

ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ TiNi СПЛАВОВ ДЛЯ ЗАДАНИЯ ФОРМЫ

Милюкина С.Н., Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Дородейко В.Г.
ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси»
г. Витебск, Беларусь

УО «Витебский государственный технологический университет»
г. Витебск, Беларусь, E-mail: s.niko@tut.by
ЗАО «Медицинское предприятие Симура», г. Витебск, Беларусь

При использовании TiNi сплавов с эффектом памяти формы в качестве конструктивных элементов возникает необходимость задания материалу формы конструкции (запоминание формы), требуемой для практического использования. С этой целью традиционно осуществляют термообработку заготовки, которой сначала придаётся необходимая форма, в таком состоянии она жестко фиксируется и осуществляется её термообработка при температурах 400–550 °С с выдержкой от нескольких минут до нескольких часов [1]. Известны также другие способы обработки TiNi сплавов для запоминания формы конструкции [2,3], однако все они предусматривают нагрев заготовки обычным тепловым воздействием или электрическим током до довольно высоких температур (превышающих 350 °С). В данной работе рассмотрена ультразвуковая обработка (УЗО) сплава TiNi, как способ задания формы конструкции и её преимущества.

При проведении исследований использовали прямолинейные образцы проволоки Ti–50,4ат.%Ni диаметром 0,65 мм, подвергнутые предварительной термообработке при 700 °С в течение 30 мин с последующей закалкой в воде, после чего их характеристические температуры, определенные методами дифференциальной сканирующей калориметрии, составили: $M_n = 30$ °С, $M_x = 14$ °С, $A_n = 41$ °С, $A_x = 57$ °С. Ультразвуковую обработку осуществляли при комнатных температурах (~ 20 °С) введением в образец TiNi, продеформированный в мартенситной фазе и зафиксированный на конце разрезного титанового волновода полуволновой длины, ультразвуковых колебаний (УЗК) с амплитудой механических напряжений 25 ± 3 МПа и частотой 22 кГц.

Результаты исследований влияния ультразвука на эффекты памяти формы, описанные более детально в работе [4], показали, что ультразвуковая обработка деформированного в мартенситной фазе и заневоленного в этом состоянии TiNi образца приводит к частичному запоминанию сообщённой ему деформации (до ~ 70 %).

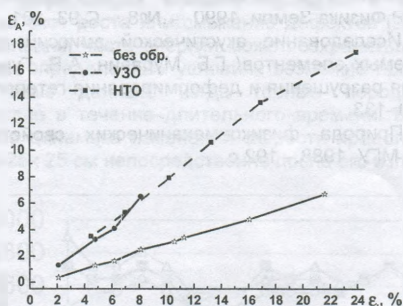


Рисунок 1 – Зависимости запоминаемой деформации от наведенной в результате ультразвуковой и низкотемпературной термической обработок (НТО)

В данном случае запоминание материалом деформации обусловлено реализацией обратного и прямого мартенситных превращений в заневоленном

материале, что подтверждается также результатами аналогичных исследований влияния обычного теплового воздействия (рис. 1), в процессе которых нагрев образца осуществлялся до температуры окончания обратного мартенситного превращения и сопровождался последующим охлаждением до температуры окончания прямого мартенситного превращения [5]. При использовании УЗО прекращение ультразвукового воздействия инициирует прямое мартенситное превращение и, как следствие, эффект пластичности превращения. Схожесть значений запоминаемых деформаций при ультразвуковой и низкотемпературной термической обработках указывает на общий механизм запоминания, заключающийся в реализации обратного мартенситного превращения в деформированном и заневоленном материале, в результате чего пластическая деформация мартенситной фазы переходит в пластическую деформацию аустенитной фазы, что обуславливает запоминание материалом сообразной ему деформации.

Однако различные способы обработки имеют свои особенности как при их реализации, так и воздействию на некоторые функциональные свойства материала.

При термической обработке нагрев образца осуществлялся до температуры ~ 200 °С. Такой режим выбран на основании результатов экспериментальных и модельных исследований температур мартенситных превращений нагруженного материала [6], которые свидетельствуют о том, что в тонких провололочных образцах температура окончания обратного мартенситного превращения A_c^o при увеличении напряжения хоть и сдвигается в сторону повышения согласно уравнению Клаузиуса–Клапейрона (рис. 2), однако не превышает этого значения, – по результатам экспериментальных данных температура A_c^o составляла ~ 160 °С при максимальных напряжениях. В то же время, в процессе ультразвуковой обработки, как показали тепловизионные исследования, максимальная температура в деформированных ($\sim 6,3$ %) и заневоленных образцах не превышает ~ 72 °С (рис. 3).

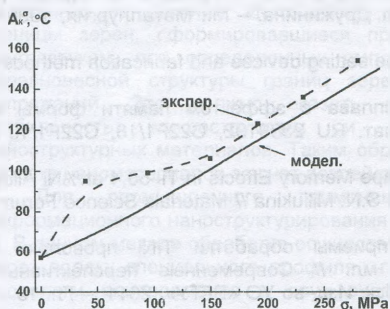


Рисунок 2 – Температура окончания обратного мартенситного превращения при различном напряжении A_c^o в модельном материале и исследуемом сплаве Ti–50,4 ат.% Ni

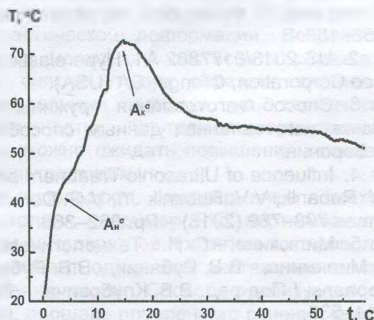


Рисунок 3 – Зависимости максимальной температуры деформированного образца сплава Ti–50,4 ат.% Ni от длительности ультразвукового воздействия

Известно, что при ультразвуковом воздействии TiNi сплав нагревается лишь до температуры окончания обратного мартенситного превращения, что обусловлено значительно более низким внутренним трением в аустенитном состоянии по сравнению с мартенситным или двухфазным [7]. В случае ультразвуковой обработки напряжённого материала температуры обратного перехода оказываются значительно ниже, чем при обычном термическом воздействии, что свидетельствует о более сложном действии ультразвука на материал, которое было бы ошибочно рассматривать лишь как способ нагрева. Такое значительное уменьшение температур обратного перехода, скорее всего, связано с дополнительным действием реактивных

напряжений, появление которых обусловлено невозможностью восстановления деформации, и снижением пластического течения материала под действием ультразвуковых колебаний (эффект Блага–Лангенекера). Именно действием силовой составляющей ультразвука, согласно модели, предложенной в работе [8], можно объяснить увеличение запоминаемой деформации при увеличении амплитуды вводимых УЗК, так как максимальная температура нагрева в процессе УЗО для сплава Ti–50,4 ат. % Ni варьируется в пределах $\sim 65 + 72^\circ\text{C}$ [4]. Снижение температуры образца до $\sim A_k$ ненапряжённого материала после достижения максимального значения в процессе ультразвуковой обработки свидетельствует о релаксации в нём внутренних напряжений и, как следствие, запоминании наведенной деформации.

Функциональные свойства исследуемых образцов после ультразвуковой и термической обработок также несколько различаются. В частности, в результате ультразвуковой обработки в образцах сплава TiNi наблюдается снижение фазового предела текучести, что обуславливает увеличение ресурса обратимой деформации при реализации эффекта памяти формы и, соответственно, более высокие характеристики формовосстановления.

Таким образом, основное преимущество использования ультразвуковой обработки для запоминания формы в сравнении с известными способами заключается в том, что нагрев материала превышает A_k всего на $\sim 15 - 20^\circ\text{C}$ – столь малый разогрев материала при обработке с целью задания памяти формы не имеет аналогов, – что обеспечивает отсутствие повреждений поверхностного слоя, возможность обработки комбинированных элементов конструкции и элементов с покрытиями, не выдерживающих высоких температур, а также упрощение требований к оснастке, необходимой для заневольивания образцов.

Список литературы:

1. Ооцука, К. Сплавы с эффектом памяти формы /, К. Сумидзу, Ю. Судзуки [и др.]; под ред. Х. Фунакубо / пер. с японск. И.И. Дружинина. – М.: Металлургия, 1990. – С. 158–162.
2. US 2013/0177862 A1. Hyperelastic shape setting devices and fabrication methods / Ormco Corporation, Orange, CA (USA).
3. Способ изготовления пружины из сплава с эффектом памяти формы и пружина, изготовленная данным способом: пат. RU 2309192, C22F1/18, C22F1/10 / В.П. Воронин.
4. Influence of Ultrasonic Treatment on Shape Memory Effects in Ti–50,4 at.% Ni Alloy / V.V. Rubanik, V.V. Rubanik Jr., V.G. Dorodeiko, S.N. Miliukina // Materials Science Forum, Volumes 738–739 (2013) – Pp. 362–366.
5. Милюкина, С.Н. Технологические приемы обработки TiNi проволоки / С.Н. Милюкина, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл. // Современные перспективные материалы / Под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: Изд–во УО «ВГТУ», 2011. – Гл. 18. – С. 511–536.
6. Влияние ультразвуковой обработки на эффект памяти формы и функциональные свойства TiNi сплавов / В.В. Рубаник, В.В. Клубович, С.Н. Милюкина, В.В. Рубаник мл. // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. научных трудов в 3 кн. Кн. 1. Материаловедение / редколлегия: С.А. Астапчик [и др.] – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2015. – С. 239–249.
7. Kustov, S. Damping properties of SMA / S. Kustov, J.V. Humbeeck // Materials Science Forum, Vol. 583, 2008. – Pp. 85–109.
8. Рубаник, В.В. (мл.) Иницирование эффекта памяти формы в сплавах TiNi под действием ультразвуковых колебаний: дис. ... канд. физ.–мат. наук: 01.04.07 / В.В. Рубаник (мл.). – Минск, 2005.