

УДК 669.295'24

## ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПРОВОЛОКИ НИКЕЛИДА ТИТАНА ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Милюкина С. Н., Рубаник В. В. (мл.), Рубаник В. В.\*, Дорудейко В. Г.\*\*

УО «ВГТУ», \* ГНУ «ИТА НАН Беларуси», \*\*ЗАО «Симурз», Витебск, Беларусь  
 miliukina@mail.ru

Уникальные свойства сплавов с эффектом памяти формы (их способность запоминать форму, сверхупругость, биологическая совместимость с тканями человеческого организма) позволяют успешно применять их в медицине уже много лет в качестве материала для изготовления имплантантов и различных медицинских инструментов. Известно, что наилучшим комплексом функциональных свойств (обратимая деформация, характеристические температуры интервала мартенситных превращений и др.) в сочетании с высокими значениями механических свойств обладают сплавы никелида титана [1]. В данной работе приведены результаты исследований по влиянию времени и температуры тепловой обработки на характеристические температуры (ХТ) и задаваемую деформацию проволоки TiNi для медицинского применения.

Исследования проводили на образцах проволоки никелида титана Ti-50,8at.%Ni с исходными температурами фазовых превращений:  $M_n' = 21^\circ\text{C}$ ,  $M_s' = 9^\circ\text{C}$ ,  $M_n = -25^\circ\text{C}$ ,  $M_s = -51^\circ\text{C}$ ,  $A_n' = 9^\circ\text{C}$ ,  $A_n = 12^\circ\text{C}$ ,  $A_s = 22^\circ\text{C}$ . Прямой и обратный фазовые переходы осуществляются по схеме B2  $\rightarrow$  R  $\rightarrow$  B19'. Образцы проволоки никелида титана деформировали вокруг цилиндрической оправки (задаваемая деформация составляла 3%) и подвергали тепловой обработке при различных температурах от 250 до 550°C в течение промежутков времени от 15 до 120 минут с последующей закалкой.

В результате проведенных исследований получили зависимость температуры окончания обратного фазового превращения в TiNi  $A_k$  от температуры и времени тепловой обработки (рис. 1).

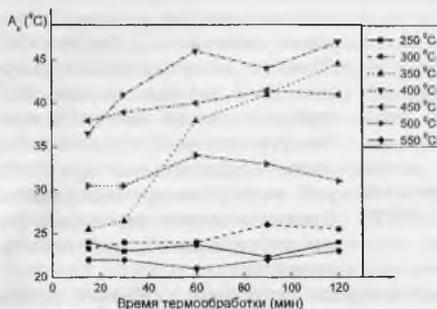


Рис. 1. Зависимость температуры окончания обратного фазового превращения TiNi ( $A_k$ ) от времени и температуры термообработки

Термообработка при 250, 300 и 450–550°C изменяет температуру  $A_k$  в пределах 3–4°C при варьировании времени термообработки от 15 до 120 минут (стабильные по отношению к времени обработки режимы). В то же время, если при 250°C, 300°C наблюдается увеличение  $A_k$  по сравнению с исходной величиной на 1–4°C, то при 450°C — уже на 16±19°C, при 500°C — на 9–12°C, а при 550°C — значение температуры окончания обратного мартенситного превращения соответствует такому у исходной проволоки. Наибольшее влияние времени термообработки отмечено при 350 и 400°C: при 350°C значения  $A_k$  изменяются от 26°C (15 мин) до 45°C (120 мин), а при 400°C — от 37°C (15

мин) до  $47^{\circ}\text{C}$  (120 мин) в зависимости от времени выдержки образцов в печи. Следует отметить также, что при температурах  $400$  и  $450^{\circ}\text{C}$   $A_k$  возрастает на  $15\text{--}16^{\circ}\text{C}$  уже за первые 15 минут тепловой обработки.

Ширина температурного интервала, в котором осуществляется мартенситное превращение, также зависит от режима термообработки (рис. 2). Наименьшее влияние наблюдается при  $250$  и  $300^{\circ}\text{C}$ ; при  $450\text{--}550^{\circ}\text{C}$  температурный интервал превращения мартенсит  $\rightarrow$  аустенит сужается до  $3\text{--}5^{\circ}\text{C}$ . Наибольшее же воздействие на  $A_k - A_n$  оказывает варьирование времени при температурах тепловой обработки  $350$  и  $400^{\circ}\text{C}$ .

Исследуемый материал имеет узкий гистерезис превращения, т.е.  $A_k - M_n$  составляет  $2\text{--}5^{\circ}\text{C}$  и не зависит от режимов тепловой обработки. А это, в свою очередь, свидетельствует о том, что материал обладает высокотемпературной псевдоупругостью [2, 3].

Определили влияние времени и температуры тепловой обработки на фиксацию формы никелида титана (рис. 3).

Тепловая обработка при  $250, 300^{\circ}\text{C}$  задаёт деформацию  $1,4\%$  и  $1,5\%$ , соответ-

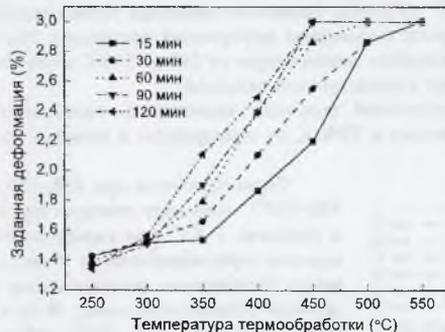


Рис. 3. Влияние времени и температуры тепловой обработки никелида титана на задаваемую деформацию

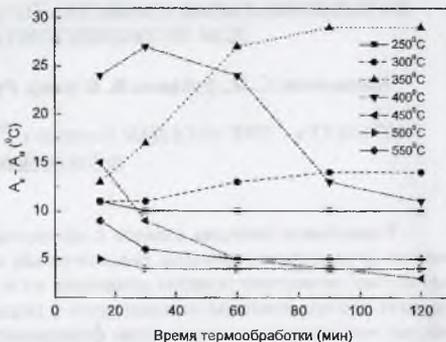


Рис. 2. Зависимость  $A_k - A_n$  от времени и температуры тепловой обработки

венно, причём время выдержки образцов (в исследуемом временном диапазоне) заметного влияния не оказывает. Наибольшая зависимость заданной деформации от времени термообработки наблюдается при температурах  $350, 400$  и  $450^{\circ}\text{C}$  — с увеличением времени тепловой обработки значение заданной деформации увеличивается. Так, при  $450^{\circ}\text{C}$  90 минут выдержки задают требуемую  $3\%$ -ю деформацию; при  $500^{\circ}\text{C}$  требуется уже 60 минут. Но самое быстрое задание требуемой деформации осуществляется при  $550^{\circ}\text{C}$ : уже через 15 минут выдержки наблюдается полное закрепление формы исследуемых образцов никелида титана.

Результаты проведенных исследований хорошо согласуются с работами, опубликованными ранее, и могут быть использованы для оптимизации режимов термомеханической обработки никелида титана [2, 3]. В частности, уже в настоящее время эти данные применяются для изготовления экспериментальных образцов изделий медицинского назначения, таких как внутриматочные спирали и ортодонтические дуги из нитинола.

### Список литературы

1. V.Brailovski, et al., Shape Memory Alloys: Fundamentals, Modeling and Applications (2003).
2. Rubanik V.V. Heat treatment of TiNi wire used for intrauterine contraceptives / V.V. Rubanik, V.V. Rubanik Jr., V.G. Dorodeiko, S.N. Miliukina // Materials Science and Engineering A, J. №6026. – 2007. – doi: 10.1016/j.msea.2007.02.135.
3. Милпокина С.Н. Влияние режимов термообработки на функциональные свойства проволоки никелида титана для внутриматочных контрацептивов / С.Н. Милпокина, В.В. Рубаник (мл.), В.В. Рубаник, В.Г. Дороейко // Сборник материалов конференции «XVII Петербургские чтения по проблемам прочности». – С-Петербург, 2007. – Ч.2. – С.286-287.

УДК 669.018.6

## УТОЧНЕНИЕ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ТЕНЗОРА ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПСЕВДОУПРУГИХ ПРОЦЕССОВ В СПЛАВАХ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Пряхин С. С., Рубаник В. В. мл.

*Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь*

### Введение и постановка задачи

Сплавы с памятью формы (СПФ) характеризует высокая эффективность упорядоченных перестроений между его кристаллографическими вариантами в деформационных процессах. Такие кристаллографические изменения являются термодинамически обратимыми. При обратных кристаллических превращениях эти материалы способны восстанавливать деформацию (свободное восстановление) или развивать внутренние усилия (ограниченное восстановление). Восстанавливаемая деформация в СПФ может достигать уровней 10%, а реактивные усилия ограниченного восстановления – величин, отвечающих напряжениям порядка сотен МПа.

Температурный диапазон проявления таких необычных свойств определяется областью существования различных кристаллографических вариантов. С обнаружением в сплавах никеля и титана свойств памяти формы в диапазоне температур, характерном для обитания человека, существенно расширяется спектр областей исследований, направленных на практическое применение этих материалов. Области исследований включают разработки структурных композиций, в которых элементы из СПФ управляют поведением структур, силовых приводов, медицину и т.д. СПФ относят к группе интеллектуальных материалов. Возникает потребность в создании математических моделей, описывающих термомеханику СПФ для инженерных разработок. Помимо достоверности описания термомеханического поведения, требования к таким моделям включают простоту математического описания (что также подразумевает и простоту параметризации) и простоту интегрирования с существующими пакетами численного анализа. Последним требованиям в большей степени отвечают феноменологические модели, из которых отметим модели Танаки (К. Tanaka, 1986) [1], Лианга–Роджерса (Liang C., Rogers C.A., 1990) [2] и Бринсон (Brinson L. C., 1993) [3]. Данные модели описывают одномерное термомеханическое поведение СПФ в условии квазистатического изменения термомеханической нагрузки.