

## ФОРМИРОВАНИЕ ОБРАТИМОГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ В БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ СПЛАВАХ TiNiCu С ПОМОЩЬЮ ВНЕШНЕГО ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Шеляков А.В., Ситников Н.Н., Бородако К.А., Шейфер Д.А., Менушенков А.П.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

*alex-shel@mail.ru*

В последнее время показана эффективность использования сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) для создания микромеханических устройств [1]. При этом в практических применениях сплавов с ЭПФ обычно требуется обратимое изменение формы в цикле нагрев-охлаждение. Поскольку свойство обратимого деформирования не является внутренне присущим сплавам с ЭПФ, для его достижения требуется, например, комбинация однократного ЭПФ с упругой внешней силой, которая возвращает элемент с ЭПФ к его первоначальной форме при охлаждении, или специальная термомеханическая тренировка для создания в материале текстурированных полей внутренних напряжений, что существенно затрудняет процесс создания микроустройств. Поэтому актуальна разработка новых структурно-композитных слоистых материалов, обладающих свойством обратимого ЭПФ. Модифицирующая обработка материалов с ЭПФ экстремальными воздействиями (ионно-плазменная обработка, лазерное воздействие) обеспечивает формирование в них уникальных структурно-фазовых состояний. При обработке концентрированными потоками энергии одновременно осуществляются радиационное, тепловое и ударно-механическое воздействия. Одним из таких способов воздействия, позволяющим существенно изменять структурные свойства материалов в локальной области, является периодический разряд в потоке жидкости (ПРПЖ) [2, 3]. Данная работа посвящена исследованию влияния ПРПЖ на свойства быстрозакаленного сплава TiNiCu с целью формирования в нем обратимого ЭПФ.

В качестве объекта исследования был выбран сплав квазибинарной системы TiNi-TiCu с содержанием меди 25 ат.%, полученный быстрой закалкой из жидкого состояния при скорости охлаждения расплава около  $10^6$  К/с в виде аморфных лент толщиной около 40 мкм и шириной 1-2 мм.

Для создания обратимого ЭПФ в лентах из сплава TiNiCu была предложена следующая методика: образцу придается память формы на изогнутое состояние, затем образец распрямляется, и зона изгиба подвергается воздействию ПРПЖ, которое может приводить к аморфизации поверхностного слоя ленты. Созданная таким методом

аморфно-кристаллическая композитная лента способна проявлять самопроизвольный обратимый ЭПФ: при нагреве выше температуры  $A_n$  начала обратного мартенситного превращения (МП) лента изгибается за счет проявления ЭПФ в кристаллическом слое ленты, который вспоминает изогнутую форму, растягивая аморфный слой ленты; при охлаждении в процессе прямого МП аморфный слой играет роль упругой силы и разгибает образец, деформируя кристаллический слой.

Процесс обработки материала с помощью ПРПЖ заключается в том, что при подаче напряжения на зазор между образцом и проводящим полым наконечником, из которого в зазор подается жидкость, возникает точечный разряд по поверхности струи. В условиях быстротекущего электрического разряда в этом зазоре возникают условия с высокой напряженностью электрических и магнитных полей, а также мощного ударно-волнового воздействия. При этом поток жидкости обрывается за счет воздействия ударных волн, возникающих при разряде. В данном методе применение струи жидкости позволяет одновременно реализовать функции токоподводящего электрода и коммутатора тока, а также способствует снижению температуры поверхности электрода-инструмента.

При обработке ПРПЖ в эксперименте варьировались следующие параметры: расстояние от поверхности образца до наконечника в пределах 3-5 мм, время воздействия от 1 до 10 секунд, разность потенциалов в диапазоне от 3 до 7 кВ. При этом между образцом и наконечником возникает периодический разряд длительностью несколько десятков наносекунд с частотой повторения 50 - 300 Гц, который «точечно» (диаметр кратера 5 - 20 мкм) воздействует на обрабатываемую поверхность.

Микроструктура поверхности образцов изучалась с помощью инвертированного металлографического микроскопа отраженного света Carl Zeiss Axiovert 40 MAT. Оптическая микроскопия показала, что на поверхности кристаллических лент в области обработки кратеры располагаются с перекрытием, образуя сплошное пятно.

Микротвердость на поверхности ленты измерялась по Виккерсу с усилием 0,05 Н с использованием микротвердомера Micromet 5114. Установлено, что обработка ПРПЖ ведет к заметному упрочнению материала (микротвердость увеличивается на 30-40%).

Рентгеноструктурный фазовый анализ проводился методом скользящего рентгеновского пучка на дифрактометре D8 Discover в  $Cu-K_{\alpha 1}$  излучении при комнатной температуре (ниже температуры  $M_k$  прямого МП). Исследования показали, что воздействие ПРПЖ приводит к снижению интенсивности пиков отражения мартенситной фазы B19, что свидетельствует об уменьшении доли кристаллической

фазы, по-видимому, за счет частичной аморфизации (разрушения кристаллической структуры) в поверхностном слое.

Для изучения влияния воздействия ПРПЖ на свойства обратимого ЭПФ в сплаве TiNiCu образцы аморфных лент длиной 35 мм были кристаллизованы в печи с использованием специальной оправки при температуре 500°C в течение 300 с для придания им памяти формы с радиусом изгиба 1,5 мм. Затем в соответствии с описанной выше моделью образцы распрямлялись, закреплялись в прямолинейной форме и подвергались обработке ПРПЖ в зоне изгиба. Исследование термодформационных характеристик облученных лент проводилось посредством термоциклирования образцов в интервале МП. С этой целью была разработана

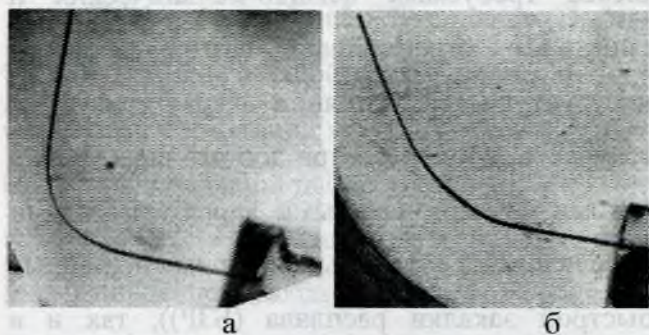


Рисунок 1. Форма образца при различных температурах: а)  $T > A_k$ , б)  $T < M_k$

специальная установка с видеофиксацией формоизменения при варьировании температуры. При нагреве выше  $A_H$  в кристаллическом слое происходит обратное МП, в результате чего образец начинает вспоминать заданную форму, принимая при температуре выше  $A_k$  конечную форму (рис. 1а). При охлаждении до комнатной температуры модифицированный (аморфный) слой играет роль возвращающего упругого элемента и заставляет ленту разгибаться до состояния, показанного на рисунке 1б.

Таким образом, в обработанных методом ПРПЖ лентах из сплава TiNiCu реализуется ярко выраженный обратимый ЭПФ. Полученные аморфно-кристаллические композитные образцы могут совершать обратимые угловые перемещения в пределах 45 градусов, что может быть использовано для создания микромеханических устройств различного назначения.

1. Bellouard Y., Materials Science and Engineering A 481–482, 2008, p. 582–589.
2. Богданович Б.Ю., Волков Н.В., Косточко Ю.П., Лень Н.А., Нестерович А.В., Старостин А.И., Инженерная физика, М.: МИФИ, №1, 2000, с. 19-23.
3. Gavze A.L., Matevos'yan A.P., Nesterovich A.V., Bogdanovich B.Yu., Metal Science and Heat Treatment, №9, 2001, p. 34-38.