

## УПРАВЛЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ РАБОТОЙ СИЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ЭФФЕКТЕ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Прядко А.И., Николаев В.И., Пульнев С.А., Чикиряка А.В.  
ФТИ им. А.Ф.Иоффе, 194021 Санкт-Петербург, Россия,  
nkvlad@inbox.ru

Приводы и двигатели на материалах с эффектом памяти формы (ЭПФ) имеют свою нишу в области применения, где крайне важны габариты, как, например, в мини- и микророботах. Известно, что в этом формате по соотношению развиваемой силы к массе они превосходят приводы, работающие на других принципах [1]. В данной работе исследованы аспекты управления циклической работой двигателя на кристаллах с ЭПФ при развитии в них полной и неполной деформации памяти формы [2].

Предварительно были проведены исследования свойств материала силовых элементов из монокристаллического сплава  $\text{Cu-13.5\%Al-5.0\%Ni}$ , выращенных вдоль направления  $\langle 100 \rangle$  путем термоциклирования растяжением при постоянной нагрузке. Образцы имели по данным дифференциального сканирующего калориметрического анализа следующие характеристические температуры мартенситных превращений:  $M_n = 52^\circ\text{C}$ ,  $M_s = 39^\circ\text{C}$ ,  $A_n = 49^\circ\text{C}$ ,  $A_s = 60^\circ\text{C}$ . Максимальная деформация памяти формы при термоциклировании достигает максимальной величины 8.5% при напряжении 62 МПа и при дальнейшем увеличении напряжения сохраняет свою величину. Примеры термодформационных петель исследуемого монокристаллического сплава  $\text{Cu-13.5\%Al-5.0\%Ni}$  для напряжений 4, 40 и 180 МПа приведены на рис. 1.

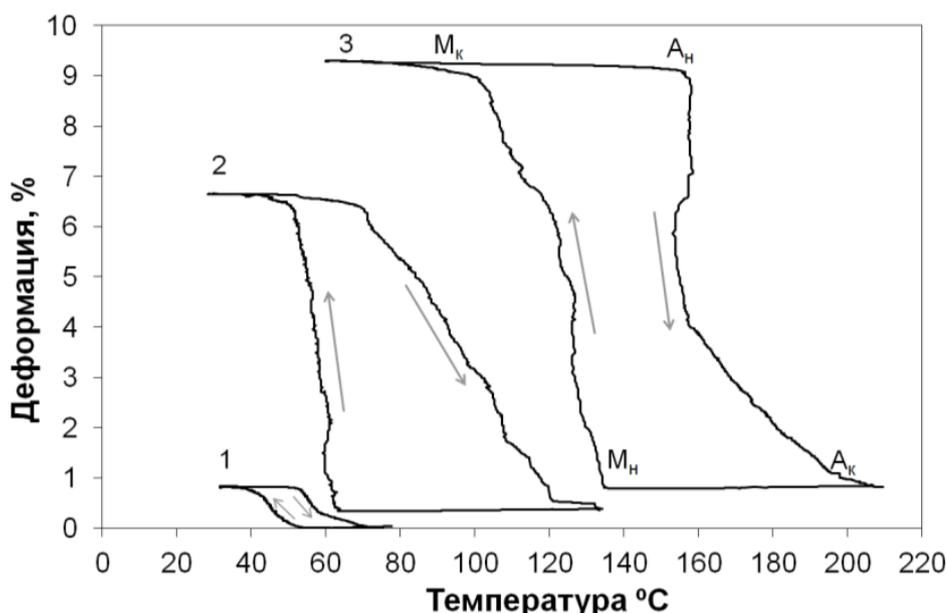


Рисунок 1 - Зависимость деформации от температуры при термоциклировании монокристалла сплава  $\text{Cu-13.5\%Al-5.0\%Ni}$  в режиме растяжения под нагрузкой при напряжениях 4, 40 и 180 МПа (кривые 1, 2 и 3 соответственно).

На рис. 2а. представлена структурная схема вращательного двигателя с двумя силовыми элементами СЭ1 и СЭ2, которые одними концами шарнирно закреплены на корпусе двигателя, а другими на равноплечем рычаге-коромысле, установленном на выходном валу двигателя.

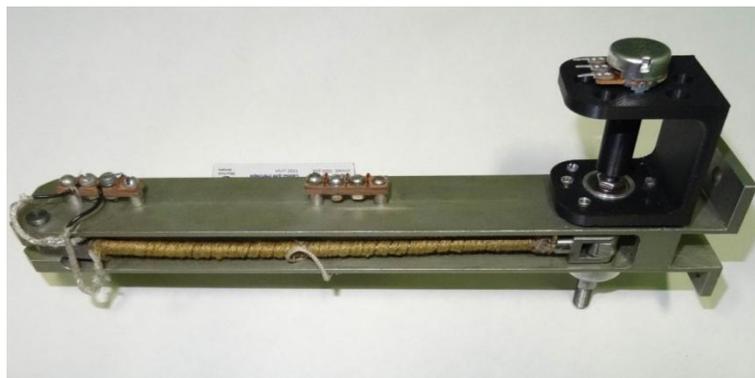
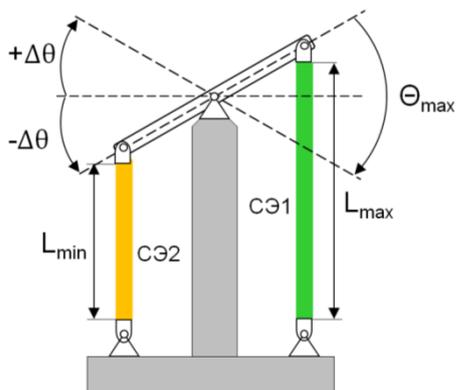


Рисунок 2 - Структурная схема (а) и макетный образец (б) циклического двигателя.

Оба силовых элемента, работающие на растяжение, выполнены из монокристаллов сплава Cu-Al-Ni в виде стержня, ориентированного вдоль  $[100]_A$  и имеют индивидуальные спиральные электрические нагреватели. В соответствии с выбранной схемой был изготовлен макетный образец вращательного циклического двигателя, который представлен на рис 2б.

Управление двигателем осуществляется при помощи разработанной и изготовленной системы управления с программой, реализованной в среде MatLab. Охлаждение силового элемента происходит естественным путем по каналам кондуктивного, конвективного теплопереноса в окружающую среду и теплоотдачи излучением. Скорость охлаждения в диапазоне рабочих температур от 220 до 50°C по мере снижения температуры уменьшается примерно в два-три раза. При этом скорость нагрева силового элемента зависит от подаваемой на нагреватель мощности и может быть значительно больше скорости охлаждения. Эффективное управление тепловыми режимами рабочих элементов заключается в согласовании скоростей нагрева и охлаждения. При этом сила, развиваемая нагреваемым элементом, будет больше силы, необходимой для растяжения охлаждаемого элемента. Так как силовые элементы механически связаны друг с другом, выполняется следующее условие:

$$\varepsilon_1(T1) + \varepsilon_2(T2) = \varepsilon_{эф}$$

Это принцип положен в основу алгоритма и его реализации в компьютерной программе по управлению двигателем в циклическом режиме.

На начальном этапе экспериментов по управлению двигателем в циклическом режиме работы отработывался алгоритм согласования скоростных режимов нагрева и охлаждения силовых элементов и осуществлялся подбор параметров ПИД-регулятора, после чего были проведены серии экспериментов, по управлению двигателем.

При испытании двигателя в качестве граничных температур диапазона были выбраны температуры 70°C и 170°C, которые обеспечивают работу двигателя в полном интервале мартенситных превращений у силовых элементов с памятью формы. В начальный момент времени силовые элементы находятся на разных концах петли гистерезиса (первый нагрет до 70°C, а второй до 170°C). Для начала поворота двигателя, второй элемент начинает охлаждаться (при выключенном нагревателе, естественным путем), а первый с той же скоростью начинает нагреваться. Углы поворота в двигателе изменяются в пределах от 0° до 61°. При этом изменение деформаций силовых элементов происходят согласованно, а величина максимальной деформации равна  $\varepsilon_{эф} = 7.6 \%$ , что близко к значению полной деформации памяти формы в этих кристаллах вдоль направления  $[100]$ . Результаты испытаний двигателя в циклическом режиме, которые представлены в виде температурно-деформационных зависимостей силовых элементов, а также зависимость температур силовых элементов и угла поворота вала двигателя от времени представлены на рис. 3.

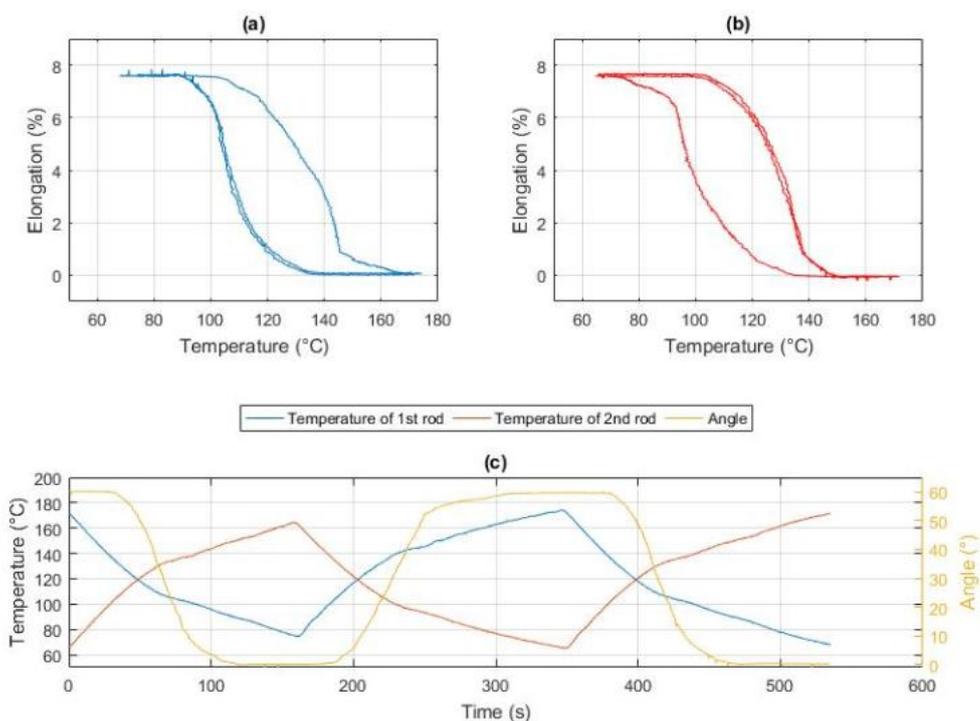


Рисунок 3 - (а) – зависимость удлинения первого силового элемента от температуры, (б) – зависимость удлинения второго силового элемента от температуры, (в) – зависимость температур силовых элементов и угла поворота вала двигателя от времени.

Аналогичные эксперименты работы двигателя в циклическом режиме проводились при неполном интервале мартенситных превращений у силовых элементов. Для этого были уменьшены рабочие диапазоны изменения температур.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности эффективного управления двигателем при повторяющихся циклах.

#### Литература

[1] S. Besseghini, S. Pittaccio, E. Villa, S. Viscuso. Sensors and Actuators, A 158, 2010, pp. 149-160.

[2] Николаев В.И., Аверкин А.И., Егоров В.М., Малыгин Г.А., Пульнев С.А., ФТТ, 2014, т.56, 3, 508-511.