

## **УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА**

**<sup>1</sup>Клубович В.В., <sup>1,2</sup>Рубаник В.В. мп.**

*<sup>1</sup>ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси»  
г. Витебск, Беларусь, E-mail: ita@vitebsk.by*

*<sup>2</sup>УО «Витебский государственный технологический университет»  
г. Витебск, Беларусь, E-mail: jr@tut.by*

Сплавам с термоупругими фазовыми переходами уделяется большое внимание в последние десятилетия в связи с их уникальным эффектом памяти формы (ЭПФ), псевдо-упругостью, отличными антикоррозионными свойствами и очень хорошей биосовместимостью. В научных работах исследования сосредоточены, в основном, на трех группах материалов с ЭПФ – сплавы на основе соединений Ni-Ti, Cu-Al и Fe-Mn. Каждая группа обладает своими преимуществами и недостатками, но сплавы на основе Ni-Ti (никелид титана) сегодня доминируют на коммерческом рынке из-за лучшего эффекта памяти формы и псевдоупругости. Никелид титана имеет превосходные свойства по пластичности, усталости, коррозионной стойкости, биосовместимости и восстановлению деформации [1]. Несмотря на определенные трудности получения этого сплава (имеет узкий диапазон в 2 ат.% на диаграмме фазового равновесия системы Ti-Ni, в котором он обладает ЭПФ), в зависимости от химического состава, термических и механотермических обработок он может обладать достаточно высокими механическими характеристиками: пределом прочности до 2 ГПа, пределом текучести до 600 МПа, относительным удлинением до 70-80%, величиной обратимой деформации до 15%. Никелид титана способен развивать значительные усилия при изменении формы (до 1 ГПа), он не разрушается при многократном механическом воздействии. Поскольку данные сплавы имеют высокие антикоррозионную стойкость, износостойкость и вязкость, это ставит их в ряд наиболее перспективных материалов с эффектами памяти формы.

В то же время никелид титана представляет собой сложный материал, который очень трудно обрабатывать с использованием обычных методов. Как правило, для него используют следующие традиционные виды обработки:

- Задание формы и термическая обработка
- Электроэрозионная или лазерная резка
- Механообработка
- Соединение и сварка
- Обработка поверхности
- Нанесение покрытий.

Использование дополнительных физических воздействий позволяет в значительной мере интенсифицировать технологические процессы и обработки материалов и в большинстве случаев получать результаты, недостижимые при традиционной технологии. К числу таких воздействий относится высокоэнергетическая ультразвуковая обработка (УЗО) материалов [2,3].

В ходе исследований по влиянию ультразвуковых колебаний (УЗК) на этапе задания формы изделиям из никелида титана установлено, что УЗО влияет на параметры задаваемой деформации и последующего формовосстановления материала, которые зависят от интенсивности и продолжительности ультразвукового воздействия сплавов. Например, ультразвуковое воздействие амплитудой механических напряжений до 50 МПа вызывает увеличение максимальной полностью обратимой деформации при испытаниях на изгиб с 3 до 5 % по сравнению с исходными образцами [4]. Наложение ультразвуковых колебаний на различных этапах задания предварительной деформации образца вызывает рост величины обратимой памяти формы до 50%, по сравнению с обработкой без ультразвукового воздействия, и «сужение» петли гистерезиса фазовых превращений при реализации обратимой памяти формы. Также ультразвуковое воздействие на материал, находящийся в различном фазовом состоянии, приводит к изменению температур фазового перехода.

В зависимости от условий УЗО температура  $A_c$ , например, может увеличиваться на 20°C.

Исследован процесс тепловыделения в образцах никелида титана при ультразвуковом воздействии. Показано, что обработка материала локализованным акустическим воздействием вызывает постоянное распределение температуры по длине образцов резонансных размеров [5]. Установлены закономерности протекания термоупругих фазовых превращений, инициированных мощным акустическим воздействием. Показано, что, изменяя параметры ультразвуковых колебаний в процессе инициирования фазового перехода, возможно управление ходом фазового превращения в материале, скоростью его осуществления. Методами инфракрасной термографии поверхности Ti-Ni обнаружено, что интервал уменьшения температуры окончания обратного фазового превращения в зависимости от условий ультразвукового инициирования составляет  $0 \pm 25^\circ\text{C}$ .

Применение материалов с эффектом памяти формы в технологических процессах и медицине, как правило, ограничивается выполнением одноразового срабатывания устройств. При этом выполняется перемещение с несложной траекторией или генерация усилий, требуемых в технологическом процессе. Механизмы, выполняющие возвратно-поступательные перемещения, требуют не только наличия упругого контртела в конструкции, но и нуждаются в чередовании процессов нагрева и охлаждения. При этом выполнение возвратно-поступательного движения на стадии нагрева будет многократным. Еще значительней может быть эффект при ультразвуковом инициировании формовосстановления. Последовательное развитие эффекта памяти формы на различных участках (скользящий эффект) может послужить новым решением многих технических задач.

При реализации «скользящего» эффекта памяти формы, разогреваемый за счет внутреннего трения материал последовательно претерпевает мартенситное превращение, начиная от точки закрепления в концентраторе, по всей длине образца [6]. При этом в материале происходящие деформационные процессы синхронизированы с фазовыми превращениями. Таким образом, ультразвуковое инициирование ЭПФ, с учётом вариаций амплитуды и частоты колебаний даёт возможность управления деформационными процессами протяжённых образцов. При этом происходит разогрев материала лишь до температур, близких  $A_c$ .

В отличие от обычных материалов сплавы с памятью формы, наряду с дислокационным, обладают также другими специфическими механизмами деформации, такими как термоупругое мартенситное фазовое превращение или двойникование, осуществляемые посредством движения таких носителей деформации, как межфазные и двойниковые границы раздела. Это приводит к нехарактерному поведению материала вблизи температуры фазового перехода при внешнем силовом воздействии. Аномальный эффект Блага-Лангенекера наблюдается увеличение напряжения течения Ti-Ni при ультразвуковом воздействии в интервале температур обратного мартенситного превращения при активной изотермической деформации [7]. С увеличением амплитуды ультразвука механические напряжения растут вплоть до предела прочности. Это связано с повышением благодаря тепловой составляющей ультразвука количества аустенитной фазы, напряжения течения у которой выше, чем мартенситной. Причем в силу инертности разогрева на начальном этапе ультразвукового воздействия доминирует силовая составляющая ультразвука, которая вызывает уменьшение напряжения течения. Т.е. в зависимости от исходного фазового состояния, температуры испытания, характера ее изменения акустическое воздействие вызывает рост или падение напряжения течения материала. Зависимость механических напряжений от условий ультразвукового воздействия использована при волочении проволоки из никелида титана.

Таким образом, высокоакустическое ультразвуковое воздействие на сплавы, испытывающие термоупругие мартенситные превращения, позволяет не только инициировать эффекты мартенситной неупругости, но и управлять его функциональными свойствами.

**Список литературы:**

1. J.M. Jani, M. Leary, A. Subic, and M.A. Gibson, A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities, *Materials & Design*, 56 (2013) 1078-1113.
2. Северденко В.П., Клубович В.В. Применение ультразвука в промышленности.– Мн.: Наука и техника, 1967.– 261с.
3. Артемьев В.В., Клубович В.В., Рубаник В.В. Ультразвук и обработка материалов.– Мн.: Экоперспектива, 2003.– 335 с.
4. Influence of ultrasonic vibrations on shape memory effect. Rubanik V., Klubovich V., Rubanik V. // *Shape Memory Alloys: Properties, Technologies, Opportunities // Materials Science Foundations*, Ed. N. Resnina, V. Rubanik, Vols. 81-82, 2015, pp. 406-428.
5. Rubanik V.V., Klubovich V.V., Rubanik V.V., Shadursky A.V. Modeling of ultrasonic initiation of shape memory effect / *J. of Materials Engineering and Performance*, Vol. 20, issue 4, 2011. – P. 731-736.
6. Способ иницирования эффекта памяти формы / Рубаник В.В., Рубаник В.В., Вьюненко Ю.Н., Шадурский А.В. // Патент РБ № 14169. 07.12.2010.
7. Беляев С.П., Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл. Экспериментальное и компьютерное моделирование действия ультразвука на сплав Ti-Ni с памятью формы // *Перспективные материалы и технологии: монография*. В 2т. Т1/ Под ред. В.В.Клубовича – Витебск: УО «ВГУ», 2015.