

## ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ПОРИСТОМ СПЛАВЕ Ni-Ti, ПОЛУЧЕННОМ МЕТОДОМ СВС ПОСЛЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АКТИВАЦИИ ШИХТЫ

Рубаник В.В. мл.<sup>1</sup>, Рубаник В.В.<sup>1</sup>, Ломач М.С.<sup>1</sup>, Рубаник О.Е.<sup>2</sup>, Шилин А.Д.<sup>1</sup>,  
Maashaa D.<sup>3</sup>, Agvaantseren T.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь, ita@vitebsk.by

<sup>2</sup>Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь

<sup>3</sup>Mongolian University of Life Science, Ulaanbaatar, Mongolia,  
Dovchinvanichig@muls.edu.mn

Пористые сплавы никелида титана, обладающие эффектом памяти формы или сверхупругости, являются перспективными материалами, как для медицины, так и технических применений. Эти материалы получают методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), являющегося сегодня одним из самых дешевых и простых. Структуру и свойства таких пористых материалов можно изменить за счет ультразвукового воздействия, как на исходный порошковый материал, так и на процесс синтеза. Предварительная ультразвуковая активация (УА) смеси порошков никеля и титана способствует образованию более изотропной пористой структуры в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и делает состав фазы NiTi более однородным. Поскольку высокотемпературный синтез занимает непродолжительное время, процесс структурообразования в сплаве протекает не в полной мере, необходимо проводить дополнительный отжиг материала. В связи с этим целью работы являлось исследование влияния термообработки на мартенситные превращения в пористом сплаве Ni-Ti, полученном методом СВС после ультразвуковой активации исходных порошков.

В качестве исходных порошков использовали порошки титана и никеля. Смесь готовили в соотношении Ti–50.0ат.%Ni с общей массой навески 50 г. Порошки, соединенные в данной пропорции, перемешивали в течение 8 часов в V-образном смесителе с постоянной частотой вращения. Далее смесь порошков массой 50 г подвергали ультразвуковой активации с частотой 22 кГц, используя ультразвуковой генератор УЗГ2-1М. Обработка производилась в течении разного времени: от 15 до 120 минут. Варьировали также амплитуду ультразвуковых колебаний. После этого, смесь порошков засыпали в кварцевый стакан диаметром 30 мм и высотой 30 мм, устанавливали в реактор, прокачивали внутренний объем аргоном и включали печь нагрева. При достижении температуры 350°C выдерживали образец в течение 1 часа и инициировали реакцию СВС. После этого из центральной части вырезали образцы для последующей термообработки и калориметрических исследований.

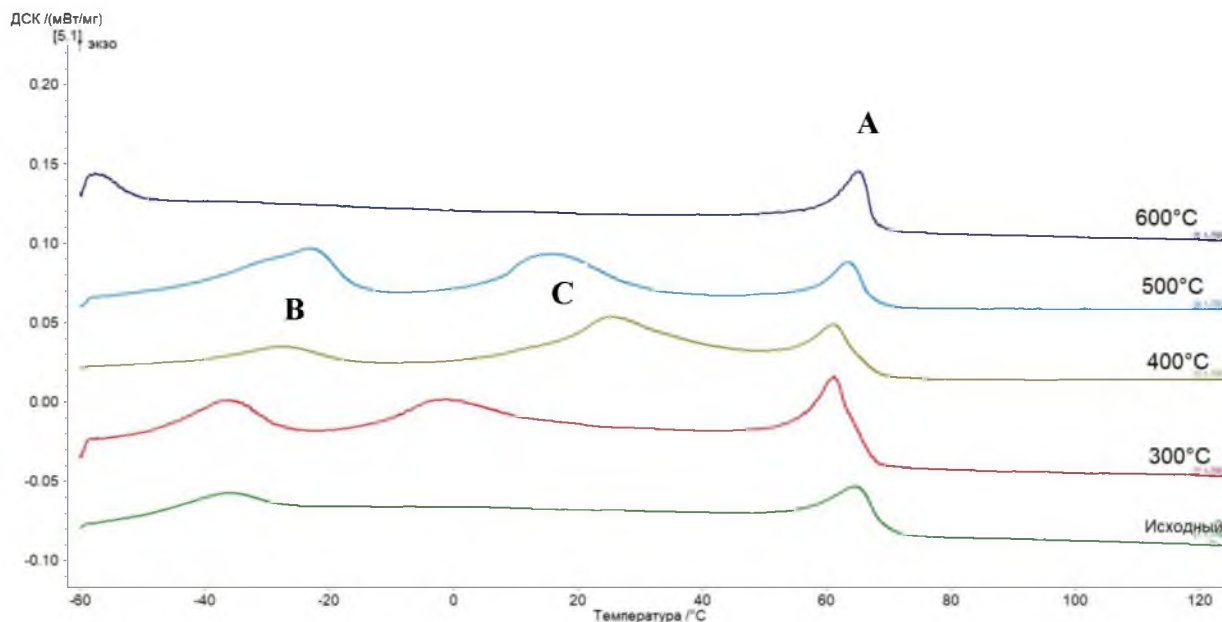
Изохронный отжиг проводили в муфельной печи в интервале температур от 300 до 600°C с шагом 100°C и выдержкой при каждой температуре 30 минут. После каждого отжига исследовали кинетику мартенситных переходов методом измерения теплового потока при охлаждении и нагреве на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 214 Polyma компании NETZSCH. Скорость охлаждения и нагрева составляла 10°C/мин, температурный интервал исследований – от -60°C до 140°C.

На рисунке 1 представлены калориметрические кривые, полученные при охлаждении (а) и нагреве (б) образцов пористого никелида титана, полученного методом СВС, после изохронного отжига. Во всех полученных СВС пористых образцах наблюдается несколько калориметрических пиков при охлаждении и при нагреве. Высокотемпературные пики А и Е соответствуют превращению B2→B19' реализуемому в областях с содержанием никеля близком к 50,0%, а пики В и D тому же превращению, протекающему в объемах с повышенной концентрацией никеля.

Отжиг приводит к изменению температур фазовых переходов, а также к изменению количества пиков выделения тепла. Отжига при температурах 400 и 500°C

приводит к появлению пика С, обусловленному фазовым превращением из кубической фазы В2 в промежуточную ромбоэдрическую фазу R. При этом низкотемпературный фазовый переход в областях с повышенной концентрацией никеля протекает по схеме В2→R→В19'.

а)



б)

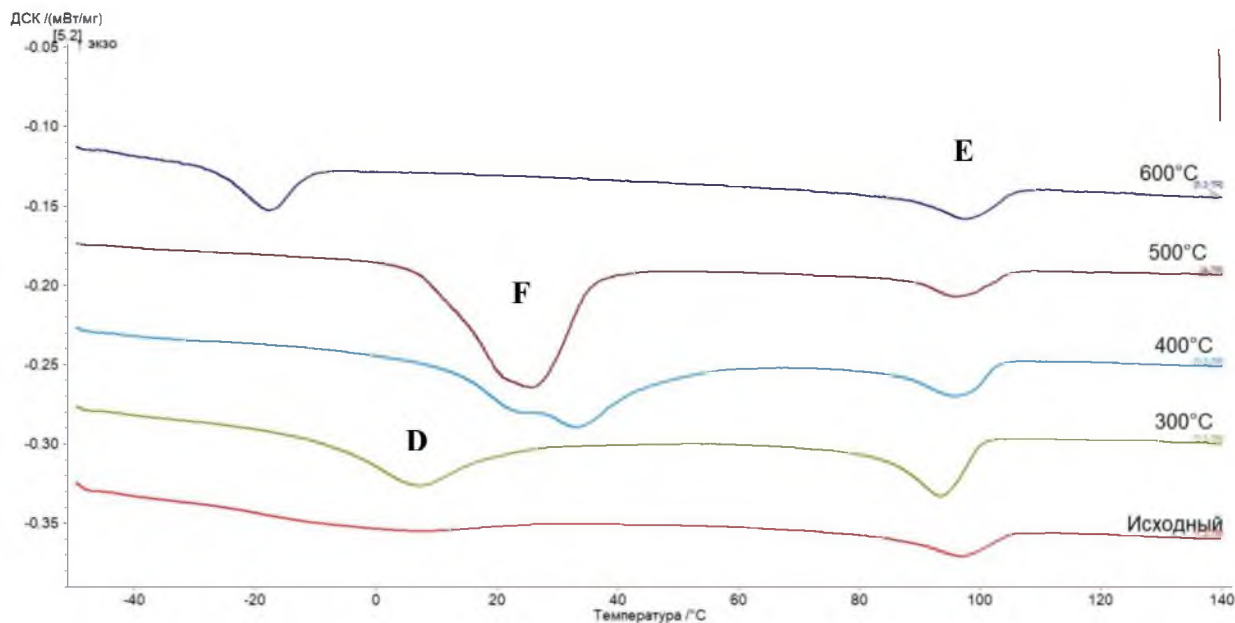


Рисунок 1 – Калориметрические кривые, полученные при охлаждении (а) и нагреве (б) сплава NiTi, полученного методом СВС после УА в течение 60 мин с амплитудой колебаний 25 мкм, после каждого этапа изохронного отжига

Отжиг при температуре 500°C приводит для всех образцов к появлению при нагревании высокоинтенсивного пика F, что, видимо, связано с частичным растворением частиц вторичной фазы  $Ti_3Ni_4$  и диффузионным перераспределением Ni

в TiNi. Это способствует увеличению объемной доли фазы TiNi, претерпевающей мартенситные превращения.

Регистрация двух пиков тепловыделения при охлаждении и двух пиков теплопоглощения при нагреве после отжига пористых образцов при 600°C приводит к полному растворению частиц вторичной фазы Ti<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub> в TiNi и реализации фазовых превращений по схеме B2↔B19' без образования промежуточной R фазы.

Таким образом, для всех полученных СВС пористых образцах до отжига наблюдаются два калориметрических пика при охлаждении и два пика при нагревании. Изохронный отжиг в интервале температур 300-600°C приводит к изменению параметров мартенситных превращений полученных методом СВС пористых образцов никелида титана:

- количество пиков тепловыделения после отжига при 300, 400, 500°C увеличивается до трех, что обусловлено фазовым превращением из кубической фазы B2 в промежуточную ромбоэдрическую фазу R;

- смещению пиков B, C, D, и F и изменению их интенсивности, что связывается с изменением в процессе термообработки доли вторичной фазы Ti<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub>;

- изменению характеристических температур мартенситных переходов, как следствие предыдущего пункта.

При этом следует отметить, что характеристические температуры мартенситных переходов для калориметрических пиков А и Е практически не изменяются.

***Работа выполнена в рамках совместного гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Монгольского фонда науки и технологии (T21Mn-004, ShuKhtB-2021/02).***