

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОРИСТЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ TiNi

¹Реснина Н.Н., ¹Беляев С.П., ²Воронков А.В.

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

²ООО «Альфа Технологии», г. Санкт-Петербург, Россия, E-mail: resnat@mail.ru

В настоящее время в медицине в качестве имплантатов применяют конструкции из металлов, керамики, углерода и полимеров, однако они часто разрушаются. В первую очередь это связано с тем, что отклик материала имплантата и живой ткани на механические воздействия оказывается различным. Костные ткани уже при малых напряжениях деформируются неупруго, при этом почти вся деформация является обратимой и восстанавливается при разгрузке. В то же время большинство известных материалов, применяемых в качестве имплантатов, при малых напряжениях деформируются упруго, а при неупругом деформировании в них накапливается деформация, которая не исчезает при разгрузке. Это приводит к тому, что деформация костной ткани и имплантата является несовместимой, что часто приводит к разрушению последнего. Материалами, механическое поведение которых подобно поведению живых тканей, являются сплавы с памятью формы на основе соединения TiNi, поэтому они являются перспективными материалами для имплантатов. Наибольший интерес представляют пористые сплавы, поскольку сквозная система пор позволяет костной ткани прорасти сквозь имплантат, что обеспечивает его надежную фиксацию в организме.

Большое внимание уделяется пористым сплавам с памятью формы на основе TiNi, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Хорошо изучены условия их получения, структура и мартенситные превращения. Вместе с тем функциональные свойства пористых сплавов, особенно сплавов, состав которых отличается от Ti₅₀Ni₅₀, изучены недостаточно, поэтому целью работы явилось изучение эффектов псевдоупругости, однократной и обратимой памяти формы, пластичности превращения и памяти формы при охлаждении и нагревании под нагрузкой в пористых сплавах на основе TiNi, с концентрацией никеля 45 ат % и 48 ат %, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Пористые сплавы были получены из смеси порошков титана и никеля в соответствующих пропорциях методом СВС при температуре предварительного нагрева 450 °С. После синтеза образцы отжигали при температуре 500 °С 1 час. Установлено, что сплав Ti–45.0 ат.% Ni, состоит на 60 % из фазы TiNi, которая вся претерпевает мартенситный переход B2→B19' при высоких температурах, соответствующих температурам этого перехода, наблюдаемого в литом сплаве Ti₅₀Ni₅₀, и на 40 % из фазы Ti₃Ni₄, которая не претерпевает переходов. Сплав Ti–48.0 ат.% Ni, состоит на 60 % из фазы TiNi, из которых 25 % фазы TiNi имеет концентрацию никеля 50,0, ат. %, и 35 % фазы TiNi, в которой концентрация никеля составляет 50,7 ат.%. Оставшийся объем занимают вторичные фазы, обогащенные как титаном, так и никелем. Поскольку температуры мартенситных переходов зависят от концентрации никеля, то в сплаве Ti–48.0 ат.% Ni наблюдаются переходы в разных температурных интервалах. Превращение B2→B19' имеет место при высоких температурах, соответствующих температурам этого перехода, наблюдаемого в литом сплаве Ti₅₀Ni₅₀, а превращения B2→R→B19' происходят при низких температурах, соответствующих температурам переходов в литом сплаве Ti_{49.3}Ni_{50.7}.

Для исследования эффекта псевдоупругости пористые сплавы деформировали сжатием при различных температурах. Полученные данные показали, что характерных флагообразных кривых при деформировании пористых сплавов на основе TiNi с изученным составом не наблюдается. Вместе с тем, пористые сплавы восстанавливают значительную деформацию при разгрузке, причем, чем выше концентрация никеля, тем больше деформация восстанавливается при разгрузке (рис.1).

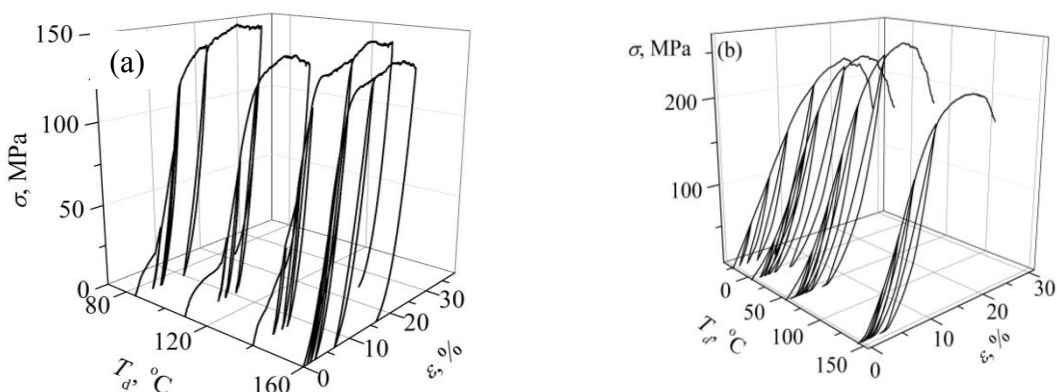


Рисунок 1 – Диаграммы деформирования пористых сплавов Ti – 45.0 ат.% Ni (а) и Ti – 48.0 ат.% Ni (б) при различных температурах

Для исследования эффектов однократной и обратимой памяти формы пористые образцы сжимали при температуре, при которой фаза TiNi находилась в мартенситном состоянии, разгружали, нагревали через температурный интервал обратного мартенситного перехода и охлаждали через температурный интервал прямого превращения. Полученные данные показали, что при разгрузке большая часть деформации восстанавливается. Так, например, в образце сплава Ti–48.0 ат. % Ni, при температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ после деформации до 10 %, при разгрузке восстанавливается почти 7 % деформации. При последующем нагревании наблюдается эффект памяти формы, т.е. деформация, не вернувшаяся при разгрузке, восстанавливается в ходе нагревания. При последующем охлаждении эффект обратимой памяти формы не наблюдается. Необходимо отметить, что поскольку в сплаве Ti–45.0 ат.% Ni реализуется одно превращение, а в сплаве Ti–48.0 ат.% Ni – наблюдаются два перехода, то и восстановление деформации при нагревании происходит в один или два этапа соответственно. На рисунке 2 представлены зависимости эффекта памяти формы от величины остаточной деформации, приобретенной в процессе деформирования сплавов в мартенситном состоянии. Видно, что увеличение концентрации никеля в пористом сплаве приводит к увеличению обратимой деформации в два раза. В сплаве Ti–45.0 ат.% Ni максимальное значение эффекта памяти формы составляет 1,2 %, в то время, как в сплаве Ti–48.0 ат.% Ni, максимальное значение обратимой деформации достигает 4,5 %. Это связано с тем, что при увеличении концентрации никеля в шихте, в пористом сплаве образуется фаза TiNi с высокой концентрацией никеля, в которой при отжиге выпадают частицы фазы Ti_3Ni_4 , упрочняющие материал. Это приводит к тому, что в сплаве Ti–48.0 ат.% Ni вклад неупругой деформации в остаточную оказывается меньше, чем в сплаве Ti–45.0 ат.% Ni. Именно по этой причине сплав Ti–48.0 ат.% Ni способен восстановить гораздо больше деформации при нагревании, чем сплав Ti–45.0 ат.% Ni.

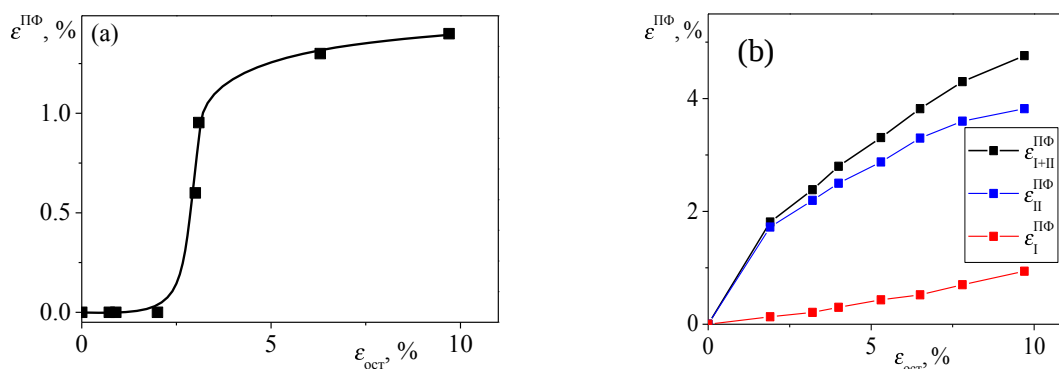


Рисунок 2 – Зависимости величины эффекта памяти формы от остаточной деформации, полученные в пористых сплавах Ti – 45.0 ат.% Ni (а) и Ti – 48.0 ат.% Ni (б)

Для исследования эффектов пластичности превращения и памяти формы пористые образцы сжимали при температуре 130 °С, при которой фаза TiNi находилась в аустенитном состоянии, до напряжения 50–200 МПа и охлаждали и нагревали под постоянным напряжением через температурный интервал мартенситных переходов. Полученные результаты показали, что в сплаве Ti–45.0 ат.% Ni изменение деформации при охлаждении и нагревании происходит в один этап, поскольку этот материал претерпевает один переход. В сплаве Ti–48.0 ат.% Ni деформация накапливается в три этапа, а исчезает в два этапа, что также определяется количеством мартенситных переходов, имеющих место в сплаве при охлаждении и нагревании. На рисунке 3 представлены зависимости величин эффекта памяти формы, который наблюдается после эффекта пластичности превращения, от величины напряжения, действующего при охлаждении и нагревании. Видно, что увеличение концентрации никеля незначительно влияет на обратимую деформацию, и подавляет необратимую деформацию. Таким образом, результаты работы показали, что увеличение концентрации никеля в шихте уменьшает необратимую деформацию, и тем самым, улучшает функциональные свойства пористых сплавов на основе TiNi.

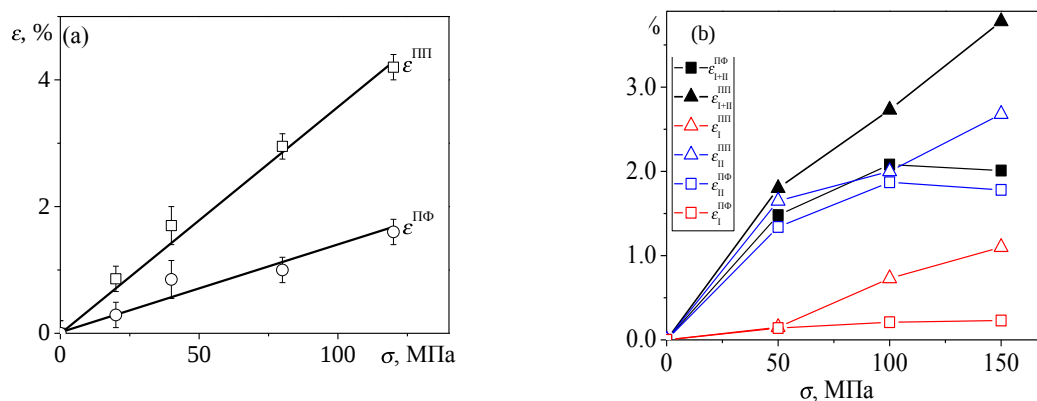


Рисунок 3 – Зависимости величин эффектов пластичности превращения и памяти формы от напряжения, полученные в пористых сплавах Ti – 45.0 ат.% Ni (а) и Ti – 48.0 ат.% Ni (б)

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-05021.