

## МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОРИСТОГО СПЛАВА Ti – 45.0 AT.% Ni ПРИ СЖАТИИ

Беляев С.П., Реснина Н.Н., Грачева А.Г., Воронков А.В.

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

gracheva\_a@mail.ru

Пористые сплавы с памятью формы являются перспективными кандидатами для костных имплантатов, поскольку они обладают развитой системой открытых, сквозных пор и проявляют деформационное поведение схожее с поведением костной ткани [1]. Поэтому особенно актуальным является изучение механического поведения таких объектов. В [2] было отмечено, что свойства пористых сплавов на основе TiNi управляются химическим составом смеси порошков, используемой для получения пористых сплавов методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, и параметрами термообработки. Так, было показано, что пористые сплавы TiNi, синтезированные их смеси порошков Ti – 45.0 ат. % Ni, проявляют функциональные свойства близкие к свойствам литого эквивалентного сплава Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>. В этом материале термоупругие мартенситные превращения реализуются в температурном интервале 30 °C ÷ 110 °C.

Структура пористого сплава Ti – 45.0 ат. % Ni отличается от структуры сплава Ti – 50.0 ат. % Ni, как объемной долей вторичных фаз, так и объемной долей фазы TiNi, способной испытывать мартенситные превращения при охлаждении и нагревании [2]. Поэтому следует ожидать, что и механические свойства пористого сплава Ti – 45.0 ат. % Ni будут отличаться от свойств сплава Ti – 50.0 ат. % Ni. В связи со сказанным, целью настоящей работы явилось изучение механического поведения пористого сплава Ti – 45.0 ат. % Ni при сжатии.

В работе пористый сплав TiNi был получен методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из смеси Ti – 45.0 ат. % Ni. Полученная пористая заготовка имела диаметр 35 мм и длину 100 мм. Исследование пористой структуры показало, что пористые каналы расположены параллельно длине заготовки, а величина пористости составляет 64%. Из заготовки были вырезаны образцы размером 10x10x10 мм для механических экспериментов на сжатии и 3x3x2 мм для калориметрических исследований. Мартенситные превращения изучали методом дифференциального сканирующего калориметра при изменении температуры от 100 °C до -100 °C со скоростью охлаждения/нагрева 10 °C/мин в аппарате METTLER TOLEDO 822e. Сжатие образцов проводили в испытательной установке SHIMADZU 50k AG,

оснащенной крио-термокамерой. Образцы деформировали с промежуточными разгрузками до разрушения при постоянных температурах, при которых сплав находился в мартенситном и аустенитном состояниях.

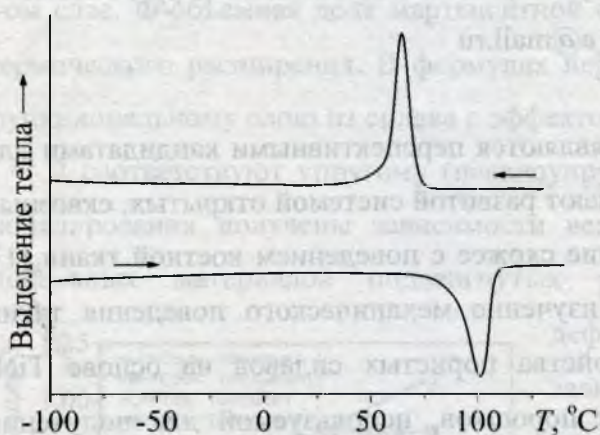


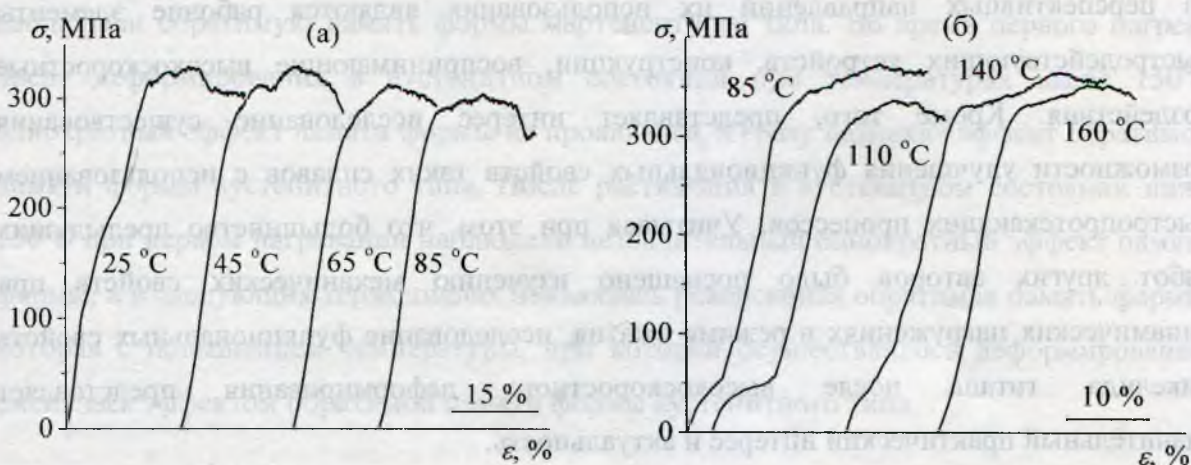
Рисунок 1. Калориметрическая кривая, полученная при охлаждении и нагревании пористого сплава Ti – 45,0 ат. % Ni, синтезированного методом СВС

На рисунке 1 представлены калориметрические кривые, полученные при охлаждении и нагревании пористого сплава Ti – 45,0 ат. % Ni. Видно, что на кривой наблюдается один пик выделения и один пик поглощения тепла при высоких температурах. Эти пики связанные соответственно с прямым  $B2 \rightarrow B19'$  и обратным  $B19' \rightarrow B2$  переходами. По калориметрическим

кривым были определены температуры мартенситных переходов, которые составили:  $M_H = 72 ^\circ\text{C}$ ,  $M_K = 56 ^\circ\text{C}$ ,  $A_H = 87 ^\circ\text{C}$ ,  $A_K = 108 ^\circ\text{C}$ . Поскольку температуры мартенситных переходов в пористом сплаве совпадают с мартенситными переходами в литом сплаве  $Ti_{50}Ni_{50}$ , то было сделано заключение о том, что концентрация никеля в фазе  $TiNi$ , в которой реализуются эти превращения, составляет 50,0 ат.%. По методике, описанной в [2], была определена объемная доля этой фазы, которая составила 60 %.

На рисунке 2 представлены диаграммы деформирования, полученные при сжатии пористых образцов сплава Ti – 45,0 ат. % Ni при различных температурах, при которых сплав находился в мартенситном (а) и аустенитном (б) состояниях. Видно, что в мартенситном состоянии две площадки текучести наблюдаются только при температуре  $25 ^\circ\text{C}$ . Увеличение температуры деформирования приводит к вырождению первой площадки текучести, связанной с переориентацией мартенситных кристаллов. В аустенитном состоянии, напротив, при температурах  $85 - 140 ^\circ\text{C}$  наблюдается две площадки текучести, первая из которых связана с наведением под напряжением мартенситных кристаллов. Однако при разгрузке кристаллы мартенсита не исчезают, т.е. обратное превращение в сплаве не происходит. Таким образом пористый сплав Ti – 45,0 ат. % Ni, как и литой сплав  $Ti_{50}Ni_{50}$  не демонстрирует эффект псевдоупругости. При температуре  $160 ^\circ\text{C}$  пористый сплав демонстрирует типичное поведение, схожее с поведением обычных сплавов, т.е. на диаграмме деформирования присутствует одна площадка текучести при высоких напряжениях, которая

обусловлена дислокационным скольжением. Вместе с тем необходимо отметить ряд особенностей, которые отличают механические свойства этого сплава от свойств литого сплава  $Ti_{50}Ni_{50}$ . Во-первых, это низкий предел прочности, который составляет 300 – 350 МПа. Во-вторых – большую деформацию, накапливающуюся до дислокационного предела текучести. Так, при температуре 160 °С (в аустенитном состоянии) на прямолинейном участке диаграммы деформация увеличивается на 8 %, а при температуре 65 °С (в мартенситном состоянии) на 7%. По всей видимости, это связано с наличием в пористом сплаве большого количества тонких перегородок, которые деформируются не по упругим законам, при этом макроскопическое изменение деформации оказывается близким к линейному.



**Рисунок 2.** Диаграммы деформирования, полученные при сжатии пористого сплава  $Ti - 45.0$  ат. %  $Ni$  при различных температурах, при которых сплав находился в мартенситном (а) и аустенитном (б) состояниях

1. Bansiddhi A., Sargeant T.D., Stupp S.I., Dunand D.C. // *Acta Biomaterialia* 2008. V.4. P. 773 – 782.
2. N. Resnina, S. Belyaev, A. Voronkov // *Intermetallics* 2013. V. 32. P. 81 – 89.