

**Теоретический анализ работы силовозбудителя с рабочим телом в виде стержня из сплава с памятью формы и упругим телом смещения.**

**Экстер Никита Михайлович**

*Студент (специалист)*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,  
Механико-математический факультет, Кафедра теории пластичности, Москва, Россия  
*E-mail: ekster2000@inbox.ru*

Принцип работы силовозбудителей многократного действия с рабочим телом из сплавов с памятью формы (СПФ) основан на способности этих материалов генерировать так называемые реактивные напряжения при нагреве и соответствующем обратном термоупругом фазовом превращении в стесненном состоянии (рабочий ход) и возвращении в исходное положение за счет накопленных деформаций прямого термоупругого фазового превращения при охлаждении, происходящем под действием усилий со стороны элемента смещения (холостой ход).

Следует особо выделить ситуацию, при которой полное прямое превращение при охлаждении в течение холостого хода приводит рабочий элемент силовозбудителя к начальному деформированному состоянию. Такая ситуация свидетельствует о возможности реализации замкнутого двойного эффекта памяти формы (two-way shape memory effect — TWSME) [1, 2, 3]. В этом случае выполняется условие полной кинематической управляемости, согласно которому любое положение системы в рамках определенных пределов, соответствующих полностью аустенитному и полностью мартенситному состояниям материала рабочего тела, может быть достигнуто изменением только температуры рабочего тела без изменения механических воздействий.

Результаты численного моделирования термомеханического поведения силовозбудителей приведены в работах [4, 5, 6]. Варианты аналитического и, как правило, качественного описания соответствующих процессов изложены в [7, 8]. Наиболее подробно исследованы приводы с рабочими телами в виде витых пружин [9, 10, 11, 12, 13] и торсионных силовозбудителей [14, 15, 16] из СПФ.

Меньше публикаций посвящено анализу поведения приводов с рабочим телом в виде тонких пленок [3, 17] или стержней (проволоки) [4, 18, 19] из СПФ. В [18] процесс деформирования рабочего тела силовозбудителя описан в рамках простейшей модели линейного деформирования СПФ при фазовых превращениях, не учитывающей эффекты мартенситной неупругости и нелинейность процесса фазового деформирования этих материалов. В [19] проанализировано поведение манипулятора, т.е. привода, обеспечивающего соответствующие перемещения без полезной нагрузки, с рабочим телом из СПФ.

Целью настоящей работы является аналитическое исследование поведения линейного силовозбудителя многократного действия с рабочим телом в виде стержня из СПФ, соединенного последовательно с упругим элементом смещения. Решается актуальная задача описания поведения силовозбудителя в рамках недавно опубликованной объединенной модели деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях [20, 21], которая в отличие от известных аналогов качественно и количественно правильно описывает уникальные термомеханические свойства СПФ, включая эффект ориентированного превращения [22]. Правильный учет этого эффекта чрезвычайно важен, поскольку позволяет определить условия реализации при работе силовозбудителя замкнутого двойного эффекта памяти формы [1, 2, 3].

**Источники и литература**

- 1) Мовчан А.А., Казарина С.А. Конструктивный двухпутевой эффект памяти формы, основанный на явлении ориентированного превращения // Проблемы машиностроения и надежности машин 1998. № 1. С. 55—60.
- 2) Wang Z.G., Zu X.T., Feng X.D., Zhu S., Bao J.W., Wang L.M. Characteristics of two-way shape memory TiNi springs driven by electrical current // Materials & Design. 2004. V. 25. N 8. P. 699—703.
- 3) Gill J.J., Ho K., Carman G.P. Three-dimensional thin-film shape memory alloy microactuator with two-way effect // Journal of Microelectromechanical Systems. 2002. V. 11. N 1. P. 68—77.
- 4) Solomou A.G., Machairas T.T., Saravanos D.A. A coupled thermomechanical beam finite element for the simulation of shape memory alloy actuators // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2014. V. 25. N 7. P. 890—907.
- 5) Hartl D.J., Mooney J.T., Lagoudas D.C., Calkins F.T., Mabe J.H. Use of a Ni60Ti shape memory alloy for active jet engine chevron application: II. Experimentally validated numerical analysis // Smart Materials and Structures. 2010. V. 19. N 1. Art. N 015021.
- 6) Mohd J., Huang S., Leary M., Subic A. Numerical modeling of shape memory alloy linear actuators // Computational Mechanics 2015. V. 56. N 3. P. 443—461.
- 7) Ren Y., Sun S. An analytical model for shape memory alloy fiber-reinforced composite thin-walled beam undergoing large deflection // Advances in Mechanical Engineering. 2015. V. 7. N 3. P. 1—14.
- 8) Ahn K.K., Kha N.B. Modeling and control of shape memory alloy actuators using Preisach model, genetic algorithm and fuzzy logic // Mechatronics. 2008. V. 18. N 3. P. 141—152.
- 9) Летенков О.В., Филиппов Д.А. Расчет системы привода: пружина из материала с эффектом памяти формы — контрпружина // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. Т. 53. № 11—4. С. 77—81.
- 10) Мовчан А.А., Мозафари А., Казарина С.А. Анализ работы активатора с пружиной из сплава с памятью формы // Известия вузов. Авиационная техника. 1999. № 4. С. 20—23.
- 11) Wang Z.G., Zu X.T., Feng X.D., Zhu S., Bao J.W., Wang L.M. Characteristics of two-way shape memory TiNi springs driven by electrical current // Materials & Design 2004. V. 25. N 8. P. 699—703.
- 12) Shimoga G., Kim T.-H., Kim S.-Y. An intermetallic NiTi-based shape memory coil spring for actuator technologies // Metals. 2021. V. 11. Art. N 1212.
- 13) Koh J. Design of shape memory alloy coil spring actuator for improving performance in cyclic actuation // Materials. 2018. V. 11. Art. N 2324.
- 14) Мовчан А.А., Ньют С., Семенов В.Н. Проектирование силовозбудителя крутящего момента из сплава с памятью формы // Труды ЦАГИ. 2004. Вып. 2664. С. 220—230.
- 15) Prahlad H., Chopra I. Modeling and experimental characterization of SMA torsional actuator // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2007. V. 18. N 29. P. 29—38.
- 16) Stroud H., Hartl D. Shape memory alloy torsional actuators: a review of applications, experimental investigations, modeling, and design // Smart Materials and Structures. 2020. V. 29. Art. N 113001.

- 17) Krulevitch P., Lee A.P., Ramsey P.B., Trevino J.C., Hamilton J., Northrup M.A. Thin film shape memory alloy microactuators // Journal of Microelectromechanical Systems. 1996. V. 5. N 4. P. 270–282.
- 18) Мовчан А.А., Мозафари А. Поведение актуатора, содержащего стержень из сплава с памятью формы и упругий элемент смещения // Механика композиционных материалов и конструкций. 1997. Т. 3. № 2. С. 87–100.
- 19) Мовчан А.А., Экстер Н.М. Актуатор с последовательным соединением стержня из сплава с памятью формы и упругого элемента смещения // Механика композиционных материалов и конструкций. 2021. Т. 27. № 2. С. 169–190.
- 20) Мовчан А.А. Феноменологическая модель изменения фазово-структурных деформаций в сплавах с памятью формы // Известия РАН. Механика твердого тела. 2020. № 4. С. 140–151.
- 21) Мовчан А.А. Модель неупругого деформирования сплавов с памятью формы // Деформация и разрушение материалов. 2021. № 3. С. 8–17.
- 22) Беляев С.П., Ермолаев В.А., Кузьмин С.Л., Лескина М.Л., Лихачев В.А., Пульнев С.А. Деформация ориентированного превращения и эффект памяти формы в материалах с термоупругим и взрывным характером превращения // Физика металлов и металловедение. 1991. Т. 63. Вып. 8. С. 171–175.