

05

Эффект памяти формы в монокристаллах Cu–Al–Ni, линейные и вращательные двигатели на их основе

© С.А. Пульнев,¹ А.И. Прядко,^{1,2} С.Г. Ястребов,¹ В.И. Николаев^{1,3}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² ЦНИИ робототехники и технической кибернетики,
194064 Санкт-Петербург, Россия

³ Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: pulnev@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 3 июля 2017 г.)

Экспериментально изучены функциональные свойства монокристаллов сплава Cu–Al–Ni с эффектом памяти формы (ЭПФ), изготовленных в виде прутков. Образцы испытывались на растяжение в условиях, имитирующих работу силовых элементов в линейных и вращательных двигателях на ЭПФ в циклическом режиме. По результатам исследований сформулированы базовые принципы построения и условия работы двигателей с силовыми элементами на основе этих монокристаллов. Установлены основные соотношения между функциональными свойствами монокристаллического сплава и основными характеристиками двигателей. Изучены такие характеристики, как максимальный ход штока в линейном двигателе и угол поворота вала во вращательном двигателе, максимальные развиваемые сила и момент, а также совершаемая двигателями полезная работа.

DOI: 10.21883/JTF.2018.06.46013.2411

Введение

Мартенситное превращение, связанное с трансформацией кристаллической структуры твердого тела под воздействием внешней силы, приводит к большим деформациям неупругого характера, вследствие чего происходит изменение первоначальной формы тела. Такие деформации могут быть различного типа — растяжения, сжатия, кручения или изгиба. Восстановление накопленной неупругой деформации и, как следствие, возврат к исходной форме тела могут осуществляться как в процессе разгрузки при постоянной температуре — эффект сверхупругости, так и в процессе нагрева — эффект памяти формы (Shape memory effect — SME). В ряде материалов эти обратимые деформации составляют от нескольких единиц до десяти и более процентов [1–4].

При проявлении эффекта памяти формы в процессе нагрева происходит генерация напряжений в объеме материала, что приводит в случае внешнего сопротивления к восстановлению формы тела к возникновению реактивной силы [5–8]. Важным обстоятельством для технических применений данного эффекта является значительное превышение величины реактивной силы над силой, вызвавшей первоначальное изменение формы. Это открывает принципиальную возможность получения полезной механической работы в техническом устройстве, в котором „тело“ из материала с эффектом памяти является „активно работающим“ функциональным силовым элементом [8–11].

1. Эффект памяти формы в монокристаллах на основе Cu–Al–Ni при термоциклировании под нагрузкой в режиме растяжения

Монокристаллы сплавов на основе Cu–Al–Ni обладают ярко выраженными эффектами памяти формы и сверхупругости, демонстрируя большие обратимые деформации в широком диапазоне температур [2,3,12,13]. 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 $\beta_1 \rightarrow \beta'_1 \rightarrow \alpha'_1$ [3,14].

Для использования данного материала в качестве силовых элементов циклических двигателей нужно знать ряд его специальных свойств, таких как:

- обратимая деформация эффекта памяти формы ϵ_{SME} ,
- генерируемые напряжения σ_{gen} при восстановлении формы в процессе нагревания,
- напряжение σ_{def} , необходимое для достижения максимальной деформации при охлаждении под нагрузкой,
- зависимости характеристических температур мартенситных превращений от приложенного напряжения,
- предельная температура нагрева T_{lim} , до которой материал сохраняет работоспособность без потери функциональных свойств.

Знание этих параметров необходимо для расчета характеристик создаваемых циклических двигателей.

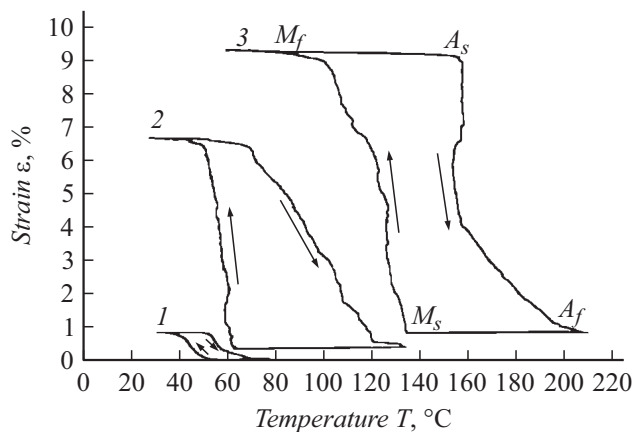


Рис. 1. Зависимость деформации от температуры при термоциклировании монокристалла сплава Cu–13.5%Al–5.0%Ni в режиме растяжения под нагрузкой при напряжениях 4, 40 и 180 МПа (кривые 1, 2 и 3 соответственно).

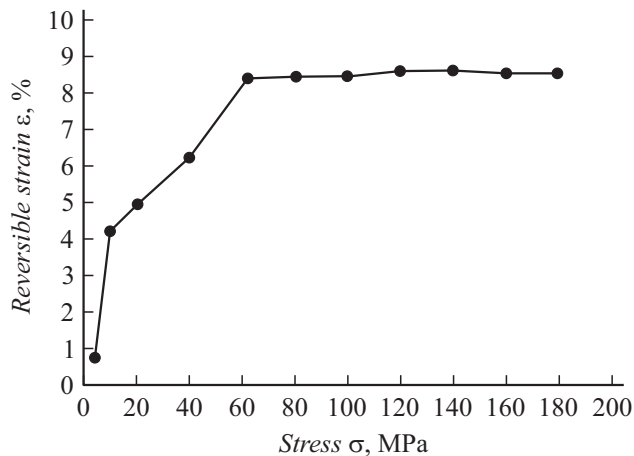


Рис. 2. Зависимость обратимой деформации ϵ_{SME} от действующего напряжения σ при термоциклировании монокристаллического сплава Cu–13.5%Al–5.0%Ni в режиме растяжения.

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. Для определения обратимой и остаточной деформаций, а также зависимости температур превращений от действующего напряжения эксперименты проводилось при термоциклировании под нагрузкой. К испытываемому образцу прикладывалось заданное напряжение σ при температуре на $20^\circ\text{--}30^\circ$ градусов выше температуры конца обратного мартенситного превращения $A_f(\sigma)$, после чего проводился цикл охлаждения–нагрев под нагрузкой. Интенсивное деформирование образца начиналось в полцикле охлаждения при достижении температуры начала прямого мартенситного превращения $M_s(\sigma)$ и заканчивалось при температуре конца прямого мартенситного превраще-

ния $M_f(\sigma)$. Далее в полцикле нагрева при достижении температуры начала обратного превращения $A_s(\sigma)$ начиналось интенсивное восстановление формы, которое заканчивалось при температуре конца обратного превращения $A_f(\sigma)$. Таким образом фиксировалась термодеформационная петля, соответствующая данному напряжению, после чего приложенное напряжение увеличивалось и термоцикл повторялся. 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: $M_s = 52^\circ\text{C}$, $M_f = 39^\circ\text{C}$, $A_s = 49^\circ\text{C}$, $A_f = 60^\circ\text{C}$. Термодеформационные петли для напряжений 4, 40 и 180 МПа исследуемого монокристаллического сплава Cu–13.5%Al–5.0%Ni приведены на рис. 1.

Важным свойством исследуемого монокристаллического сплава Cu–Al–Ni является полное (как видно из рис. 1) восстановление при нагреве деформации памяти формы, накопленной при охлаждении. В изученном диапазоне напряжений до 180 МПа и температур до 200°C исследуемый материал демонстрирует полное отсутствие остаточных деформаций и проявляет „совершенный эффект памяти формы“.

Обратимая деформация эффекта памяти формы ϵ_{SME} в зависимости от действующего в термоцикле напряжения σ показана на рис. 2. Из рисунка видно, что максимальная обратимая деформация памяти формы ϵ_{SME} достигает 8.4%, а величина минимального напряжения ϵ_{def} , необходимая для достижения этой максимальной деформации, составляет 62 МПа.

На рис. 3 приведены зависимости характеристических температур превращений M_s , M_f , A_s , A_f от величины действующего в термоцикле напряжения. Увеличение действующего напряжения приводит к практически ли-

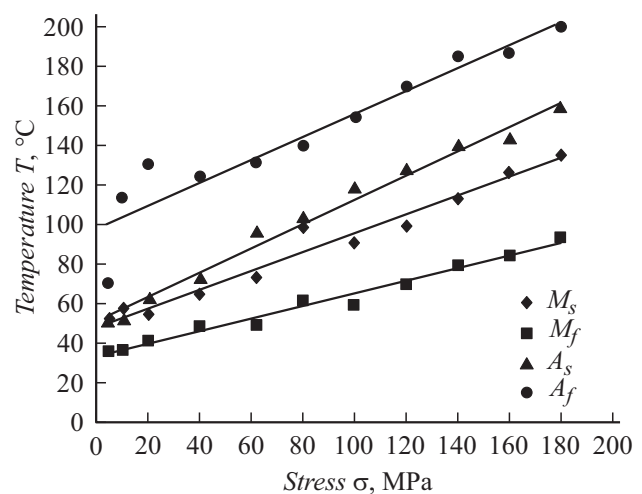


Рис. 3. Зависимость характеристических температур превращений от величины действующего напряжения при термоциклировании монокристаллов сплава Cu–13.5%Al–5.0%Ni в режиме растяжения.

нейному возрастанию всех характеристических температур превращений. В циклическом двигателе максимальная температура нагрева силового элемента не должна быть выше температуры, при которой начинается процесс деградации свойств материала — T_{lim} , вследствие чего происходит потеря его работоспособности [5–8]. В то же время температура, до которой необходимо охладить силовой элемент для достижения заданной деформации при соответствующем напряжении, равна температуре конца прямого мартенситного превращения в соответствии с рис. 3. На основании результатов проведенных нами экспериментальных исследований для расчетов характеристик двигателей на монокристаллах Cu–Al–Ni приняты значения вышеприведенных параметров:

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

2. Принципы построения и основные технические характеристики линейных и вращательных двигателей на основе материалов с эффектом памяти формы

Для создания циклического двигателя, который преобразует подводимую энергию в механическую работу за счет эффекта памяти формы, необходимо ввести в состав двигателя два силовых элемента, работающих друг против друга по принципу 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.

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 термодикле 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.

2.1. Принципы построения и основные технические характеристики линейных двигателей

Структурная схема линейного двигателя, в котором реализован описанный выше принцип, представлена на рис. 4. Двигатель включает в себя два силовых элемента (force elements) FE1 и FE2, которые одним концом закреплены на корпусе двигателя, а другим на штоке — подвижной части двигателя. В данном линейном двигателе силовые элементы подвергаются деформации растяжения, т. е. увеличивают свою длину под воздействием силы и способны сокращать ее при нагреве.

На рис. 4, *a* показано начальное положение штока двигателя, в котором силовой элемент FE1 находится в недеформированном состоянии с длиной L_0 , а FE2 наоборот, растянут до длины L_1 . На рис. 4, *b* показано конечное положение штока, в котором вследствие нагрева второго элемента FE2 он вернул предварительно заданную деформацию, сократив свою длину до начальной L_0 , переместил шток, как показано на рисунке слева направо (направление, условно принятое за направление движения „вперед“) на величину перемещения $+X_{max}$ и растянул первый силовой элемент FE1 до длины L_1 . Для реализации полного цикла работы двигателя необходимо обеспечить возврат штока в исходное положение, переместив его справа налево, т. е. в направлении „назад“ на величину $-X_{max}$. Это достигается путем нагрева FE1 при одновременном охлаждении FE2. Такая организация тепловых режимов „нагрев–охлаждение“ силовых элементов обеспечивает многократную циклическую работу линейного двигателя.

При необходимости шток может быть остановлен в любой фазе цикла и в любой точке X между крайними положениями, как показано на рис. 4, *c*. Из этого промежуточного положения можно возобновить движение штока в любом направлении путем нагрева–охлаждения соответствующих элементов. Организация описанной выше работы двигателя возможна с помощью соответствующей системы управления тепловыми режимами силовых элементов с обратной связью по температурам силовых элементов соответственно $T_1(\tau)$ и $T_2(\tau)$ и по положению штока $X(\tau)$ как функциями от времени τ .

Условием движения штока в требуемом направлении против нагрузки и совершения полезной работы является следующий баланс сил:

$$F_{act} - F_{def} = F_{eng} > F_{load}, \quad (1)$$

где F_{act} — сила, развиваемая силовым элементом, который необходимо нагреть для движения в выбранном направлении, F_{def} — сила, требуемая для деформации противоположного силового элемента, F_{eng} — сила, развиваемая двигателем в заданном направлении, F_{load} — внешняя сила нагрузки, преодолеваемая двигателем.

В свою очередь, условием остановки и позиционирования штока в любой точке X внутри диапазона $[0, X_{max}]$

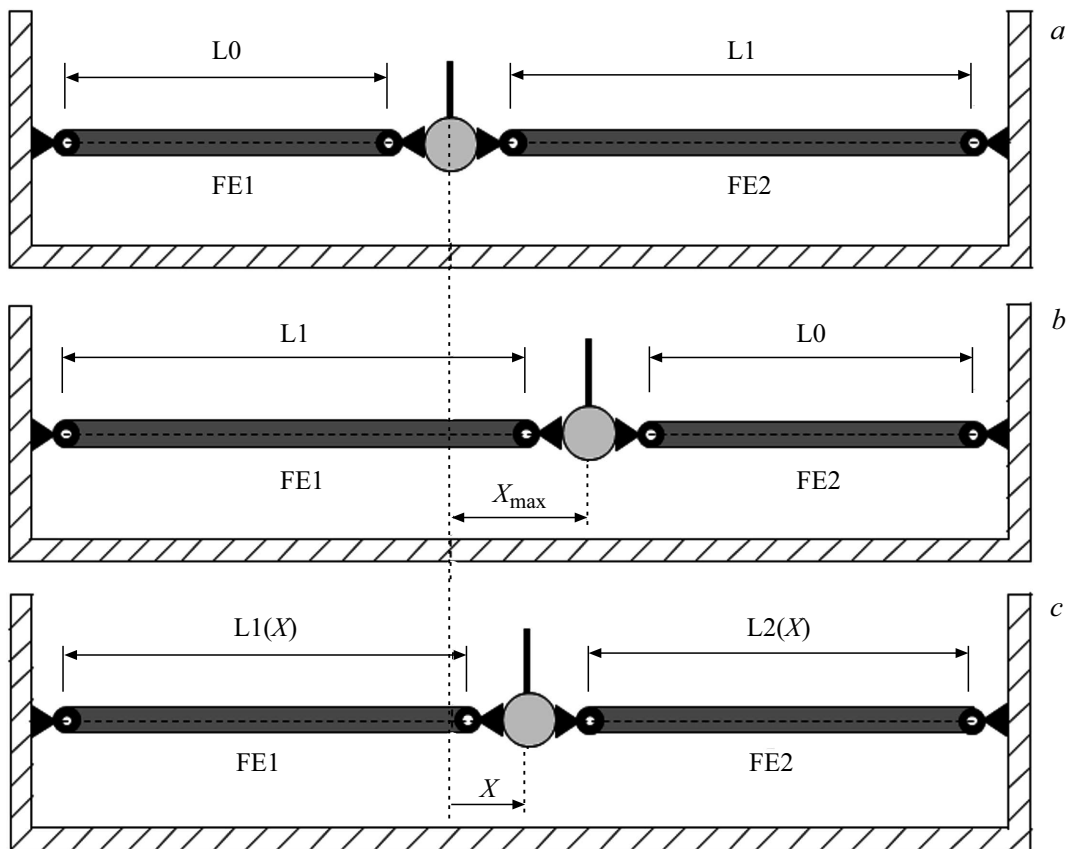


Рис. 4. Структурная схема линейного двигателя. *a* — начальное положение штока двигателя, *b* — конечное положение штока, *c* — промежуточное положение штока.

является равенство развиваемой двигателем силы с нагрузкой на шток:

$$F_{act} - F_{def} = F_{eng} = F_{load}, \quad (2)$$

Основными техническими характеристиками линейных двигателей являются

- максимальная величина X_{max} хода штока,
- максимальная развиваемая сила $F_{end max}$, прикладываемая от штока к внешнему телу, противодействие которого движению штока воспринимается как сила нагрузки на шток F_{load} ,
- совершаемая двигателем полезная работа A .

В соответствии с предложенной структурой двигателя на основе силовых элементов, обладающих эффектом памяти формы и работающих в режиме растяжения, можно получить вышеназванные параметры в следующем виде. Размах перемещения штока между крайними положениями равен

$$X_{max} = L1 - L0 = L0 \cdot (1 + \varepsilon_{SME}) - L0 = \varepsilon_{SME} \cdot L0. \quad (3)$$

Максимальная развиваемая двигателем сила $F_{eng max}$ определяется как разность между максимальной силой, развиваемой нагреваемым силовым элементом, и минимальной силой, необходимой для деформирования

охлаждаемого силового элемента:

$$F_{eng max} = F_{act max} - F_{def min} = (\sigma_{gen max} - \sigma_{def}) \cdot S, \quad (4)$$

где S — площадь поперечного сечения силового элемента.

2.2. Принципы построения и основные технические характеристики вращательных двигателей

Структурная схема вращательного двигателя представлена на рис. 5. Двигатель включает в себя два силовых элемента FE1 и FE2, которые одними концами закреплены на корпусе двигателя, а другими через гибкие тяги на выходном валу — на подвижной части двигателя. Выходной вал установлен на корпусе в подшипниковых опорах. Во вращательном двигателе аналогично рассмотренному выше линейному двигателю силовые элементы подвергаются деформации растяжения.

На рис. 5, *a* показано начальное положение вала двигателя, в котором силовой элемент FE1 находится в недеформированном состоянии с длиной $L0$, а FE2 наоборот, растянут до длины $L1$. На рис. 5, *b* показано конечное положение вала, в котором вследствие нагрева элемента FE2 он вернул предварительно заданную

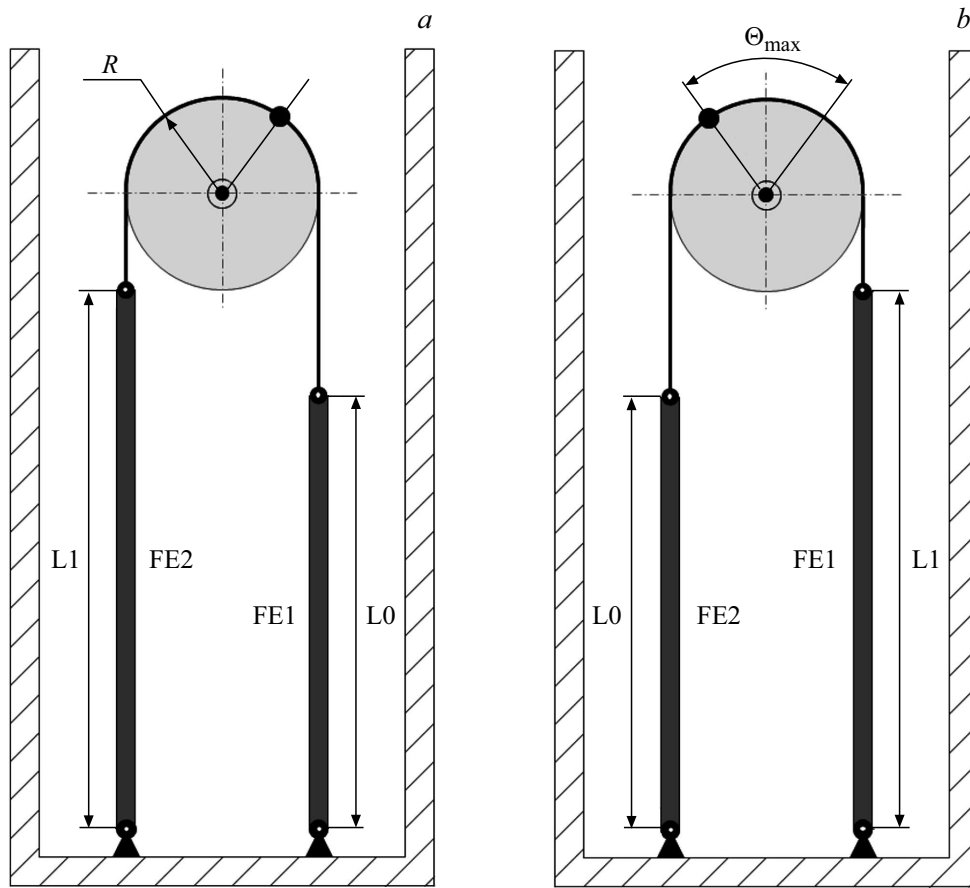


Рис. 5. Структурная схема вращательного двигателя. *a* — начальное положение вала двигателя, *b* — конечное положение вала.

деформацию, сократив свою длину до начальной L_0 , повернул вал, как показано на рисунке против часовой стрелки (направление, условно принятое за направление движения „вперед“) на угол поворота $+\theta_{\max}$ и растянул силовой элемент FE1 до длины L_1 . Для реализации полного цикла работы двигателя необходимо обеспечить возврат вала в исходное положение, повернув его по часовой стрелке, т. е. на величину $-\theta_{\max}$. Это достигается путем нагрева FE1 при одновременном охлаждении FE2. Повторение данного алгоритма обеспечит циклическую работу вращательного двигателя. При необходимости вал может быть остановлен на любой фазе цикла в любой точке θ между крайними положениями. Из этого промежуточного положения можно возобновить поворот вала в любом направлении путем нагрева-охлаждения соответствующих элементов.

Условием поворота вала в требуемом направлении против момента нагрузки и совершения полезной работы является следующий баланс моментов:

$$M_{\text{act}} - M_{\text{def}} = M_{\text{eng}} > M_{\text{load}}, \quad (5)$$

где $M_{\text{act}} = F_{\text{act}} \cdot R$ — момент, развиваемый силовым элементом, который необходимо нагреть для поворота в выбранном направлении, $M_{\text{def}} = F_{\text{def}} \cdot R$ — момент, требуемый для деформации противоположного силового

элемента, R — радиус приложения силы, M_{def} — момент, развиваемый двигателем в заданном направлении, M_{load} — внешний момент, преодолеваемый двигателем.

В свою очередь, условием остановки и позиционирования вала в любом угловом положении θ внутри диапазона $[0, \theta_{\max}]$ является равенство развиваемого двигателем момента с нагрузкой на вал:

$$M_{\text{act}} - M_{\text{def}} = M_{\text{eng}} = M_{\text{load}}. \quad (6)$$

Основными техническими характеристиками вращательных двигателей являются

- максимальная величина θ_{\max} угла поворота вала,
- максимальная развиваемый момент $M_{\text{eng max}}$, прикладываемый валом к внешнему телу, противодействие которого повороту вала воспринимается как момент нагрузки на вал M_{load} ,
- совершаемая двигателем полезная работа A .

В соответствии с предложенной структурой двигателя на основе силовых элементов, обладающих эффектом памяти формы и работающих в режиме растяжения, можно получить вышеназванные параметры в следующем виде. Размах поворота вала между крайними положениями равен

$$\theta_{\max} = \frac{L_1 - L_0}{R} = \frac{L_0 \cdot (1 + \varepsilon_{\text{SME}}) - L_0}{R} = \frac{L_0 \cdot \varepsilon_{\text{SME}}}{R}. \quad (7)$$

Максимальный развиваемый двигателем момент $M_{\text{eng max}}$ определяется как разность между максимальным моментом, создаваемым нагреваемым силовым элементом, и минимальным моментом, необходимым для деформирования охлаждаемого силового элемента:

$$M_{\text{eng max}} = F_{\text{act max}} \cdot R - F_{\text{def min}} \cdot R = (\sigma_{\text{gen max}} - \sigma_{\text{def}}) \cdot S \cdot R, \quad (8)$$

где S — площадь поперечного сечения силового элемента.

2.3. Работа, совершаемая линейным и вращательным двигателями

Работа, совершаемая линейным двигателем при перемещении штока из точки $X1$ в точку $X2$ внутри диапазона хода штока, равна

$$A = \int_{X1}^{X2} F_{\text{eng}} dX. \quad (9)$$

Очевидно, что максимальная работа, совершаемая линейным двигателем при максимальном ходе штока с максимальной силой, равна:

$$\begin{aligned} A_{\text{max}} &= \int_0^{X_{\text{max}}} F_{\text{eng max}} dX = (\sigma_{\text{gen max}} - \sigma_{\text{def}}) \cdot S \cdot \varepsilon_{\text{SME}} \cdot L0 \\ &= (\sigma_{\text{gen max}} - \sigma_{\text{def}}) \cdot \varepsilon_{\text{SME}} \cdot V_{\text{FE}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $V_{\text{FE}} = S \cdot L0$ — объем силового элемента.

Работа, совершаемая вращательным двигателем при повороте вала между углами $\theta1$ и $\theta2$, соответственно равна

$$A = \int_{\theta1}^{\theta2} M_{\text{eng}} d\theta. \quad (11)$$

Тогда максимальная работа, совершаемая вращательным двигателем при максимальном повороте вала с максимальным моментом, равна

$$\begin{aligned} A_{\text{max}} &= \int_0^{\theta_{\text{max}}} M_{\text{eng max}} d\theta = (\sigma_{\text{gen max}} - \sigma_{\text{def}}) \cdot S \cdot R \cdot \frac{L0 \cdot \varepsilon_{\text{SME}}}{R} \\ &= (\sigma_{\text{gen max}} - \sigma_{\text{def}}) \cdot \varepsilon_{\text{SME}} \cdot V_{\text{FE}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Как видно из приведенных формул, максимальная работа как для линейного, так и для вращательного двигателей одинакова. Она пропорциональна произведению обратимой деформации памяти формы ε_{FE} на разность между максимальным генерируемым напряжением и напряжением, необходимым для максимальной деформации силового элемента. Таким образом, разность между максимальным генерируемым напряжением при нагреве материала с эффектом памяти формы и напряжением,

необходимым для его максимальной деформации при охлаждении, является важной характеристикой материала с точки зрения его использования в циклических устройствах

$$\sigma_e = \sigma_{\text{gen max}} - \sigma_{\text{def}}. \quad (13)$$

Эта величина может рассматриваться как эффективное напряжение памяти формы σ_e конкретного материала и характеризует эффективность его применения в циклических устройствах. Тогда работа, совершаемая двигателем на материалах с эффектом памяти формы, равна

$$A_{\text{max}} = \sigma_e \cdot \varepsilon_{\text{SME}} \cdot V_{\text{FE}}. \quad (14)$$

Для рассмотренных нами двигателей, в которых силовые элементы функционируют по принципу антагонистов, максимальная удельная работа $A_{\text{FE max}}$, отнесенная к объему используемого материала с эффектом памяти формы, будет равна

$$\begin{aligned} A_{\text{FE max}} &= \frac{A_{\text{max}}}{V_{\text{FE}}} = \sigma_e \cdot \varepsilon_{\text{SME}} = (180-60) \cdot 0.08 \\ &= 9.6 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 = 9.6 \text{ MJ/m}^3. \end{aligned} \quad (15)$$

Данная величина является предельным значением, рассчитанным для объема силового элемента. С целью сравнения рассматриваемого вращательного двигателя с электродвигателем необходимо учитывать весь объем конструкции двигателей V_{eng} .

Конструктивная проработка вращательного двигателя с силовыми элементами диаметром $d = 5 \text{ mm}$ показала, что его длина будет не более чем на 20% больше длины силового элемента с учетом необходимости его крепления и размещения вала в корпусе двигателя, а ширина корпуса составит три диаметра силового элемента. Высота двигателя зависит от угла поворота. Для значения угла поворота 90° высота составит шесть диаметров силового элемента при радиусе вала, равном двум диаметрам силового элемента. В свою очередь, для выбранного угла поворота 90° и радиуса вала длина силового элемента составит 200 mm. Для приведенных выше конструктивных параметров максимальный момент, развиваемый двигателем, будет равен

$$\begin{aligned} M_{\text{eng max}} &= (\sigma_{\text{gen max}} - \sigma_{\text{def}}) \cdot S \cdot R = (180-60) \cdot 10^6 \frac{\pi}{4} 5^2 \\ &\times 10^{-6} \cdot 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 24 \text{ N} \cdot \text{m}, \end{aligned} \quad (16)$$

а работа, совершаемая двигателем, отнесенная к его объему, составит

$$\begin{aligned} A_{\text{eng max}}^{\text{SME}} &= A_{\text{max FE}} \frac{V_{\text{FE}}}{V_{\text{eng}}} = A_{\text{max FE}} \frac{0.25\pi \cdot d^2 \cdot 200}{3d \cdot 6d \cdot 1.2 \cdot 200} \\ &= 9.6 \cdot 10^6 \cdot 0.036 = 0.35 \text{ MJ/m}^3. \end{aligned} \quad (17)$$

Для сравнения были выбраны два электропривода фирмы MAXON MOTOR с близкими по величине моментами, равными соответственно 15 и 30 N·m в виде

комплектных сборок — электродвигатель плюс редуктор RE35+GP42 и RE50+GP62 [15,16]. У этих электроприводов удельные совершаемые работы, отнесенные к их объемам, соответственно равны 0.11 и 0.17 MJ/m³. Видно, что удельная работа вращательного двигателя на основе монокристаллов Cu–Al–Ni с эффектом памяти формы в 2–3 раза превышает этот параметр для рассмотренных электроприводов.

Таким образом, достигаемая на монокристаллах Cu–Al–Ni величина удельной работы позволяет создавать компактные силовые циклические двигатели, превосходящие по своим удельным характеристикам традиционные двигатели [10,11,17].

Заключение и выводы

Проведены экспериментальные исследования функциональных свойств монокристаллов Cu–Al–Ni с эффектом памяти формы в условиях, имитирующих работу силовых элементов в линейном и вращательном циклических двигателях. Установлено, что монокристаллический сплав Cu–Al–Ni в изученном диапазоне напряжений до 180 МПа и температур до 200°C демонстрирует полностью обратимую деформацию памяти формы в многократных термоциклах. В результате экспериментов определены основные функциональные термомеханические характеристики монокристаллов, необходимые для расчетов параметров циклических двигателей.

Сформулированы принципы построения и условия работы циклических двигателей с силовыми элементами из функциональных материалов с эффектом памяти формы. Обязательным условием является полное отсутствие необратимых остаточных деформаций в материале силовых элементов в процессе их функционирования при термоциклировании под нагрузкой.

Установлены основные соотношения между свойствами функционального материала и основными характеристиками предложенных двигателей, такими как максимальный ход штока и максимальная развиваемая сила для линейного двигателя, а также максимальная величина угла поворота вала и максимально развиваемый момент для вращательного двигателя.

Показано, что совершаемая циклическими двигателями полезная работа пропорциональна произведению обратимой деформации памяти формы на разность между генерируемым напряжением и напряжением, необходимым для деформации силового элемента. Указанная разность напряжений может рассматриваться как эффективное напряжение и является важным свойством материала, характеризующим эффективность его применения в качестве силового элемента циклического двигателя. Максимальная удельная работа не зависит от типа двигателя и в 2–3 раза превосходит традиционные двигатели.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-19-00129).

Список литературы

- [1] Лухачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. Л., 1987. 216 с.
- [2] Ооцукэ К., Сумидзу К., Судзуки Ю. и др. Сплавы с эффектом памяти формы. М.: Металлургия, 1990. 223 с.
- [3] Horikawa H., Ichinose S., Moorii K., Miyazaki S., Otsuka K. // Metallurgical Transactions A. 1988. Vol. 19A. P. 915–923.
- [4] Jarone Mohd Jani, Leary Martin, Subic Aleksandar, Gibson Mark A. // Materials and Design. 2014. Vol. 56. P. 1078–1113.
- [5] Pulnev S.A., Nikolaev V.I., Malygin G.A., Kuzmin S.L., Shpeizman V.V., Nikanorov S.P. // Tech. Phys. 2006. Vol. 51. N 8. P. 1004–1007.
- [6] Nikolaev V.I., Pulnev S.A., Malygin G.A., Shpeizman V.V., Nikanorov S.P. // Phys. Solid State. 2006. Vol. 50. N 11. P. 2170–2174.
- [7] Nikolaev V.I., Averkin A.I., Egorov V.M., Malygin G.A., Pulnev S.A. // Phys. Solid State. 2014. Vol. 56. N 3. P. 522–526.
- [8] Pulnev S., Nikolaev V., Priadko A., Rogov A., Viahhi I. // SMST-2010. Pacific Grove, California, USA, 2010. P. 497–499.
- [9] Furuya Y., Shimada H. // Engineering Aspects of shape memory alloys. 1990. P. 338–355.
- [10] Priadko A., Pulnev S., Viahhi I., Vetrov V., Yudin V. // ACTUATOR 98, Bremen, Germany, 1998. P. 478–487.
- [11] Priadko A., Pulnev S., Viahhi I. // SMST-2000. Pacific Grove, California, USA, 2000. P. 225–233.
- [12] Qidwai M.A., Bhattacharyya A., Vahhi I., Pulnev S. // Smart Structures and Materials 2003: Active Materials: Behavior and Mechanics Proc. SPIE. Vol. 5053. N 1. P. 81–91, 2003.
- [13] Kannarpady G.K., Bhattacharyya A., Pulnev S., Vahhi I. // J. Alloys and Compounds 425 (1), 2006. Vol. 425. N 1. P. 112–122.
- [14] Otsuka K., Sakamoto H., Shimizu K. Successive Stress-Induced Martensitic Transformations and Associated Transformation Pseudoelasticity in CuAlNi Alloys Acta Metall., 27 (1979), 585.
- [15] Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8823064264734/16-349-350-351-EN-oct.pdf
- [16] Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8821070069790/6-354-355-EN.pdf
- [17] Besseghini S., Pittaccio S., Villa E., Viscuso S. // Sensors and Actuators, A 2010. Vol. 158. P. 149–160.