

УДК 539.3

Расчет перспективных конструкций актюаторов

С.С. Гаврюшин¹, А. Макмиллан², А.С. Николаева¹, Т.Б. Подкопаева¹¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1² Университет Глиндор, Рэксем, Великобритания, Молд ул.

Calculations of Actuator Promising Designs

S.S. Gavryushin¹, A. McMillan², A.S. Nikolaeva¹, T.B. Podkopaeva¹¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1² Glyndwr University, Mold Road, Wrexham, Great Britain

e-mail: gss@bmstu.ru, a.mcmillan@glyndwr.ac.uk, nikolaeva@bmstu.ru, podkopaevat@mail.ru



Расчет конструкций актюаторов представляет собой актуальную задачу. Требуется создание новых конструкций актюаторов с улучшенными характеристиками. Для расчета актюатора сложной формы использован метод конечных элементов. Решение выполнено в среде конечно-элементного программного комплекса Abaqus. Результатами расчета являются упругая характеристика актюатора и его деформированная форма. Проведено сравнение результатов расчета для актюаторов различных размеров. Предложена новая конструкция термобиметаллического актюатора в виде осесимметричного пологого купола с язычком U-образной формы, «прохлопывающая» при достижении критической температуры. Слои биметалла у пологого купола и язычка расположены с противоположных сторон, что позволяет увеличить полезное перемещение характерных точек актюатора. Описанная конструкция актюатора и разработанная методика расчета рекомендуются для внедрения в практику расчета и проектирования актюаторной элементной базы.

Ключевые слова: актюатор, тонкостенная оболочка, большие перемещения, нелинейное деформирование, «прохлопывание».



Actuator calculation is a problem of current interest. It is required to develop new actuator designs with better performance. The finite element method was used for complex shape bimetallic actuator calculation. The algorithm was implemented in Abaqus finite element software. The actuator elastic characteristic and deformed shape are the results of the calculation. Calculation results for different size actuators were compared. A new design of a thermo-bimetallic actuator consisting of a shallow dome with a U-shaped tongue was described. It deforms with a «snap-through» when the temperature reaches a critical level. The layers of bimetal at the shallow dome and tongue are placed on the opposite sides, making possible the maximization of displacement of the actuator characteristic points. The proposed actuator design and the developed calculation methodology can be recommended for the implementation to the calculation practice and actuator element base development.

Keywords: actuator, thin-walled shell, large displacements, nonlinear deformation, «snap-through».

Биметаллические актюаторы активно используются в электротехнических, регулирующих, предохранительных и других системах [1]. Для эффективной работы актюатор должен быть спроектирован так, чтобы совершать большие

перемещения при невысоких затратах энергии и быть низко инерционным. Он должен перемещаться из одного состояния в другое с минимальной задержкой в промежуточных состояниях. Указанными свойствами обладают упру-

гие оболочечные актюаторы с эффектом «прохлопывания»: у них два (или более) устойчивых состояния, переход от одного из которых к другому осуществляется при небольших внешних воздействиях. Анализ механического поведения таких актюаторов является сложной задачей, потому что небольшие изменения в нагрузке вызывают большие перемещения: поведение таких оболочек является нелинейным.

Цель данной статьи — разработка новой конструкции термометаллического актюатора.

Упругая характеристика осесимметричного актюатора показана на рис. 1. При нагревании центральная точка актюатора перемещается согласно ветви упругой характеристики, ограниченной точкой *A*, далее происходит скачкообразное изменение деформированной формы (до точки *B*). При охлаждении центральная точка актюатора перемещается согласно ветви *BC* упругой характеристики, в точке *C* происходит скачкообразное изменение деформированной формы (до точки *D*).

Теория нелинейного деформирования тонкостенных механических конструкций значительно развита. Нелинейное поведение тонкостенных оболочек с эффектом «прохлопывания» описывается в работах [2, 3]. Недавние исследования [4–6] описывают численные алгоритмы для анализа нелинейного деформирования.

Данная работа посвящена расчету актюаторов, основанных на биметаллическом эффекте [6]. Такие актюаторы состоят из двух слоев, выполненных из материалов с различными коэффициентами линейного теплового расширения (КЛТР) и прочно соединенных друг с другом. Слой биметалла с большим КЛТР называют активным, с меньшим — пассивным. При нормальной температуре слои имеют одинаковую длину. При воздействии температуры слои

удлиняются. Активный слой удлиняется интенсивнее, чем пассивный, поэтому слой с большим КЛТР подвергается сжимающим усилиям, а слой с меньшим КЛТР — растягивающим. Возникающие в сечении биметалла напряжения распределяются неравномерно, возникают деформации, и конструкция изгибается.

Алгоритм расчета математической модели осесимметричного актюатора дискретного действия в виде полусферической оболочки постоянной толщины, основанная на теории упругих тонкостенных оболочек Рейсснера, был реализован в виде авторской программы на языке С [7]. Для решения нелинейной задачи был использован метод смены подпространства управляющих параметров, разработанный С.С. Гаврюшиным, и метод продолжения по параметру, разработанный Н.В. Валишвили [8].

В данной статье представлена методика расчета биметаллического актюатора сложной формы (рис. 2) с целью определения его упругой характеристики и деформированной формы. Актюатор состоит из двух слоев, характеристики которых приведены ниже.

	1-й слой	2-слой
Материал	24ХН	36Х
Толщина, мм	0,1	0,1
Модуль упругости, ГПа	190	150
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3
КЛТР, 10^6 , $1/^\circ\text{C}$	18	1

Расчет выполнен с использованием метода конечных элементов [9] в среде конечно-элементного программного комплекса Abaqus. В силу симметрии рассматривалась половина актюатора. Граничные условия показаны на рис. 3.

Модель была разбита на четырехузловые двухслойные оболочечные конечные элементы с шестью степенями свободы в каждом узле (рис. 4). Выбранные элементы позволяют учитывать влияние температуры на деформацию.

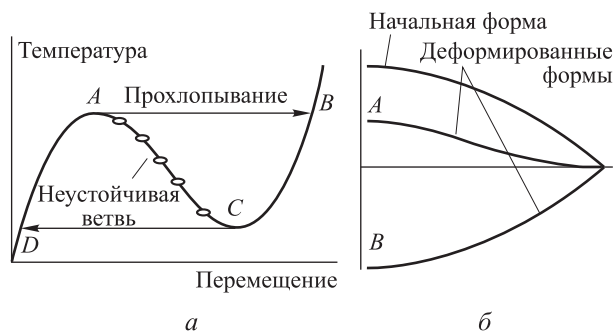


Рис. 1. Схематичное изображение дискретной упругой характеристики (а) и деформированной формы (б) осесимметричного актюатора

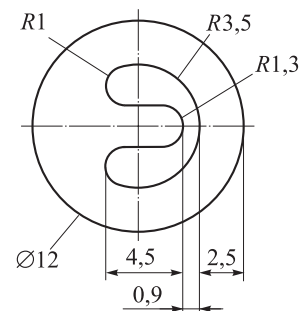


Рис. 2. Геометрические размеры биметаллического диска сложной формы

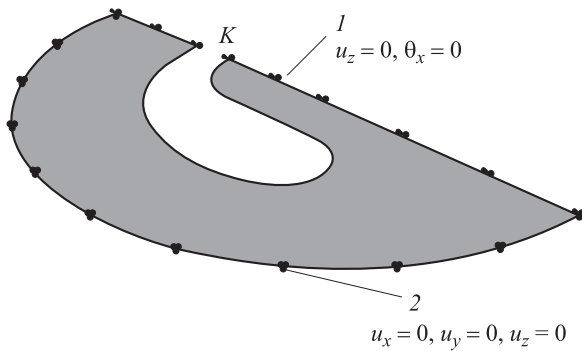


Рис. 3. Математическая модель актюатора сложной формы:
1 — условия симметрии: $u_z = 0, \theta_x = 0$;
2 — шарниры: $u_x = 0, u_y = 0, u_z = 0$

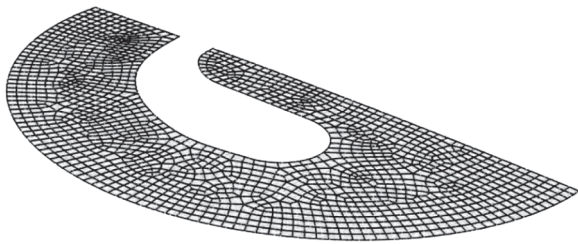


Рис. 4. Конечно-элементная модель актюатора сложной формы

Конечная модель состоит из 930 элементов и содержит 2 967 узлов.

Нелинейная задача решалась итерационным методом Ньютона с линеаризацией на каждом шаге. В качестве параметра продолжения была выбрана температура. В результате расчета получена упругая характеристика актюатора, т. е. зависимость перемещения точки K язычка актюатора (эта точка совершает наибольшее перемещение) от температуры (рис. 5). Участок АВ соответствует «прохлопыванию» оболочки: при температуре 35 °С перемещение точки K составляет 0,206 мм (рис. 6). При температуре 124 °С язычок актюатора начинает перемещаться вверх, что сокращает полезное перемещение точки K.

Проведено сравнение результатов расчета для актюаторов различной толщины. На рис. 7 приведен график зависимости наибольшего

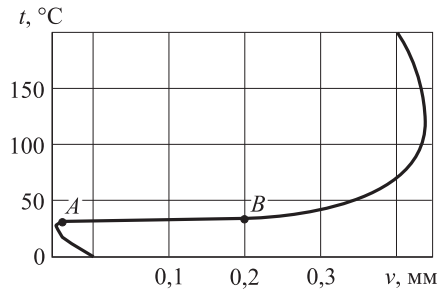


Рис. 5. Упругая характеристика актюатора

перемещения актюатора (перемещения точки K) от его толщины при температуре 80 °С. Значение перемещения уменьшается с увеличением толщины оболочки.

Таким образом, данная методика позволяет получать упругие характеристики и деформированные формы актюаторов сложной формы и может быть эффективно использована для анализа актюаторной элементной базы.

Устройства с термобиметаллическими осесимметричными актюаторами обладают рядом недостатков:

- ограниченная величина реализуемых перемещений (в том числе полезных перемещений, реализуемых при хлопке);
- нестабильная температура срабатывания из-за высоких периферийных напряжений, в отдельных случаях превышающих предел упругости;
- появление трещин на периферии актюатора при многократных переключениях;
- со временем перестают обеспечивать требуемые контактные усилия;
- возникновение дребезга (многократных неконтролируемых замыканий и размыканий контактов).

Для устранения недостатков были предложены следующие способы:

- создание актюаторов с усложненной геометрией (сферические термобиметаллические диски [10, 11] с выпуклой щелкающей лопастью с П-образным выступом и U-образным язычком;

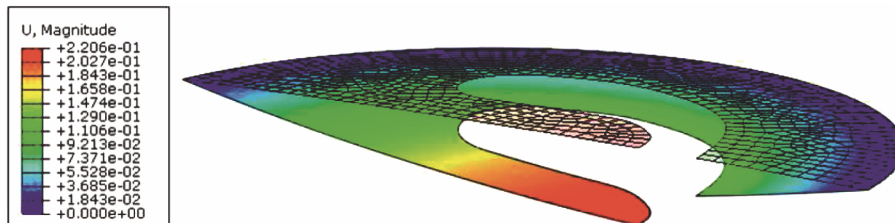


Рис. 6. Цветографическая диаграмма перемещений при температуре 35 °С

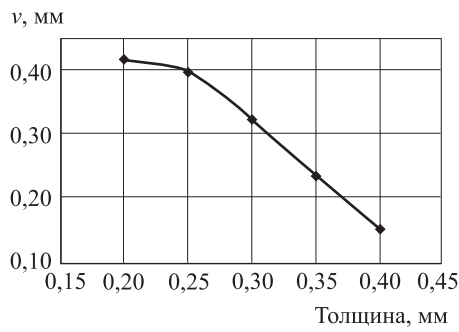


Рис. 7. Зависимость полезного перемещения актюатора от его толщины

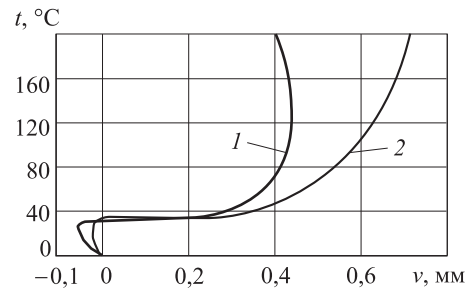
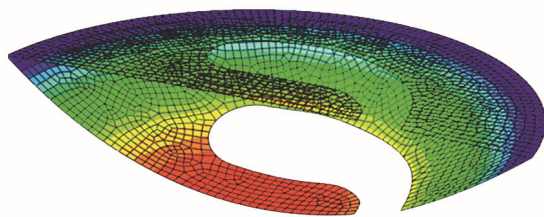
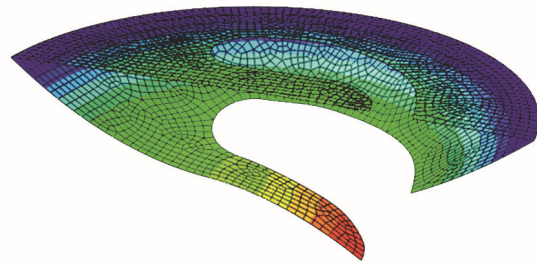


Рис. 8. Сравнение упругих характеристик актюаторов:
1 — существующая конструкция;
2 — предложенная конструкция



a



б

Рис. 9. Деформированные формы актюаторов:
a — существующая конструкция; *б* — предложенная конструкция

• создание актюаторов с прорезями, предназначенными для снижения напряжений в локальных зонах диска и увеличения эффективного перемещения его характерных точек [12].

Предложена новая конструкция термобиметаллического актюатора с эффектом «прохлопывания», с помощью которой становится возможным варьировать величины полезного перемещения свободного края щелкающего язычка и контактного усилия, а также устранить явление дребезга. Эта конструкция состоит из двух сегментов, соединенных друг с другом сваркой или клепкой: осесимметричного пологого купола с отверстием и пластинки продолговатой формы (язычка). Активные слои сегментов находятся на противоположных сторонах, что позволяет существенно увеличить полезные перемещения характерных точек актюатора. Проведено сравнение работоспособности предложенной конструкции с существующими переключателями. Значения полезных перемещений характерных точек актюатора новой конструкции превышают значения полезных перемещений актюаторов существующих конструкций [12] (рис. 8).

Деформированные формы конструкций показаны на рис. 9.

В предложенной конструкции значение полезного перемещения выше, так как перемещения купола и язычка складываются, а не вычитаются, как в существующей конструкции.

Выводы

1. Предложенная методика позволяет получать упругие характеристики и деформированные формы актюаторов сложной формы.

2. Значение перемещения характерной точки актюатора уменьшается с увеличением толщины оболочки.

3. Предложена новая конструкция термобиметаллического актюатора. Показано, что значения полезных перемещений характерных точек актюатора новой конструкции превышают значения полезных перемещений актюаторов существующих конструкций.

Таким образом, предложенная конструкция актюатора и разработанная методика расчета рекомендуются для внедрения в практику расчета и проектирования актюаторной элементной базы.

Литература

- [1] Тиняков Ю.Н., Милешин С.А., Андреев К.А., Цыганков В.Ю. Анализ конструкций зарубежных прототипов датчиков давления. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2011, № 9. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/219081.html> (дата обращения 20 апреля 2015).
- [2] Григолюк Э.И., Лопаницын Е.А. Конечные прогибы, устойчивость и закритическое поведение тонких пологих оболочек. Москва, Изд-во МГТУ «МАМИ», 2004. 162 с.
- [3] Попов Е.П. Явление большого перескока в упругих системах и расчет пружинных контактных устройств. *Инженерный сборник*, 1948, № 5, с. 62–92.
- [4] Bich D.H., Tung H.V. Non-linear axisymmetric response of functionally graded shallow spherical shells under uniform external pressure including temperature effects. *International Journal of Nonlinear Mechanics*, 2011, vol. 46, no. 9, pp. 1195–1204.
- [5] Li Q.S., Liu J., Tang J. Buckling of shallow spherical shells including the effects of transverse shear deformation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2003, vol. 45, no. 9, pp. 1519–1529.
- [6] Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. *Численный анализ элементов конструкций машин и приборов*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 479 с.
- [7] Гаврюшин С.С. Численное моделирование процессов нелинейного деформирования тонких упругих оболочек. *Математическое моделирование и численные методы*, 2014, № 1, с. 115–130.
- [8] Валишвили Н.В. *Методы расчета оболочек вращения на ЭЦВМ*. Москва, Машиностроение, 1976. 278 с.
- [9] Агапов В. П. *Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости конструкций*. Москва, Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2004. 248 с.
- [10] Ксенофонтов П.В., Акулов А.С., Винницкий А.Ф. *Терморегулятор*. Пат. 2067783 РФ, 1996, бюл. № 28, 6 с.
- [11] Певзнер М.Г. *Термобиметаллическое реле*. Пат. 2069024 РФ, 1996, № 31, с. 5.
- [12] Taylor J.C. *Snap acting thermally responsive actuators*. Patent US no. 4160226, 1979. 8 с.

References

- [1] Tiniakov Yu.N., Mileschin S.A., Andreev K.A., Tsygankov V.Iu. Analiz konstruktssii zarubezhnykh prototipov datchikov davleniia [Analysis of the structures of foreign prototypes of pressure sensors]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education of the Bauman MSTU]. 2011, № 9. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/219081.html> (accessed 20 April 2015).
- [2] Grigoliuk E.I., Lopanitsyn E.A. *Konechnye progiby, ustoichivost' i za-kriticheskoe povedenie tonkikh pologikh obolochek* [End deflection resistance and pro-critical behavior of thin shallow shells]. Moscow, MGTU «MAMI» publ., 2004. 162 p.
- [3] Popov E.P. Iavlenie bol'shogo pereskoka v uprugikh sistemakh i raschet pruzhinnykh kontaktnykh ustroystv [The phenomenon of a large jump in elastic systems and calculation of the spring contact devices]. *Inzhenernyi sbornik* [Engineering collection]. 1948, no. 5, pp. 62–92.
- [4] Bich D.H., Tung H.V. Non-linear axisymmetric response of functionally graded shallow spherical shells under uniform external pressure including temperature effects. *International Journal of Nonlinear Mechanics*, 2011, vol. 46, no. 9, pp. 1195–1204.
- [5] Li Q.S., Liu J., Tang J. Buckling of shallow spherical shells including the effects of transverse shear deformation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2003, vol. 45, no. 9, pp. 1519–1529.
- [6] Gavriushin S.S., Baryshnikova O.O., Boriskin O.F. *Chislennyi analiz elementov konstruktssii mashin i priborov* [Numerical analysis of structural elements of machines and devices]. Moscow, Bauman Press, 2014. 479 p.
- [7] Gavriushin S.S. Chislennoe modelirovanie protsessov nelineinogo deformirovaniia tonkikh uprugikh obolochek [Numerical simulation of nonlinear deformation of thin elastic shells]. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody* [Mathematical Modeling and Computational Methods]. 2014, no. 1, pp. 115–130.

- [8] Valishvili N.V. *Metody rascheta obolochek vrashcheniia na EtsVM* [Methods for calculating the shells rotation digital computer]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1976. 278 p.
- [9] Agapov V. P. *Metod konechnykh elementov v statike, dinamike i ustoiichivosti konstruksii* [The finite element method in statics, dynamics and stability of structures]. Moscow, Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov publ., 2004. 248 p.
- [10] Ksenofontov P.V., Akulov A.S., Vinnitskii A.F. *Termoreguliator* [Thermoregulator]. Patent RF, no. 2067783, 1996.
- [11] Pevzner M.G. *Termobimetallichesкое реле* [Thermo bimetallic relay]. Patent RF, no. 2069024, 1996.
- [12] Taylor J.C. *Snap acting thermally responsive actuators*. Patent US, no. 4160226, 1979.

Статья поступила в редакцию 25.05.2015

Информация об авторах

ГАВРЮШИН Сергей Сергеевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: gss@bmstu.ru).

МАКМИЛЛАН Алисон (Рэксем) — доктор технических наук, профессор. Университет Глиндор (Рэксем, Великобритания, Молд ул., e-mail: a.mcmillan@glyndwr.ac.uk).

НИКОЛАЕВА Анна Сергеевна (Москва) — аспирант кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: nikolaeva@bmstu.ru).

ПОДКОПАЕВА Татьяна Борисовна (Москва) — старший преподаватель кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: podkopaevat@mail.ru).

Information about the authors

GAVRYUSHIN Sergey Sergeevich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Department of Computer Systems of Manufacture Automation. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: gss@bmstu.ru).

MCMILLAN Alison (Wrexham) — Doctor of Science (Eng.), Professor. Glyndwr University (Mold Road, Wrexham, Great Britain, e-mail: a.mcmillan@glyndwr.ac.uk).

NIKOLAEVA Anna Sergeevna (Moscow) — Post Graduate, Department of Applied Mechanics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: nikolaeva@bmstu.ru).

PODKOPAEVA Tatiana Borisovna (Moscow) — Senior Lecturer, Department of Applied Mechanics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: podkopaevat@mail.ru).