

05

Моделирование работы циклического привода на основе изгибного силового элемента, выполненного из материала с эффектом памяти формы

© А.И. Прядко А.В. Чикиряка С.А. Пульнев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: chikyaka@mail.ru

Поступило в Редакцию 1 марта 2019 г.
В окончательной редакции 13 июня 2019 г.
Принято к публикации 1 июля 2019 г.

Рассмотрен линейный циклический привод одностороннего действия на основе изгибного силового элемента из материала с эффектом памяти формы и возвратной пружины. Разработана математическая модель такого привода, которая позволяет связать его характеристики с функциональными свойствами материала с эффектом памяти формы. Модель позволяет выполнять инженерные проектировочные расчеты основных характеристик циклического привода.

Ключевые слова: эффект памяти формы, циклический привод, изгибный силовой элемент, моделирование работы привода.

DOI: 10.21883/JTF.2019.12.48486.75-19

Введение

Благодаря способности материалов с эффектом памяти формы преобразовывать тепловую энергию в механическую работу в процессе термоупругих мартенситных превращений [1–3], они нашли широкое применение в технике и медицине. В настоящее время для автомобильной промышленности, робототехники, авиационной и космической техники разработан широкий спектр различных устройств, таких, как втулки для соединения труб, клапаны, приводы и двигатели [4–6]. Их можно разделить на устройства однократного и многократного циклического действия. Устройства циклического действия являются наиболее востребованными в технике [7–10], но, в то же время, их создание является более сложной задачей.

Компоненты устройств, изготовленные из материалов, обладающих эффектом памяти формы, — функциональные силовые элементы — могут проявлять эффект памяти формы после деформации различного типа — растяжения, сжатия, изгиба или кручения. В работе [11] рассмотрена конструкция привода однократного действия на базе изгибного силового элемента с эффектом памяти формы. Для такого привода разработана математическая модель, которая позволяет связать его характеристики с функциональными свойствами материала с эффектом памяти формы. Предметом настоящей работы является описание особенностей конструкции, принципов работы и разработка математической модели циклического привода, связывающей его характеристики с функциональными свойствами материала с эффектом памяти формы.

1. Модель линейного привода циклического действия на основе изгибного силового элемента, выполненного из материала с эффектом памяти формы

1.1. Схема действия привода

Конструктивная схема циклического линейного привода на основе изгибного силового элемента, генерирующего полезную силу в одном направлении, приведена на рис. 1. По сравнению с приводом однократного действия на основе изгибного силового элемента [11] в состав циклического привода введен новый функциональный элемент — возвратная пружина. Назначение пружины заключается в принудительном возврате силового элемента в исходное положение путем его изгиба за счет эффекта пластичности превращения при охлаждении.

Циклический привод состоит из корпуса 1, силового элемента 2, штока 3 и возвратной пружины 4. Шток размещен внутри корпуса в линейных направляющих 5. На штоке установлен ограничитель хода 6, задающий величину максимального рабочего перемещения штока. Силовой элемент шарнирно закреплен одним концом на корпусе, а вторым на штоке. Возвратная пружина закреплена таким же образом.

Три последовательных состояния привода — начальное, промежуточное и конечное — показаны на рис. 1, а–с соответственно. В начальном состоянии силовой элемент максимально согнут с деформацией $\varepsilon = \varepsilon_{\max}$, пружина сжата и шток находится в начальной точке O_1 . В промежуточном состоянии привода силовой элемент частично разогнулся, возвратная пружина рас-

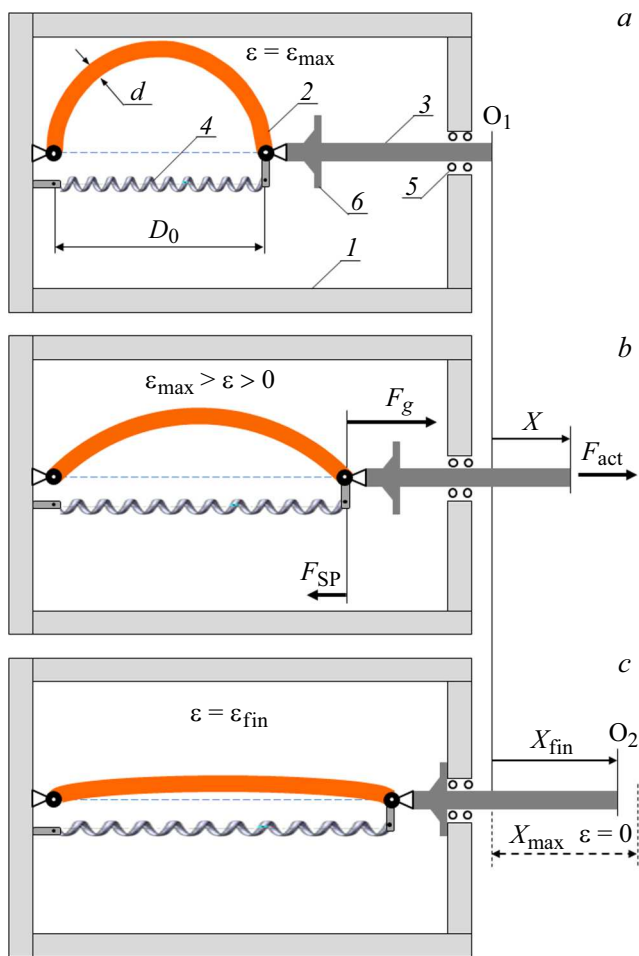


Рис. 1. Схема линейного привода циклического действия.

тянута, а шток находится в некотором промежуточном положении. И, наконец, в конечном состоянии привода силовой элемент разогнут до деформации $\varepsilon = \varepsilon_{\text{fin}}$, пружина растянута до максимальной рабочей величины, а шток находится в конечной точке O_2 , которая определяется ограничителем перемещения штока. Необходимо отметить, что максимально возможное перемещение штока X_{max} соответствует полностью распрямленному силовому элементу при $\varepsilon = 0$ в случае отсутствия ограничителя перемещения штока.

Нагрев силового элемента может осуществляться различными способами, например, путем пропускания электрического тока непосредственно через силовой элемент или с помощью спирального нагревателя, навитого вокруг элемента.

Привод работает следующим образом. В полуцикле нагрева изогнутый силовой элемент 2 постепенно разгибается, растягивает пружину и перемещает шток 3 из его начального положения O_1 в конечное O_2 на величину хода X_{fin} . Таким образом, линейный привод преодолевает сопротивление внешней силы, развивает полезную силу $F_{\text{act}}(X)$ и совершает при этом механическую работу. В свою очередь, в полуцикле охлаждения

силового элемента пружина постепенно сжимается, что приводит к возврату силового элемента в исходное изогнутое положение и возврату штока в начальную точку O_1 . Таким образом, предложенный привод является циклическим приводом одностороннего действия, так как полезная сила генерируется силовым элементом за счет эффекта памяти формы только в полуцикле нагрева. Возврат же силового элемента в исходное положение происходит под действием силы возвратной пружины за счет эффекта пластичности превращения при охлаждении. Очевидно, что за счет организации во времени последовательных циклов „нагрев–охлаждение“ силового элемента реализуется многократная циклическая работа привода.

1.2. Математическая модель циклического привода

Функциональными частями конструкции рассмотренного выше циклического привода являются силовой элемент, выполненный из материала с эффектом памяти формы, и возвратная пружина. Основные характеристики привода — генерируемая сила и перемещение штока — зависят от функциональных свойств материала силового элемента и параметров возвратной пружины. Для описания работы такого привода и исследования взаимосвязи свойств материала и параметров пружины с характеристиками привода разработана математическая модель, которая базируется на следующих предположениях:

- Силовой изгибный элемент представляет собой цилиндрический пруток диаметром d .
- Пруток изогнут по дуге окружности и сохраняет форму дуги в любом положении.
- Деформация распределена по поперечному сечению прутка линейно в соответствии с гипотезой плоских сечений [12].
- Нормальные напряжения распределяются в поперечном сечении цилиндрического прутка согласно схеме „пластического шарнира“ [12].
- Нормальные напряжения при постоянной температуре в процессе восстановления формы прутка сохраняют свою величину.
- Напряжения, необходимые для изгиба силового элемента σ_{def} при охлаждении, должны быть значительно меньше, чем генерируемые напряжения σ_{gen} силовым элементом при нагреве.
- Длина силового элемента S такова, что в начальном положении его форма представляет собой половину окружности с диаметром D_0 . В этом положении деформация прутка равна максимально возможной деформации эффекта памяти формы ε_{max} материала прутка.
- Сила возвратной пружины линейно зависит от изменения ее длины.
- Сила возвратной пружины F_{SP} на всем интервале перемещений штока должна быть больше, чем сила,

которая необходима для изгиба силового элемента F_d при охлаждении.

Основные функциональные характеристики непосредственно для изгибного силового элемента получены в работе [11]. Перемещение X и генерируемая сила F_g связаны со свойствами материала прутка — максимальной деформацией эффекта памяти формы ε_{\max} , диаметром прутка d и генерируемыми при нагреве силового элемента напряжениями σ_{gen} . Данные зависимости имеют вид

$$X(\varepsilon) = X_{\max} \cdot \frac{2}{\pi - 2} \left\{ \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon} \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}}\right) - 1 \right\}, \quad (1)$$

$$X_{\max} = X(\varepsilon \rightarrow 0) = \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) \frac{d}{\varepsilon_{\max}}, \quad (2)$$

$$F_g(\varepsilon) = F_{0g} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} \frac{1}{1 - \cos\left(\frac{\pi\varepsilon}{2\varepsilon_{\max}}\right)}, \quad (3)$$

$$F_{0g} = F_g(\varepsilon = \varepsilon_{\max}) = F(X = 0) = \sigma_g \frac{d^2}{3} \varepsilon_{\max}. \quad (4)$$

Сила, необходимая для приведения силового элемента в исходное изогнутое положение O_1 (рис. 1), зависит от напряжений пластичности превращения σ_d [13] и выражается следующим образом:

$$F_d(\varepsilon) = \sigma_d \frac{d^2}{3} \frac{\varepsilon}{1 - \cos\left(\frac{\pi\varepsilon}{2\varepsilon_{\max}}\right)} F_{d0} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} \frac{1}{1 - \cos\left(\frac{\pi\varepsilon}{2\varepsilon_{\max}}\right)}, \quad (5)$$

$$F_{d0} = F_d(\varepsilon = \varepsilon_{\max}) = F(X = 0) = \sigma_d \frac{d^2}{3} \varepsilon_{\max}. \quad (6)$$

Очевидно, что выражения (1) и (3) определяют параметрическое задание перемещения штока и генерируемой силы от деформации силового элемента [14]

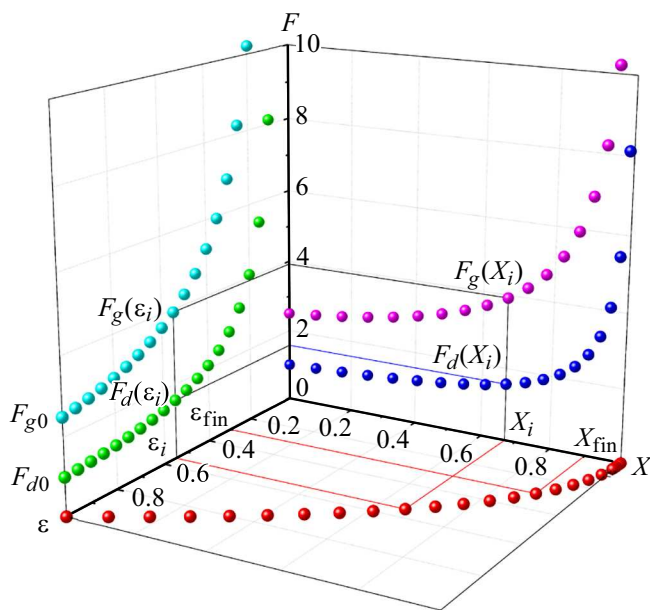


Рис. 2. Диаграмма процедуры построения зависимостей сил F_g и F_d от перемещения штока привода.

и являются трансцендентными, что делает невозможным получение в аналитическом виде зависимостей как генерируемой силы $F_g(X)$, так и силы, необходимой для изгиба силового элемента $F_d(X)$. Поэтому искомые зависимости могут быть получены на основе рассчитанных дискретных значений $F_{gi}(\varepsilon_i)$, $F_{di}(\varepsilon_i)$ и $X_i(\varepsilon_i)$ путем построения $F_{gi}(X_i)$ и $F_{di}(X_i)$ для одних и тех же значений ε_i в соответствующих координатных осях. Эти зависимости с процедурой их построения представлены на рис. 2 в виде последовательности значений $F_{gi}(X_i)$ и $F_{di}(X_i)$.

При необходимости промежуточные значения могут быть легко получены с помощью любого метода интерполяции по имеющемуся набору дискретных значений. В результате построений можно записать выражение для сил следующим образом:

$$F_g(X) = F_{g0}(X = 0)f(X), \quad (7)$$

$$F_d(X) = F_{d0}(X = 0)f(X), \quad (8)$$

где $f(X)$ — безразмерная функция силы, определяющая зависимость сил F_g и F_d от перемещения штока X . Она может быть аппроксимирована степенной функцией с необходимой точностью

$$f(X) = 1 + \sum_{i=1}^{i=n} a_i X^i. \quad (9)$$

Точность характеризуется степенью достоверности аппроксимации R^2 , которая зависит от степени n аппроксимирующего полинома [15].

При выборе характеристик пружины необходимо, чтобы развиваемая ею сила F_{sp} была больше, чем сила, необходимая для изгиба силового элемента при охлаждении за счет пластичности превращения. Это условие записывается следующим образом:

$$F_{sp}(X) \geq F_d(X) = F_{d0}f(X), \quad (10)$$

$$0 \leq X \leq X_{\text{fin}} = \lambda X_{\max}, \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{X_{\text{fin}}}{X_{\max}} < 1, \quad (12)$$

где X_{fin} — максимальное рабочее перемещение штока привода, величина которого задается конструктивно, λ — коэффициент максимального рабочего перемещения штока. Процедура выбора характеристик пружины показана на рис. 3.

Сила пружины F_{sp} принимается равной F_d в крайних точках интервала при $X = 0$ и $X = X_{\text{fin}}$, тогда в силу выпуклости вниз функции $f(X)$ ее значения будут превышать $F_d(X)$ во всех промежуточных точках, т.е. во всем диапазоне перемещений штока привода

$$F_{sp}(X = 0) = F_{d0}, \quad (13)$$

$$F_{sp}(X = X_{\text{fin}}) = F_d(X_{\text{fin}}) = F_{d0}f(X_{\text{fin}}). \quad (14)$$

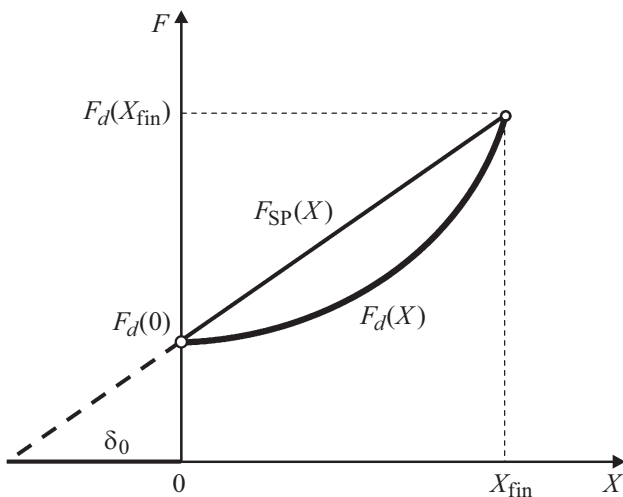


Рис. 3. Схема выбора характеристик возвратной пружины.

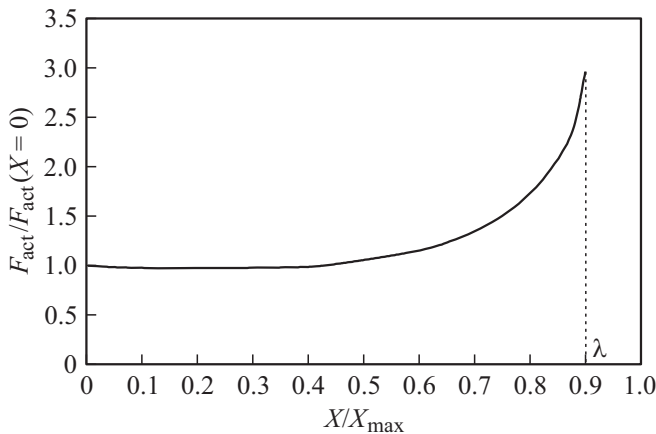


Рис. 4. Зависимость развиваемой приводом силы от перемещения штока для коэффициента $\lambda = X_{fin}/X_{max} = 0.9$.

Таким образом, выражение для силы пружины как функции от перемещения штока можно записать

$$F_{sp}(X) = F_{d0} + \frac{F_d(X_{fin}) - F_{d0}}{X_{fin}}X = C(\delta_0 + X), \quad (15)$$

$$C = \frac{F_d(X_{fin}) - F_{d0}}{X_{fin}} = \frac{F_{d0}f(X_{fin}) - F_{d0}}{X_{fin}} = \frac{F_{d0}}{X_{fin}}(f(X_{fin}) - 1), \quad (16)$$

$$\delta_0 = \frac{F_{d0}}{C} = \frac{X_{fin}}{\frac{F_d(X_{fin})}{F_{d0}} - 1} = \frac{X_{fin}}{f(X_{fin}) - 1}, \quad (17)$$

где C — жесткость пружины, δ_0 — начальное предварительное растяжение пружины.

Тогда сила, развиваемая приводом, будет равна

$$F_{act} = F_g(X) - F_{sp}(X), \quad (18)$$

$$F_{act}(X) = F_{g0}f(X) - (F_{d0} + CX) = F_{act}(X = 0)f_{act}(X), \quad (19)$$

где $f_{act}(X)$ — безразмерная функция силы, определяющая зависимость развиваемой приводом силы F_{act} от

перемещения штока X . Используя равенства (5)–(8), (13), (14) и (16), эту безразмерную силу можно выразить следующим образом:

$$F_{act}(X) = \frac{F_{act}(X)}{F_{act}(X = 0)} = \frac{F_{g0}f(X) - F_{d0} - CX}{F_{g0} - F_{d0}} = f(X) + \frac{\sigma_d}{\sigma_g - \sigma_d} \left(F(X) - 1 - (F(X_{fin}) - 1) \frac{x}{x_{fin}} \right). \quad (20)$$

Таким образом, безразмерная функция силы привода зависит от перемещения штока и двух констант — соотношения напряжений и максимального рабочего перемещения штока привода

$$f_{act} = f_{act} \left(X; \frac{\sigma_d}{\sigma_g - \sigma_d}; X_{fin} \right). \quad (21)$$

В начальном положении штока при $X = 0$, принимая во внимание (9):

$$f_{act}(X = 0) = f(X = 0) = 1. \quad (22)$$

Соответственно сила, развиваемая приводом в начальном положении штока, исходя из (18), учитывая (4), (6), (7) и (13), определяется, как

$$F_{act}(X = 0) = F_{g0} - F_{d0} = (\sigma_g - \sigma_d) \frac{d^2}{3} \epsilon_{max}. \quad (23)$$

Как видно из полученных выражений (19) и (23), сила, развиваемая приводом, определяется свойствами материала и диаметром прутка силового элемента и зависит от величины перемещения штока. Необходимо обратить внимание на то, что эта сила прямо пропорциональна разности генерируемых и деформирующих напряжений. Она также зависит от величины максимальной деформации эффекта памяти формы материала силового элемента и конструктивного коэффициента максимального перемещения штока.

На рис. 4 приведена сила, развиваемая приводом, нормированная к силе в исходной точке $F_{act}/F_{act}(X = 0)$ движения штока в зависимости от безразмерного параметра перемещения штока X/X_{max} .

Заключение

Рассмотрен линейный привод циклического действия с изгибным силовым элементом из материала с эффектом памяти формы и возвратной пружинной.

Предложена математическая модель, описывающая поведение такого привода, которая устанавливает взаимосвязь между техническими характеристиками привода — перемещением штока и развиваемой силой — и свойствами материала — максимальной деформацией эффекта памяти формы, диаметра прутка, генерируемых и деформирующих напряжений. Предложена методика расчета характеристик возвратной пружины, обеспечивающей возврат силового элемента в исходное положение.

Установлено, что сила привода прямо пропорциональна разности генерируемых при нагреве и деформирующихся при охлаждении напряжений в материале изгибного силового элемента привода, а также максимальной деформации эффекта памяти формы. Показано также, что сила привода пропорциональна квадрату диаметра силового элемента.

Модель позволяет выполнять инженерные проекторочные расчеты основных характеристик циклического привода с изгибным силовым элементом из материала с эффектом памяти формы.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Малыгин Г.А., Николаев В.И., Пульнев С.А., Чикиряка А.В. // Письма ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 24. С. 39–45. [Malygin G., Nikolaev V., Pulnev S., Chikiryaka A. // Tech. Phys. Lett. 2017. Vol. 43. N 12. P. 1109–1111.]
- [2] Николаев В.И., Егоров В.М., Малыгин Г.А., Пульнев С.А. // ФТТ. 2010. Т. 52. Вып. 11. С. 2263–2268. [Nikolaev V.I., Egorov V.M., Malygin G.A., Pulnev S.A. // Phys. Solid State. 2010. Vol. 52. N 11. P. 2419–2425.]
- [3] Николаев В.И., Пульнев С.А., Малыгин Г.А., Шнейзман В.В., Никаноров С.П. // ФТТ. 2008. Т. 50. Вып. 11. С. 2079–2083. [Nikolaev V.I., Pulnev S.A., Malygin G.A., Shpeizman V.V., Nikanorov S.P. // Phys. Solid State. 2008. Vol. 50. N 11. P. 2170–2174.]
- [4] Jani J., Leary M., Subic A. // J. Intelligent Material Systems and Structures. 2017. Vol. 28. N 13. P. 1699–1718.
- [5] Jani J., Leary M., Subic A., Gibson M. // Materials and Design. 2014. Vol. 56. P. 1078–1113.
- [6] Nespoli A., Besseghini S., Pittaccio S., Villa E., Viscuso S. // Sensors and Actuators A: Phys. 2010. A. 158. P. 149–160.
- [7] Koh J. // Materials. 2018. Vol. 11. P. 2324. P. 1–16. doi:10.3390
- [8] Boyraz P., Runge G., Raatz A. // Actuators. 2018. Vol. 7. N 48. P. 1–21. doi:10.3390
- [9] Kawate S., Chethan K., Keni G., Pai A., Padmaraj N. // Intern. J. Engineer. Technol. 2018. Vol. 7. N 4. P. 2172–2177.
- [10] Naresh C., Bose C., Rao P. // Mater. Sci. Engineer. 2016. Vol. 149. P. 012054.
- [11] Прядко А.И., Чикиряка А.В., Пульнев С.А. // ЖТФ. 2019. Т. 89. Вып. 4. С. 550–555.
- [12] Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.
- [13] Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. 216 с.
- [14] Математическая энциклопедия / Гл. ред. И.М. Виноградов. М.: Советская энциклопедия. Т. 4. 1984.
- [15] Дзядык В.К. Введение в теорию равномерного приближения функций полиномами. М.: Наука, 1977. 514 с.