

ТЕРМОУПРУГИЕ МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В TiNi ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл.

Исследования в области обратимых мартенситных фазовых превращений были начаты после сообщения в 1949 г. Курдюмовым Г.В. и Хандросом Л.Г. об открытии явления термоупругого равновесия при фазовых превращениях мартенситного типа [1]. К настоящему времени наука о функциональных свойствах материалов обладающих памятью формы получила значительное развитие как в области экспериментальных, так и теоретических знаний. Установлены и изучены сотни систем и некоторые чистые материалы, которые способны полностью восстанавливать форму. Создан новый класс материалов с уникальными физико-механическими свойствами, позволяющими решать всевозможные технологические задачи на основе совершенно новых физических принципов. Особенно интенсивно научные исследования в области термоупругих мартенситных превращений ведутся последние 15...20 лет и наибольший интерес представляют сплавы на основе никелида титана (Ti-Ni), имеющие высокие прочностные и пластические характеристики.

В отличие от других материалов, нитинол весьма чувствителен к своей «предыстории», т.е. условиям получения и предварительной обработки [2]. Хотя в настоящее время свойства TiNi после различного рода термических, механических и других специальных обработках достаточно исследованы, вопросами влияния на этот материал ультразвуковых колебаний (УЗК), которые обуславливают при определённых условиях не только нагрев материала, но и возникновение в нём значительных знакопеременных механических напряжений, начали заниматься лишь на протяжении последнего десятилетия. Одним из нерешённых, является вопрос о возможности влияния энергии ультразвуковых колебаний на эффекты мартенситной неупругости, параметры формовосстановления материалов, претерпевающих термоупругие превращения.

Эффект памяти формы в никелиде титана связан с перестройкой кристаллической структуры при мартенситном превращении. Высокотемпературная фаза (аустенит) с кубической ОЦК решеткой упорядоченной по типу CsCl при охлаждении через интервал температур $M_n + M_k$ переходит в низкотемпературную орторомбическую фазу (мартенсит) с моноклинными искажениями B19'. При повышении температуры в интервале $A_n \div A_k$ реализуется обратное превращение и происходит перестройка кристаллической решетки B19' \rightarrow B2. В никелиде титана фазовое превращение может также проходить и по схеме: B2 \rightarrow R \rightarrow B19' [3] через промежуточную ромбоэдрическую R-фазу. Схема мартенситной реакции зависит от атомного состава сплава, условий его получения, термообработки [2].

После предварительной ультразвуковой обработки определяли важнейшее функциональное свойство сплавов с памятью – обратимую деформацию при обратном мартенситном переходе. Величину формовосстановления определяли после предварительной деформации изгибом на проволочных образцах состава Ti-50,4ат.%Ni диаметром 0,61 мм с характеристическими температурами фазового перехода $A_n = 321$ К, $A_k = 333$ К, $M_n = 303$ К, $M_k = 294$ К, которые подвергали ультразвуковой обработке (УЗО) с амплитудой механических напряжений до 100 МПа и частотой 22 кГц в течение 15 с при температуре 290 К.

Установлено, что ультразвуковое воздействие амплитудой механических напряжений до 50 МПа вызывает увеличение максимальной полностью обратимой деформации [4] по сравнению с неподвергнутыми воздействию УЗК образцами с 3 до 5 % (рис. 1). Повышение максимальной полностью обратимой деформации после предварительной ультразвуковой обработки обусловлено возрастанием обычного (дислокационного) предела текучести, что ведет к деформированию материала по каналам фазовой пластичности.

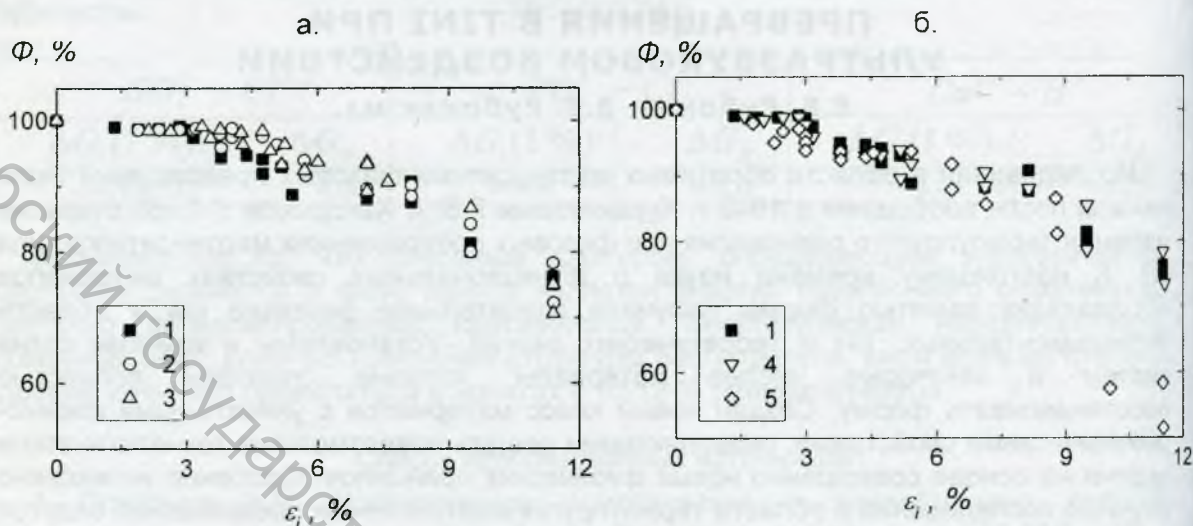


Рисунок 1 - Зависимость степени восстановления формы (Φ) от предварительной деформации (ϵ_i) в сплаве Ti-50,4ат.%Ni. 1 – без УЗО, 2–5 – после УЗО с амплитудой механических напряжений: 2 – 25 МПа, 3 – 50 МПа, 4 – 75 МПа, 5 – 100 МПа

С увеличением степени деформации до 9÷12% величина формовосстановления уменьшается как для образцов, подвергнутых ультразвуковой обработке, так и не подвергнутых. Причем увеличение амплитуды переменных механических напряжений до 100 МПа приводит к снижению величины формовосстановления. Это указывает на достаточно сложный характер ультразвукового влияния на термоупругие характеристики сплавов с эффектом памяти формы.

Так как проявление эффекта памяти формы обусловлено воздействием температуры и (или) механического напряжения [3], а при ультразвуковом воздействии они могут действовать одновременно, то было предположено, что ультразвуковые колебания могут инициировать процесс восстановления формы в сплавах с памятью. Так как ультразвуковые колебания способны в значительной мере повышать температуру материала [5], то их воздействие с неизбежностью должно инициировать и протекание мартенситных реакций за счет диссипации акустической энергии [6], т.е. ультразвук в этом случае является одним из способов нагрева. Но в связи с существенными отличиями ультразвукового от других видов нагрева должна меняться и кинетика мартенситных превращений.

Результаты исследований по инициированию эффекта памяти формы в проволочных образцах никелида титана после деформации изгибом показали, что в образцах, испытавших неупругую деформацию в мартенситном состоянии, возбуждение ультразвуковых колебаний вызывает формовосстановление [7]. Так, для образцов сплава Ti-50,4 ат.%Ni процессе ультразвукового воздействия амплитудой 10 мкм и частотой 22 кГц величина максимальной полностью обратимой деформации составила 3 %.

Исследования процесса формовосстановления образцов никелида титана в ультразвуковом поле при фиксированном статическом напряжении проводили на разработанной экспериментальной установке, позволяющей осуществлять автоматический контроль изменения длины и температуры образца с последующей обработкой данных и выводом на ПЭВМ с учетом временной зависимости [8].

Образец крепили в захватах установки, один из которых служил волноводом, а через второй к образцу прикладывалась статическая нагрузка.

Порядок проведения испытаний был следующим: к проволочному образцу Ti-50,4 ат.% Ni с характеристическими температурами: $A_n = 323$ К, $A_k = 349$ К, $M_n = 303$ К, $M_k = 294$ К длиной 120 мм и диаметром 0,39 мм, находящемуся в аустенитном состоянии прикладывали фиксированную нагрузку и охлаждали, инициируя тем самым эффект пластичности превращения. При реализации пластичности превращения в некоторых образцах импульсно возбуждали механические колебания ультразвуковой частоты. Систему поддерживали в резонансе на частоте, соответствующей собственной частоте магнитострикционного преобразователя и волновода 22,2 кГц. Амплитуда колебаний торца волновода составляла 5 мкм. Охлажденный образец разгружали и затем переводили нагревом в аустенитное состояние, также импульсно возбуждая УЗК.

Нужно отметить, что за счёт увеличения амплитуды УЗК для тонких образцов диаметром менее 3 мм удавалось реализовать ЭПФ практически мгновенно. Однако при больших амплитудах или более длительном воздействии УЗК на материал, находящийся в аустенитном состоянии, возможно его усталостное разрушение. Это обусловлено возникновением больших значений знакопеременных механических напряжений в узловых точках образца за счет изгибных колебаний.

На рис. 2 представлена типичная температурная зависимость деформации, полученная при реализации эффекта пластичности превращения под напряжением 30 МПа на этапе охлаждения и эффекта памяти формы при нагреве без нагрузки через температурный интервал мартенситных превращений в сплаве TiNi.

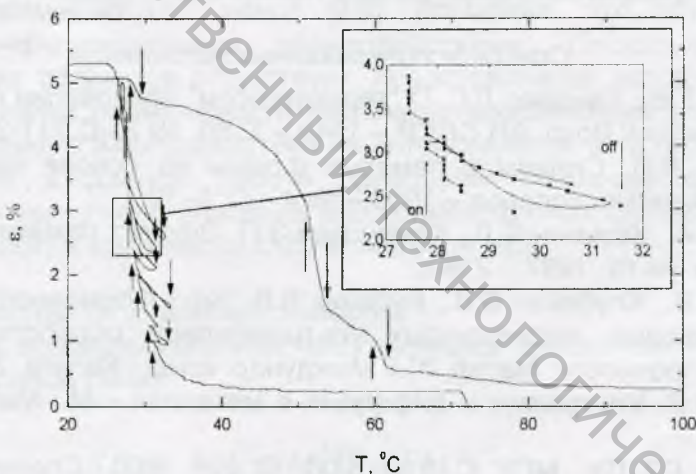


Рисунок 2 - Температурные зависимости деформации в ходе реализации в сплаве TiNi. Стрелками обозначены моменты включения (\uparrow) и выключения (\downarrow) УЗК

Воздействие на TiNi ультразвуковых колебаний на этапе охлаждения через интервал прямого мартенситного превращения вызывает во всем интервале практически мгновенный возврат накопленной деформации, сопровождающийся повышением температуры образца. Этот возврат тем больше, чем ближе мы находимся к M_k в момент ультразвукового воздействия. Дальнейшее охлаждение образца без воздействия ультразвука приводит к возобновлению накопления деформации в полном соответствии с теорией образования малых петель термомеханического гистерезиса в полном интервале мартенситного превращения.

Возврат деформации при ультразвуковом воздействии на этапе нагрева TiNi через интервал обратного мартенситного превращения также может быть объяснен ультразвуковым разогревом образца за счет диссипации энергии УЗК и, как следствие, образованием устойчивого аустенита. После отключения ультразвука наблюдается дальнейшая реализация эффекта памяти формы в соответствии с температурной кинетикой обратного мартенситного превращения.

Кинетика процесса ультразвукового инициирования памяти формы свидетельствует, что воздействие ультразвуковых колебаний при прямом и обратном мартенситных превращениях вызывает возврат накопленной деформации. Поскольку процесс сопровождается ультразвуковым разогревом, то на этапе прямого превращения наблюдаются малые петли термомеханического гистерезиса, что особенно ценно для исполнительных устройств из СПФ. Возврат деформации на этапе нагрева связан с ультразвуковым разогревом образца за счет диссипации колебаний и, как следствие, образованием устойчивого аустенита [9].

Заключение

Установлено, что предварительное ультразвуковое воздействие влияет на параметры формовосстановления TiNi сплавов, обладающих памятью формы. С использованием метода испытания на изгиб показано, что ультразвуковое воздействие амплитудой механических напряжений до 50 МПа вызывает увеличение максимальной полностью обратимой деформации по сравнению с исходными образцами с 3 до 5 %.

Обнаружен эффект инициирования памяти формы под воздействием ультразвуковых колебаний в сплавах с термоупругими мартенситными превращениями. В образцах, подвергнутых предварительной неупругой деформации, возбуждение ультразвуковых колебаний вызывает формовосстановление. В частности, для сплава Ti-50,4 ат.% Ni, в процессе ультразвукового воздействия амплитудой 10 мкм и частотой 22 кГц при температуре 20°C величина максимальной полностью обратимой деформации составляет 3 %. Воздействие ультразвуковых колебаний при прямом мартенситном превращении обуславливает образование малых петель термомеханического гистерезиса.

Список использованных источников

1. Курдюмов Г.В., Хандрос Л.Г. О "термоупругом" равновесии при мартенситных превращениях // Докл. АН СССР. – 1949. – Т. 66, № 2. – С. 211-214.
2. Фаткулина Л.П. Сплавы с памятью формы на основе никелида титана // Технология легких сплавов. – 1990. – № 4. – С. 9–12.
3. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. – 216 с.
4. Рубаник В.В., Клубович В.В., Рубаник В.В. (мл.) Формовосстановление TiNi с памятью формы подвергнутых ультразвуковой обработке // Актуальные проблемы прочности: Матер. XLII Междунар. конф. – Калуга, 2004. – С. 136.
5. Кулемин А.В. Ультразвук и диффузия в металлах. – М.: Металлургия, 1978. – 200 с.
6. Пат. 2413 С2 ВУ, МПК С 21D 8/00, С 22F 3/00. Способ инициирования эффекта памяти формы / В.В.Клубович, В.В.Рубаник, В.Г.Дородейко и др. – № 960348; Заявл. 05.07.1996; Опубл. 30.09.1998 // Афиційны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства РБ. – 1998. – № 3 (18). – С. 176-177.
7. Rubanik V.V., Klubovich V.V., Rubanik V.V., Jr. The ultrasounds initiation of SME // J. de Phys. - 2003. - Vol. 112, № IV. - P. 249-251.
8. Бегунов М.А., Рубаник В.В. (мл.), Мясоедов А.В. Автоматизированная система регистрации контроля параметров формовосстановления сплавов с памятью формы // XXXV науч.-техн. конф. препод. и студ.: Тез. докл. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2002. – С. 26-27.
9. Артемьев В.В., Клубович В.В., Рубаник В.В. Ультразвук и обработка материалов. – Мн.: Экоперспектива, 2003. – 335 с.

SUMMARY

The object of research was TiNi alloys possessing the shape memory effect, with their composition being close to the equiatomic one. The subject of research was behavior of these materials in the conditions of influence of ultrasonic vibrations of low frequency. The

aim of the work was to determine major laws of deformation behavior of TiNi with the shape memory, during ultrasonic influence.

For the first time, one discovered the initiation of the shape memory effect in TiNi alloys only due to the energy of ultrasonic vibrations. It is shown new methods of initiating the shape memory effect in shape memory alloys.

УДК 537.228.5

ОПИСАНИЕ СИЛ ОСЦИЛЛЯТОРОВ МЕЖМУЛЬТИПЛЕТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДИПОЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ УРАНА

Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко, Л.А. Фомичева

Введение

С целью поиска новых лазерных материалов были синтезированы кристаллы, активированные ионами U^{4+} и Am^{3+} [1,2]. У кристаллов с примесью $U^{4+}(5f^2)$ более широкие спектральные линии и интенсивности межмультиплетных переходов в 100 раз больше, чем у иона $Pr^{3+}(4f^2)$.

В теоретическом плане кристаллы с примесью ионов U^{4+} интересны тем, что применение приближения Джадда-Офельта [3,4] для описания интенсивностей межмультиплетных электрических дипольных переходов менее успешно, чем к материалам с примесью Ln^{3+} ионов [2,5]. Возможно, это обусловлено более сильным межконфигурационным взаимодействием. Поскольку всестороннее исследование этих эффектов отсутствует, представляется актуальным выполнить сравнительный анализ применимости различных приближений для учета влияния межконфигурационного взаимодействия на интенсивности $5f-5f$ переходов иона U^{4+} . В связи с этим в данной работе приведены основные формулы теории интенсивностей и выполнено описание экспериментальных сил осцилляторов иона U^{4+} в кристалле $ThBr_4$ и комплексов UBr_4 в растворе HBr .

Основные формулы теории интенсивностей

Интенсивность межмультиплетных электрических дипольных переходов можно характеризовать силой линии

$$S_{JJ'} = \sum_{MM'} \left| \langle \gamma JM | \vec{D} | \gamma' J' M' \rangle \right|^2, \quad (1)$$

где \vec{D} – электрический дипольный момент. Сила линии не зависит от направления перехода и измеряется в 10^{-20} см². Иногда интенсивность переходов характеризуют безразмерной величиной – силой осциллятора

$$f_{JJ'} = \frac{8\pi^2 mc\sigma}{3(2J+1)he^2} \frac{(n^2+2)^2}{9n} S_{JJ'}, \quad (2)$$

где n – показатель преломления среды, σ – энергия перехода в см⁻¹, $2J+1$ – степень вырождения исходного мультиплета.

Электрические дипольные переходы между состояниями конфигурации $5f^N$ запрещены по четности. Однако для ионов в кристалле этот запрет частично снимается из-за примеси состояний возбужденных конфигураций. В зависимости от приближения, в котором учитывается влияние возбужденных конфигураций, получаются разные выражения для силы линии межмультиплетного перехода.