

МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ НА ОСНОВЕ БЫСТРОЗАКАЛЕННОЙ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛЕНТЫ

Шеляков А.В.¹, Ситников Н.Н.^{1,2}, Бородако К.А.^{1,3}, Коледов В.В.³

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

²ГНЦ-ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», Москва, Россия

³Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

e-mail: alex-shel@mail.ru

Последние достижения в области микроэлектромеханических систем (MEMS) повышают спрос на точные и надежные микроинструменты для манипулирования микрообъектами. В MEMS используются различные типы микроактюаторов для применения в биомедицине, робототехнике, автомобильных и аэрокосмических технологиях, потребительских товарах и телекоммуникационных системах [1]. Использование материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) обеспечивает различные преимущества микроактюаторов, такие как высокое отношение мощности к весу, большие деформации и развиваемые усилия, устойчивость к коррозии, биосовместимость, надежность, бесшумное приведение в действие [2, 3]. Это позволяет создавать на основе сплавов с ЭПФ самые миниатюрные исполнительные устройства: микропинцеты, микропереключатели, микроклапаны, микронасосы, микродатчики [4-6]. Недавно был продемонстрирован перспективный метод использования структурно композиционных материалов с обратимым ЭПФ в микросистемах [7-11]. Настоящая работа посвящена созданию микропинцета на основе аморфно-кристаллической ленты.

В качестве материала для создания микропинцета был выбран быстрозакаленный сплав квазибинарной системы TiNi-TiCu с 25 ат. % Cu, обладающий как высокой склонностью к аморфизации, так и высокими характеристиками ЭПФ после кристаллизации из аморфного состояния [12-14]. Сплав получали закалкой из жидкого состояния (методы спиннингования расплава или планарного литья) [14] в виде ленты толщиной около 40 мкм и шириной около 2 мм при скорости охлаждения расплава около $4 \cdot 10^5$ К/с. Из-за разной скорости охлаждения расплава на контактной (обращенной к закалочному диску) и неконтактной поверхностях ленты при таких условиях закалки формируется аморфно-кристаллическая лента с резкой границей, разделяющей аморфное и кристаллическое состояния на слои, т.е. лента представляет собой слоистый структурный композит (рис. 1). Средняя толщина кристаллического слоя $d_{кр}$ в исходном состоянии после закалки была около 10 мкм. Соотношение $d_{кр}$ и $d_{ам}$ (толщины аморфного слоя) варьировали методом электрохимической полировки с резистивной защитой либо аморфного слоя, либо кристаллического слоя композита.

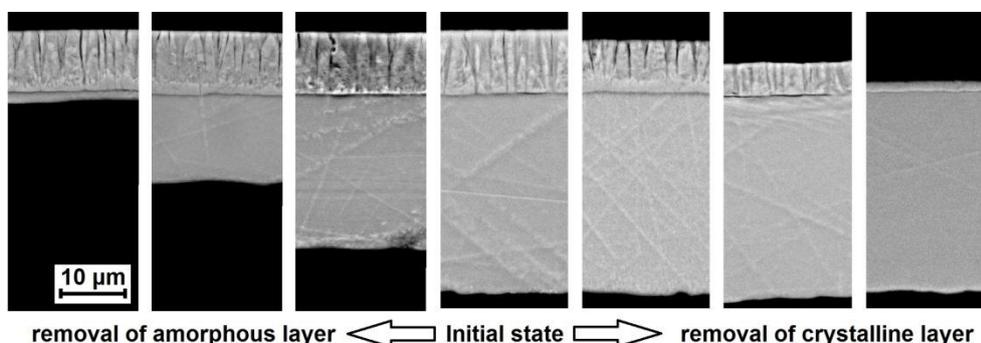


Рисунок 1 - СЭМ-изображение поперечного сечения аморфно-кристаллических композитов с разным соотношением толщин аморфного и кристаллического слоев после электрохимической полировки

Особенностью изготовленных аморфно-кристаллических композитов является то, что они проявляют обратимый ЭПФ (ОЭПФ) изгибом без дополнительной

термомеханической обработки. Этот эффект заключается в следующем: в исходном состоянии при комнатной температуре (ниже M_k – температуры конца прямого мартенситного превращения (МП) в кристаллическом слое) образец имеет прямолинейную форму, а при нагреве выше температуры выше A_k принимает форму, близкую к кольцу радиусом R (A_k - температура конца обратного МП в кристаллическом слое). В дальнейшем при варьировании температуры в интервале МП данный эффект циклично повторяется. На рис. 2 показаны значения R и соответствующей изгибной деформации $\xi = D^*(2R)^{-1}$, где $D = d_{кр} + d_{ам}$, для образцов с разным соотношением $d_{кр}$ и $d_{ам}$.

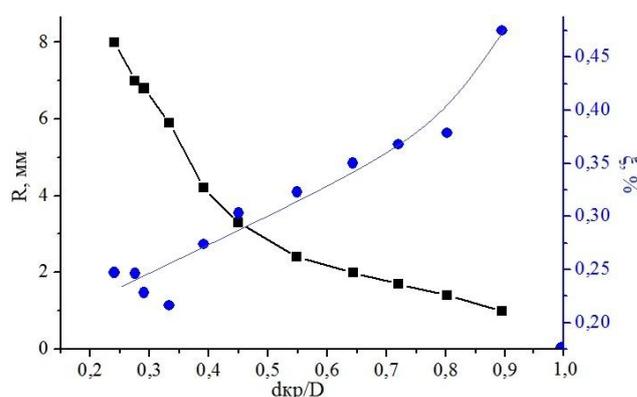
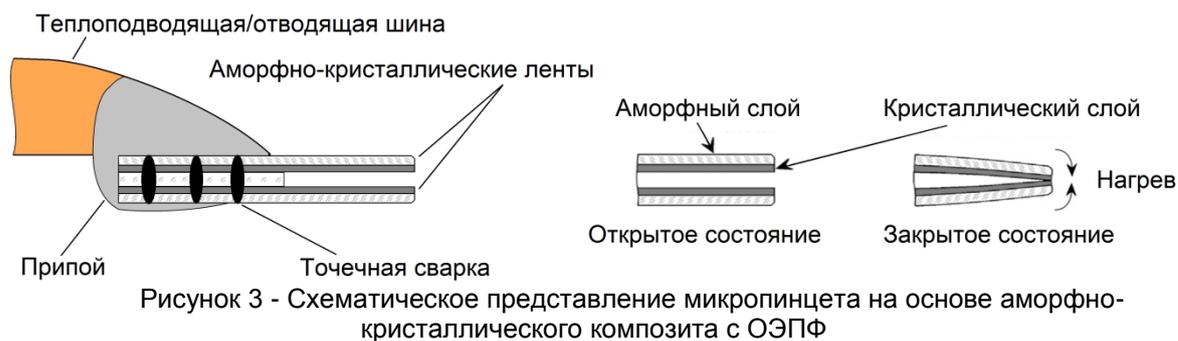


Рисунок 2 - Минимальный радиус изгиба и максимальная изгибная деформация композитной ленты в зависимости от соотношения толщины кристаллического слоя и общей толщины ленты

Применительно к микромеханическим устройствам на основе сплавов с ЭПФ приобретают важнейшее значение временные и энергетические характеристики ЭПФ, в частности, время возврата деформации (время срабатывания элементов с ЭПФ) и необходимая для этого энергия. Для определения временных интервалов восстановления формы аморфно-кристаллической композитной ленты при реализации ЭОПФ использовался оптический затвор с термоприводом, изготовленным из двух отрезков аморфно-кристаллической ленты, соединенных между собой шторкой из металлической (никелевой) фольги с помощью сварки. На термопривод подавался управляющий сигнал путем пропускания одиночного электрического импульса варьированной длительности с энергией, достаточной для нагрева композитной ленты выше температуры A_k . Используемая методика позволяла оценить время открытия оптического затвора Δt , время нахождения в открытом состоянии Δt_1 и время для возвращения в исходное (закрытое) состояние Δt_2 . Наименьшее достигнутое значение Δt составляло 14 мс при длительности управляющего импульса 1,5 мс, при этом минимальное значение Δt_2 составляло 23 мс. Усилия, генерируемые аморфно-кристаллической лентой при нагреве выше A_k , достигали 0,8 мН.

Одним из самых важных свойств, учитываемых при разработке устройств многократного действия на основе материала с ОЭПФ, является циклическая стойкость материала. Проведенные исследования (около 50000 циклов) не выявили заметного уменьшения величины обратимой деформации.

Аморфно-кристаллическая лента из сплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ была использована для создания микромеханического инструмента (микропинцета). С этой целью из композитной ленты формировались два функциональных элемента шириной 0,4 мм, зауженными с одной стороны до приблизительно 50 мкм. Затем с помощью микросварки эти элементы соединялись с возможностью изгибаться навстречу друг другу при нагреве, образуя зажимные части (губки) микропинцета (рис. 3). Длина губок и величина зазора микропинцета могут регулироваться в диапазоне от 1,5 до 2,5 мм и от 10 до 500 мкм, соответственно, в зависимости от размера захватываемых микрообъектов. Для управления микропинцетом был выбран серийный тонкопленочный нагреватель M1020 Pt1000 производства Heraeus Sensor Technology.



Для демонстрации процесса манипулирования микрообъектами микропинцет крепился на механический 3D-манипулятор, позволяющий перемещать микропинцет с точностью до 2 мкм. В качестве объектов манипулирования были использованы филаменты графитовой нити диаметром от 5 до 25 мкм. Видеосъемка процесса производилась с помощью оптического микроскопа (рис. 4). С помощью разработанного микропинцета продемонстрирован полный технологический процесс манипулирования микрообъектом: захват – удержание – перенос – освобождение.



Рисунок 4 - Процесс манипулирования филаментом графитовой нити

Список литературы

- [1] S. Wilson et al. *Mater. Sci. Eng. R* 56 (2007) 1-129.
- [2] K. Otsuka, X. Ren, *Prog. Mater. Sci.* 50 (2005) 511-678.
- [3] J.M. Jani, M. Leary, A. Subic, M.A. Gibson, *Mater. Des.* 56 (2014) 1078-1113. Tomozawa M. and Miyazaki S., *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 17, pp. 1049-1057, 2006.
- [4] B. Kim, M.G. Lee, Y.P. Lee, Y. Kim, and G. Lee, *Sens. Actuators A*, vol. 125, pp. 429-435, 2006.
- [5] A. Nespoli, S. Besseghini, S. Pittaccio, E. Villa, and S. Viscuso, *Sens. Actuators A*, vol. 56, pp. 149-160, 2010.
- [6] M. Kohl, *Shape memory microactuators (microtechnology and MEMS)*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [7] P. Lega, V. Koledov, A. Orlov et al. *Advanced Engineering Materials.*, vol. 19(8), 1700154 (10 pp.), 2017.
- [8] Zakharov D., et al. // *Physics Proc.* 2010. V. 10. P. 58–64.
- [9] Fu Q., Luo J.K., Flewitt A.J., et al. // *Smart Mater. Struct.* 2007. V. 16. P. 2651-2657.
- [10] Shelyakov A.V., Sitnikov N.N., Menushenkov A.P., et al. // *J. Alloys Compd.* 2013. V. 577. P. S251–254.
- [11] Freed Y., Aboudi J. // *Int. J. Solids Struct.* 2009. V. 46. P. 1634-1647.
- [12] Chang S.H., Wu S.K., Kimura H. // *Intermetallics.* 2007. V. 15. P. 233.
- [13] Park S., Oh J., Kim Y., Nam T. // *Mater. Sci. Eng.* 2006. V. A 438–440. P. 695.
- [14] Shelyakov A.V., Matveeva N.M., Larin S.G., in: F. Trochu, V. Brailovski (Eds.), *Shape Memory Alloys: Fundamentals, Modeling and Industrial Applications*, Canadian Inst. of Mining, Metallurgy and Petroleum. 1999. P. 295 -303.