdot 0,04 = 912,5 \text{ } ^\circ\text{C}. [6]$$

Наиболее близким по значению с $T_{\text{пп}}$, полученной методом пробных закалок (945 °С), являются результаты, полученные по расчетным формулам, предложенным в работах [3, 4], так как эти формулы с одной стороны были специально адаптированы к α -титановым сплавам [3], а с другой максимально учитывают химический состав сплава [4], за исключением циркония, для которого условно коэффициент, характеризующий изменение температуры $(\alpha + \beta) \rightarrow \beta$ -перехода при введении в сплав 1 % (масс.) циркония, был принят равным нулю, так как этот элемент является нейтральным упрочнителем [1] и не оказывает существенного влияния на $T_{\text{пп}}$ сплава.

Формулы, представленные в работах [5, 6] были предложены для сплавов других классов и они не дают при расчете применительно к сплаву ПТ-7М значений $T_{\text{пп}}$, сопоставимых с методом пробных закалок.

Таким образом в ходе проделанной работы произведен расчет $T_{\text{пп}}$ сплава ПТ-7М различными методами. Показано, что близкое к МПЗ значение $T_{\text{пп}}$ фиксируется при использовании для расчета полного химического состава сплава в программном комплексе ThermoCalc. Расчет $T_{\text{пп}}$ по эмпирическим формулам из литературы дал заниженные значения по сравнению с методом пробных закалок и наиболее близкие расчетные $T_{\text{пп}}$ были получены по формулам, приведенным в работах [3, 4].

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. Колачев, И. С. Польшкин. Москва : ВИС-МАТИ, 2009. 520 с.
2. Полуфабрикаты из титановых сплавов / В. К. Александров [и др.] Москва : Металлургия, 1979. 512 с.
3. Колачев Б. А. О связи температуры $\alpha+\beta \rightarrow \beta$ -перехода промышленных титановых сплавов с их химическим составом / Б. А. Колачев, Ю. Б. Егорова, С. Б. Белова // МиТОМ. 2008. № 8. С. 10–14.
4. Effects of Deformation Rate on Microstructure and Tensile Properties of Cold Rolled Ti–3Al–2,5V Alloy Tube / Qiang Liao [et al.] // Ti-2011. Proceedings of the 12th World Conference on Titanium. China National Convention Center (CNCC), Beijing, 2011. Vol. 1. P. 278–281.
5. Guo Z. Modelling beta transus temperature of titanium alloys using artificial neural network / Z. Guo, S. Malinov, W. Sha // Computational Materials Science. 2005. Vol. 32. P. 1–12.
6. Yolton C. F. Alloying Element Effects in Metastable Beta Titanium Alloys / C. F. Yolton, F. H. Froes, R. F. Malone // Metallurgical Transactions A. 1979. Vol. 10A, № 1. P. 132–134.