

3. Водопьянов В. И. Курс сопротивления материалов с примерами и задачами: учеб. пособие/ В.И.Водопьянов, А.Н.Савкин, О.В.Кондратьев; ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – 136 с.
4. Анурьев В. И. Справочник конструктора–машиностроителя: в 3 т. / В.И. Анурьев.–5-е изд., перераб. и доп.–М.: Машиностроение, 1980. – Т.1. – 730 с.

ДВИГАТЕЛИ И ПРИВОДЫ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ В МОНОКРИСТАЛЛАХ Cu-Al-Ni

Пульнев С.А.¹, Прядко А.И.^{1,2}, Николаев В.И.¹

¹*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*

²*ЦНИИ Робототехники и Технической Кибернетики, г. Санкт-Петербург, Россия*
pulnev@mail.ioffe.ru

Монокристаллы сплавов на основе Cu–Al–Ni обладают ярко выраженными эффектами памяти формы и сверхупругости, демонстрируя большие обратимые деформации в широком диапазоне температур [1-4]. Так, например, максимальная обратимая деформация при эффекте сверхупругости реализуется для кристаллографической ориентации $\langle 001 \rangle$ и достигает 10% для превращения $\beta_1 \rightarrow \beta'_1$ и 16% в случае двух последовательных мартенситных превращений $\beta_1 \rightarrow \beta'_1 \rightarrow \alpha'_1$ [2,5].

Для использования данного материала в качестве силовых элементов циклических двигателей необходимо знание ряда его специальных свойств, таких как:

- обратимая деформация эффекта памяти формы $\varepsilon_{\text{эф}}$;
- генерируемые напряжения $\sigma_{\text{ген}}$ при восстановлении формы в процессе нагревания;
- напряжение $\sigma_{\text{деф}}$, необходимое для достижения максимальной деформации при охлаждении под нагрузкой;
- зависимости характеристических температур мартенситных превращений от приложенного напряжения;
- предельная температура нагрева $T_{\text{пред}}$, до которой материал сохраняет работоспособность без потери функциональных свойств.

Знание этих параметров необходимо для расчета характеристик создаваемых циклических двигателей.

Для определения вышеуказанных свойств материала были проведены исследования силовых элементов в условиях, имитирующих работу циклического двигателя, в котором силовые элементы функционируют в режиме одноосного растяжения. Исследования проводились на монокристаллах сплава Cu–13.5%Al–5.0%Ni, выращенных вдоль направления $\langle 100 \rangle$. Образцы имели по данным дифференциального сканирующего калориметрического анализа следующие характеристические температуры мартенситных превращений: $M_n = 52^\circ\text{C}$, $M_s = 39^\circ\text{C}$, $A_n = 49^\circ\text{C}$, $A_s = 60^\circ\text{C}$.

На основании результатов проведенных экспериментальных исследований для расчетов характеристик двигателей на монокристаллах Cu–Al–Ni установлены следующие значения вышеприведенных параметров:

- максимальная обратимая деформация памяти формы $\varepsilon_{\text{эф}} = 8\%$;
- напряжение, необходимое для деформирования охлаждаемого силового элемента до максимальной деформации $\sigma_{\text{деф}} = 60$ МПа;
- максимальная температура нагрева силового элемента $T = 200\text{--}220^\circ\text{C}$;
- максимальные генерируемые напряжения при восстановлении формы силового элемента при нагреве $\sigma_{\text{ген}} = 180\text{--}200$ МПа.

Существенной особенностью монокристаллов Cu–Al–Ni является полное восстановление деформации памяти формы при нагреве. В изученном диапазоне температур до 220°C и напряжений до 200 МПа исследуемый материал демонстрирует

полное отсутствие остаточных деформаций и проявляет «совершенный эффект памяти формы».

Рассмотрены принципы построения двигателей и приводов, в которых материалы с эффектом памяти формы выполняют роль силовых элементов, а цикличность работы обеспечивается за счет обратимого мартенситного превращения. Для создания циклического двигателя, который преобразует подводимую энергию в механическую работу необходимо ввести в состав двигателя два силовых элемента, работающих друг против друга по принципу мышц–антагонистов “сгибатель–разгибатель”. Требуется также организовать соответствующие временные индивидуальные тепловые режимы нагрев – охлаждение для каждого силового элемента, которые должны быть механически связаны между собой так, чтобы при срабатывании одного из них, деформировался другой с приведением его тем самым в состояние готовности к следующему срабатыванию. Таким образом, организуется циклическая работа двигателя [6,7]. Необходимым условием, определяющим принципиальную возможность создания двигателя, работающего в циклическом режиме, является отсутствие в материале силовых элементов необратимых остаточных пластических деформаций при их работе в термоцикле под нагрузкой. В противном случае в каждом цикле работы двигателя будет происходить накопление пластических деформаций, что приведет к необратимому удлинению силовых элементов с последовательным сокращением амплитуды их движения в процессе работы двигателя вплоть до полной потери его работоспособности. Именно этим свойством, как отмечено выше, и обладают монокристаллы Cu–Al–Ni.

Разработана математическая модель, которая описывает поведение линейного двигателя с изгибным силовым элементом с эффектом памяти формы и позволяет рассчитать развиваемую силу как функцию перемещения штока, а также выполняемую двигателем полезную работу и его эффективность в зависимости от свойств материала. Таким образом, данная модель может использоваться при создании прототипов компактных двигателей на основе монокристаллов Cu – Al – Ni с эффектом памяти формы.

В качестве примера применения двигателей на основе монокристаллических элементов с эффектом памяти формы представлен мини-робот, в котором используются линейный и вращательный приводы с изгибными силовыми элементами. Вращательный привод поднимает манипулятор, а линейный привод обеспечивает работу захватного устройства. Благодаря высокому соотношению совершаемой работы к собственному весу приводов на основе материалов с эффектом памяти формы мини робот способен манипулировать предметами, вес которых в несколько раз больше его собственного веса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 16-19-00129).

Список литературы:

1. К. Ооцука, К. Симидзу, Ю. Судзуки и др. Сплавы с эффектом памяти формы. М.: Металлургия, 1990. – 223 с.
2. H. Horikawa, S. Ichinose, K. Moorii, S. Miyazaki, K. Otsuka. Orientation dependence of $\beta \rightarrow \beta'$ stress-induced martensitic transformation in a Cu-Al-Ni alloy // Metallurgical Transactions A. Vol. 19A, April 1988, pp. 915-923.
3. M.A. Qidwai, A. Bhattacharyya, I. Vahhi, S. Pulnev. Initial investigation in actuator design using high-temperature shape memory alloy // Smart Structures and Materials 2003: Active Materials: Behavior and Mechanics Proc. SPIE, v.5053, 1, pp. 81-91, 2003.
4. G.K. Kannarpady, A. Bhattacharyya, S. Pulnev, I. Vahhi. The effect of isothermal mechanical cycling on Cu–13.3Al–4.0Ni (wt.%) shape memory alloy single crystal wires // Journal of alloys and compounds 425 (1), 2006, pp. 112-122.
5. K. Otsuka, H. Sakamoto, K. Shimizu. Successive Stress-Induced Martensitic Transformations and Associated Transformation Pseudoelasticity in CuAlNi Alloys Acta Metall., 27 (1979), 585.

6. С.А. Пульнев, А.И. Прядко, С.Г. Ястребов, В.И. Николаев. Эффект памяти форм в монокристаллах Cu – Al – Ni, линейные и вращательные двигатели на их основе // ЖТФ, Т. 88, №6, 2018, с. 843-849.
7. J. Jani, M. Leary, A. Subic. Designing shape memory alloy linear actuators: A review // Journal of Intelligent Material Systems and Structures Vol. 28(13), 2017, pp. 1699–1718.

СТРУКТУРА И ТРАНСПОРТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

**Табачкова Н. Ю., Милович Ф. О., Числов А. С., Курицына И. Е., Ломонова Е. Е.,
Мызина В. А., Борик М. А., Кулебякин А. В., Войцицкий В. П.**

¹*Черноголовка, Россия, Институт физики твердого тела РАН*

²*Москва, Россия, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН*

³*Москва, Россия, Национальный исследовательский технологический университет
«МИСЦ»*

Chislov.artem@bk.ru

Материалы на основе ZrO_2 , совместно стабилизированные Sc_2O_3 и Y_2O_3 , используемые в твердооксидных топливных элементах, вызывают большой интерес, поскольку они обладают наивысшей ионной проводимостью среди твердых электролитов на основе ZrO_2 . Применение таких материалов позволяет понизить рабочую температуру топливного элемента до $800^\circ C$, что весьма важно для увеличения стабильности, ресурса эксплуатации и надежности электрохимических устройств. На практике твердые электролиты используются, в основном, в виде газоплотных керамических мембран, получаемых различными методами керамической технологии. Структурные, механические и электрические свойства таких керамических материалов в значительной степени зависят от их микроструктуры (размеров зерен, характера распределения компонентов твердого раствора по объему и границам зерен, наличия пор и т.д.), которые в свою очередь определяются технологическими условиями синтеза. В отличие от керамики, при получении материалов в виде монокристаллов, влияние этих факторов можно исключить.

Все исследования в данной работе выполнены на монокристаллических образцах. Методом направленной кристаллизации расплава были выращены монокристаллы твердых растворов на основе ZrO_2 , солегированные Sc_2O_3 и Y_2O_3 в широком диапазоне составов $(ZrO_2)_{1-x-y}(Sc_2O_3)_x(Y_2O_3)_y$ ($x = 0.003 - 0.12$; $y = 0.005 - 0.045$). Проведено исследование структуры и фазового состава полученных кристаллов методами рентгенодифракционного анализа, просвечивающей электронной микроскопии и комбинационного рассеяния света. Транспортные характеристики кристаллов измеряли методом импедансной спектроскопии.

В работе показано, что получение однородных монокристаллов как полностью стабилизированного, так и частично стабилизированного диоксида циркония возможно при определенных концентрациях стабилизирующих оксидов. Так для получения монокристаллов полностью стабилизированного диоксида циркония суммарная концентрация стабилизирующих оксидов скандия и иттрия находится в интервале концентраций 10 - 12 мол.%, а для получения кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония в интервале 2.8 - 4 мол.%. Кристаллы с