

## Актуальность применения термоциклической обработки для псевдо $\alpha$ -титановых сплавов

Магистранты группы 50401123 Шматова А.А., Матюков И.М.  
 Научный руководитель – Стефанович В.А.  
 Белорусский национальный технический университет  
 г. Минск

В настоящей статье рассмотрено предложение использовать для упрочнения псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов, а именно сплавов ВТ20 и ОТ4, термоциклическую обработку (ТЦО), для которых одновременно можно повысить прочность и пластичность однофазных материалов (на 20...35%) и существенно увеличить теплостойкость. При этом энергозатраты и длительность ТЦО значительно ниже, чем при закалке длительным старением (традиционной термообработкой псевдо-  $\alpha$ -титановых сплавов) [1].

Экспериментально и теоретически были установлены в источнике [1], закономерности формирования структуры, фазового состава и дислокационной структуры при термоциклической обработке. Установлено, что при термоциклировании титановых сплавов в области температур полиморфного превращения (10...12 циклов) происходит интенсивное измельчение зерна (до 3...5мкм), уменьшение содержания  $\beta$ -фазы в структуре (менее 5%) и формирование в зернах  $\alpha$ -фазы густой и стабильной сетки дислокаций, стабильной при высоких температурах. В результате прочность псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов ВТ20 и ОТ4 достигает больших величин (1240МПа и 970МПа соответственно), что в 1,4 раза выше, чем у исходных материалов в состоянии поставки, а пластичность и ударная вязкость сохраняется на удовлетворительном уровне. Псевдо- $\alpha$ -титановые сплавы, упрочненные термоциклированием, по механическим характеристикам не уступают высокопрочным ( $\alpha+\beta$ )-титановым сплавам, а по теплостойкости превосходят их.

Экспериментальное исследование влияния термоциклической обработки псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов показало, что термоциклирование сплавов ВТ20 и ОТ4 способствует сфероидизации их структуры и значительному измельчению зерна. Максимальная (верхняя) температура в цикле выбиралась исходя из условия полного  $\alpha \leftrightarrow \beta$  превращения, т.е.  $T_{\max} = A_{\Gamma 3} + (30 \dots 50)^\circ\text{C}$ . Минимальная (нижняя) температура была ниже температуры полиморфного превращения, т.е. ниже точки  $A_{c1}$ , но до температуры начала рекристаллизации. Для сплава ВТ20  $T_{\max\text{ВТ20}} = 1100^\circ\text{C}$ ,  $T_{\min\text{ВТ20}} = 800^\circ\text{C}$ , для сплава ОТ4  $T_{\max\text{ОТ4}} = 1000^\circ\text{C}$ ,  $T_{\min\text{ОТ4}} = 760^\circ\text{C}$ . Оптимальные скорости нагрева и охлаждения псевдо- $\alpha$ -сплавов определялись экспериментально. Установлено, что при скорости охлаждения  $1^\circ\text{C}/\text{с}$  величина сплава ВТ20 уменьшается примерно в 2 раза против исходного размера за 10 циклов обработки. При скорости охлаждения  $10^\circ\text{C}/\text{с}$  величина зерна после аналогичного термоциклирования уменьшается в 10 раз. С другой стороны при увеличении скорости охлаждения в титановых сплавах образуются метастабильные фазы ( $\omega$ -Ti,  $\alpha'$ -Ti,  $\alpha''$ -Ti), что приводит к снижению их прочности, теплостойкости и значительному охрупчиванию сплава. Изменение скорости нагрева титановых сплавов в пределах  $5 \dots 20^\circ\text{C}/\text{с}$  практически не влияет на результаты термоциклирования.

Таблица 1. Механические свойства сплава ВТ20 после термоциклической обработки [1]

Число циклов обработки в интервале 1100-800 $^\circ\text{C}$	Механические свойства			
	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %	Ударная вязкость КСУ, МДж/м $^2$
БезТЦО	930	12	20	250

ТЦО, 1 цикл	950	10	20	290
ТЦО, 2 цикла	985	6	19	320
ТЦО, 4 цикла	990	6	19	350
ТЦО, 6 циклов	1000	5,2	18	450
ТЦО, 8 циклов	1100	5,1	18	480
ТЦО, 10 циклов	1240	5,0	17	505
ТЦО, 20 циклов	1250	4,8	17	492
ТЦО, 40 циклов	1250	4,7	17	500

Таблица 2. Механические свойства сплава ВТ20 после термоциклической обработки[1]

Число циклов обработки в интервале 1100-800°С	Механические свойства			
	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %	Ударная вязкость КСУ, МДж/м <sup>2</sup>
БезТЦО	720	15	23	350
ТЦО, 1 цикл	735	10	21,5	370
ТЦО, 2 цикла	780	9	20	390
ТЦО, 4 цикла	850	8	20,5	470
ТЦО, 6 циклов	930	7,5	18	490
ТЦО, 8 циклов	935	6	17,5	530
ТЦО, 10 циклов	970	6	17,5	535
ТЦО, 20 циклов	970	6	17	535
ТЦО, 40 циклов	970	15	17	350

Экспериментальные исследования влияния термоциклической обработки на прочность титановых сплавов при растяжении и при ударе показали, что при увеличении числа циклов обработки сплавов ВТ20 и ОТ4 до 10 циклов их прочность увеличивается до  $\sigma_B=970$ МПа для сплава ОТ4 и до  $\sigma_B=1240$ МПа для сплава ВТ20. Дальнейшее увеличение циклирования не приводит к возрастанию прочности этих сплавов, что коррелирует со степенью измельчения структуры – наименьшие размеры зерен в исследуемых сплавах образуются при 10...12 циклах обработки. При том же числе циклов в зернах  $\alpha$ -титана формируется дислокационная структура в виде густой и стабильной сетки, т.е. происходит наклеп зерен, вызывающий значительное повышение их прочности. При этом наблюдается некоторое снижение пластичности обоих исследуемых сплавов.

Термоциклирование псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов ВТ20 и ОТ4 вызывает значительное повышение их ударной вязкости. Это повышение наблюдается до 10 циклов обработки, как и увеличение статической прочности. Очевидно, это связано с особенностями структуры, формирующейся в сплавах в результате термоциклической обработки: мелкие твердые зерна  $\alpha$ -фазы, окруженные тонкими прослойками  $\beta$ -фазы.

Разрушение титановых сплавов, прошедших термоциклическую обработку, имеет смешанный вязко-хрупкий характер. Зоны вязкого разрушения локализованы на границах зерен  $\alpha$ -фазы (в прослойках  $\beta$ -фазы), сами зерна, упрочненные наклепом, разрушаются хрупко.

В результате исследования было установлено, что использование термоциклической обработки делает возможным существенное упрочнение псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов, которые не упрочняются закалкой с последующим старением. А также термоциклическая обработка псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов в области температур полиморфного превращения вызывает значительное измельчение и сфероидизацию зерен, а также формирование

субструктуры с густой сеткой дислокаций, устойчивой при высоких температурах, что обеспечивает повышение прочности и износостойкости этих сплавов. При этом энергозатраты и длительность ТЦО значительно ниже, чем при закалке длительным старением.

#### **Список использованных источников**

1. Ворначева, И.В. Упрочнение титановых сплавов для рабочих лопаток паровых турбин повышенной мощности методами термоциклирования и электроискровым легированием : специальность 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ворначева Ирина Валерьевна. – Курск, 2020. – 220 с.