

УДК 539.4

DOI 10.33113/mkmk.ras.2019.25.04.563_573.08

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ТОЛСТОСТЕННОМ ЦИЛИНДРЕ ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ, НАХОДЯЩЕМСЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ, С УЧЕТОМ РАЗНОСОПРОТИВЛЯЕМОСТИ*

Саганов Е.Б.

*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)», г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена численному моделированию процесса раздачи и обжатия толстостенной цилиндрической оболочки из сплава с памятью формы (СПФ) в режиме мартенситной неупругости. Процессы раздачи и обжатия происходят под действием монотонно возрастающего внутреннего или внешнего давлений.

Рассмотрение задачи ведется в рамках модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях. Полученное решение учитывает разностойкость этих сплавов растяжению-сжатию. Решение получено для случаев плоско-напряженного и плоско-деформированного состояний.

Численное моделирование выполнено в программном комплексе Simulia Abaqus с применением технологии пользовательского материала. В качестве параметра вида напряженного состояния используется параметр, связанный с третьим инвариантом девиатора напряжений. В рамках работы принимается линейная зависимость материальных констант от параметра вида напряженного состояния.

Моделирование раздачи и обжатия толстостенной цилиндрической оболочки выполнено в трехмерной по пространству постановке с учетом осевой симметрии задачи.

В рамках работы получены эпюры напряжений по сечению оболочки для различных значений давления. Установлено, что в процессе нагружения напряжения по сечению меняются немонотонно, а само распределение напряжений имеет нелинейную зависимость от радиуса. Для обоих случаев действия давления параметр вида напряженного состояния имеет неоднородное распределение по сечению оболочки. Также получена зависимость смещений точек на внутренней и внешней поверхности оболочки от величины приложенного давления.

Результаты, полученные в ходе выполнения работы, могут быть успешно использованы при проектировании термомеханических соединительных муфт из СПФ.

Ключевые слова: сплавы с памятью формы; мартенситная неупругость; разностойкость; цилиндр; давление

SOLUTION OF THE PROBLEM OF A THICK-WALLED CYLINDER UNDER PRESSURE FROM SHAPE MEMORY TAKING INTO ACCOUNT OF TENSION-COMPRESSION ASYMETRY

Saganov E.B.

Institute of Applied Mechanics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

* Работа выполнена в рамках государственной темы, государственная регистрация номер АААА-А17-117032010136-3 при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-01-00216_а).

ABSTRACT

The work is devoted to numerical modeling of the process of expansion and compression of a thick-walled cylindrical shell made of a shape memory alloy (SMA) in the martensitic inelasticity mode. The processes of expansion and compression occur under the influence of monotonically increasing internal or external pressures.

The problem is considered within the framework of the model of nonlinear deformation of SMA in phase and structural transformations. The resulting solution takes into account tension-compression asymmetry of these alloys. The solution is obtained for cases of plane-stress and plane-strain states.

Numerical modeling was performed in the Simulia Abaqus using user material technology. The parameter associated with the third invariant of the stress deviator is used as a parameter of the type of stress state. In the framework of the work, a linear dependence of material constants on the type parameter of the stress state is taken.

The distribution and compression of a thick-walled cylindrical shell was simulated in a three-dimensionally space-based formulation, taking into account the symmetry of the problem.

In the framework of the work, stress diagrams were obtained over the shell cross section for various pressure values. It was established that during loading the stresses across the cross section change nonmonotonically, and the stress distribution itself has a nonlinear dependence on the radius. For both cases of pressure, the parameter of the type of stress state has an inhomogeneous distribution over the cross section of the shell. The dependence of the displacements of points on the inner and outer shell surfaces from the value of the applied pressure is also obtained.

The results obtained during the work can be successfully used in the design of thermomechanical couplings from SMA.

Keywords: shape memory alloys; martensite inelasticity; tension-compression asymmetry; cylinder; pressure

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование устройств, принцип работы которых основан на использовании уникальных свойств СПФ [1] требует наличия достоверных решений краевых задач механики этих сплавов [2]. Однако, получение подобных решений затруднено ввиду объективной сложности определяющих соотношений, описывающих термомеханические процессы, протекающие в СПФ. Кроме этого, расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций, содержащих СПФ, осложняется фактом того, что эти сплавы являются разноспротивляющимися растяжению-сжатию и НДС как качественно, так и количественно зависит от вида напряженного состояния [3]. Аналитически могут быть решены только простейшие краевые задачи для СПФ в рамках простейших моделей их поведения [4].

Одним из подходов, позволяющим избежать отмеченных трудностей, является использование коммерческих пакетов конечно-элементного моделирования. Так, работа [5,6] посвящена конечно-элементному анализу актуаторов из СПФ. Моделирование выполнено в рамках моделей [7] и [8,9] соответственно. В [10] в рамках модели [11] выполнен расчет ячеистой цилиндрической оболочки из СПФ от действия осевого сжатия. Труды [12,13]

посвящены расчету адаптивных тросов из СПФ. Моделирование выполнено в рамках моделей [14,15] соответственно.

В отмеченных выше работах расчет НДС конструкций был выполнен без учета разнотолщинности СПФ. Однако в труде [16] приведено решение краевой задачи о сфере из СПФ, находящейся под действием внутреннего/внешнего давления и отмечена существенная зависимость НДС сферы от вида напряженного состояния. Численное моделирование выполнено в рамках модели [17-19], интегрированной в конечно-элементный комплекс Simulia Abaqus.

Данная работа посвящена расчету НДС толстостенной цилиндрической оболочки из СПФ, находящейся под действием внутреннего или внешнего давления. В [20,21] получены решения задач о поведении толстостенной цилиндрической оболочки из СПФ, материал которой претерпевает прямое термоупругое фазовое превращение под действием постоянного внутреннего давления [21] или постоянных внутреннего или внешнего давления и осевой силы [20]. Однако в этих работах нагружение в режиме мартенситной неупругости не рассматривается, эффект разнотолщинности СПФ не учитывается.

В данной работе моделируется процесс раздачи и обжатия оболочки в режиме мартенситной неупругости. Приведенное в работе решение учитывает зависимость НДС оболочки от вида напряженного состояния.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрение задачи раздачи и обжатия толстостенной цилиндрической оболочки из СПФ ведется в цилиндрической системе координат $r-\theta-z$. Внешний радиус оболочки равен $b=10$ мм, внутренний $a=5$ мм. Ниже приведена конечно-элементная модель (КЭМ) оболочки, выполненная с учетом симметрии задачи. При закреплении модели также использовались условия симметрии. На рис.1 отмечены точки замера перемещений.

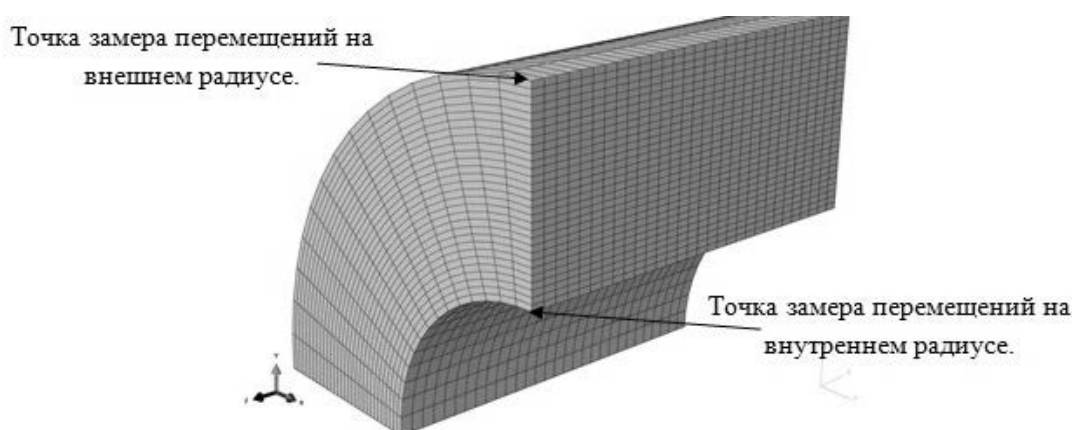


Рис.1. КЭМ оболочки.

Модель материала, применяемая при расчете НДС оболочки, приведена в [17-19]. Ее интеграция в конечно-элементный комплекс Simulia Abaqus выполнена в [16]. В рамках модели пользовательского материала предполагается аддитивное представление приращений полных деформаций, в случае их малости. Связь между компонентами приращений девиаторов напряжений и деформаций устанавливается следующим соотношением

$$d\sigma'_{ij} = 2Gd\varepsilon'_{ij} - \lambda\sigma'_{ij}\sigma'_{kl}d\varepsilon'_{kl},$$

$$\lambda = 9\rho_d(\mu_\sigma) \frac{G(q)^2}{\sigma_i^2} \frac{\Psi_2(\sigma_i)}{(1+3G(q)\rho_d(\mu_\sigma)\Psi_2(\sigma_i))},$$

$$\Psi_2(\sigma_i) = \frac{1}{\Gamma(\alpha(\mu_\sigma))} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0(\mu_\sigma)} \right)^{\alpha(\mu_\sigma)-1} \exp\left(\frac{-\sigma_i}{\sigma_0(\mu_\sigma)} \right) \frac{1}{\sigma_0(\mu_\sigma)}.$$

Здесь $d\sigma'_{ij}$, $d\varepsilon'_{ij}$ – девиатор приращений напряжений и деформаций, G – модуль сдвига СПФ в мартенситном фазовом состоянии, ρ_d – интенсивность кристаллографической деформации, σ_i – интенсивность напряжений, μ_σ – параметр вида напряженного состояния, $\Psi_2(\sigma_i)$ – плотность γ распределения интенсивности микронапряжений образца из СПФ в мартенситном фазовом состоянии, α , σ_0 – параметры материала, Γ – гамма функция.

Шаровая часть тензора приращений напряжений определяется, как приведено ниже

$$d\sigma_{kk} = K(q)d\varepsilon_{kk}.$$

Здесь $d\varepsilon_{kk}$ – первый инвариант тензора приращений деформаций.

Приращение компонент тензора напряжений вычисляется следующим образом

$$d\sigma_{ij} = \frac{1}{3}d\sigma_{kk} + d\sigma'_{ij}.$$

В работе предполагается линейная зависимость констант СПФ $\alpha(\mu_\sigma)$, $\sigma_0(\mu_\sigma)$, $\rho_d(\mu_\sigma)$ от параметра вида напряженного состояния. В качестве параметра вида напряженного состояния используется следующее соотношение [22]

$$\mu_\sigma = \frac{27 J_3}{2 \sigma_i^3}.$$

Здесь J_3 – третий инвариант девиатора напряжений.

Валидация пользовательской модели материала выполнена в [16].

В качестве статических граничных условий выступают величины внутреннего и внешнего давлений, приложенные к соответствующим поверхностям цилиндрической оболочки. Закрепление КЭМ является статически определяемым в случае рассмотрения задачи в плоско-напряженной постановке. В случае плоско-деформированного состояния КЭМ дополнительно закрепляется по торцам от осевых смещений.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

При численном моделировании использованы следующие значения материальных констант, для случая $\mu_\sigma = 1$ (одноосного растяжения): $\rho_d^t = 0.0608$, $\sigma_0^t = 27.4$ МПа, $\alpha^t = 6.45$, для случая $\mu_\sigma = -1$ (одноосного сжатия): $\rho_d^c = 0.02$, $\sigma_0^c = 18$ МПа, $\alpha^c = 16.08$ [3].

На рис.2а приведены кривые на случай замера перемещений на внутренних точках цилиндрической оболочки. Сплошная линия соответствует действию

внутреннего давления, штриховая – внешнего. Верхняя пара кривых получена на случай плоско-напряженного, нижняя – плоско-деформированного состояний. Правила расположения кривых на рис.2б соответствуют рис.2а.

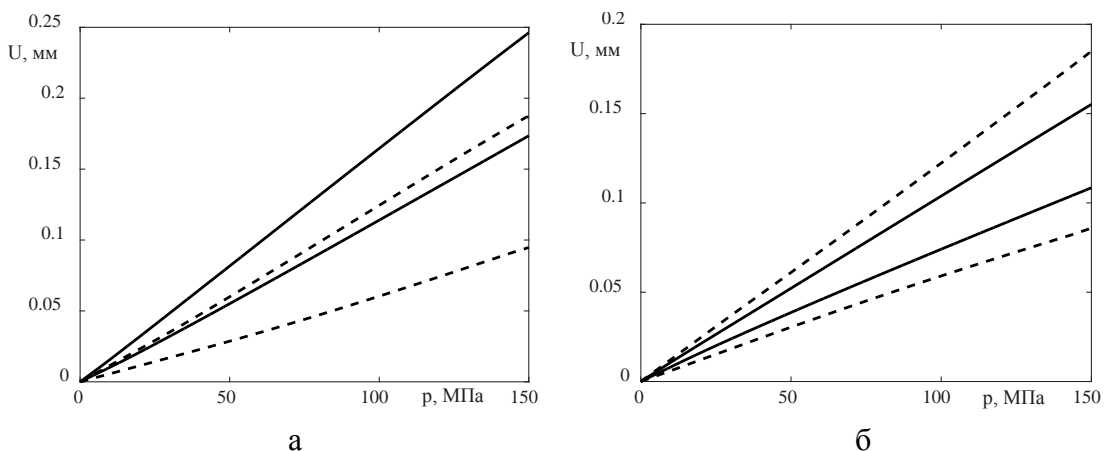


Рис.2. Зависимость $p - U$. а) внутренние точки; б) внешние точки.

Из приведенных рисунков видно, что как в случае действия внутреннего, так и внешнего давлений перемещения реперных точек цилиндрической оболочки больше при плоско-напряженной постановке задачи. При этом зависимости $U - p$ весьма близки к линейным.

Ниже представлены эпюры радиальных σ_r и кольцевых σ_θ напряжений по сечению цилиндрической оболочки, построенные для различных значений p . Эпюры σ_r и σ_θ приведены только для случая плоско-напряженного состояния (ПНС). Решение, полученное для случая плоской деформации весьма близко к случаю ПНС. Ниже $\xi = r/b$ – безразмерный радиус оболочки.

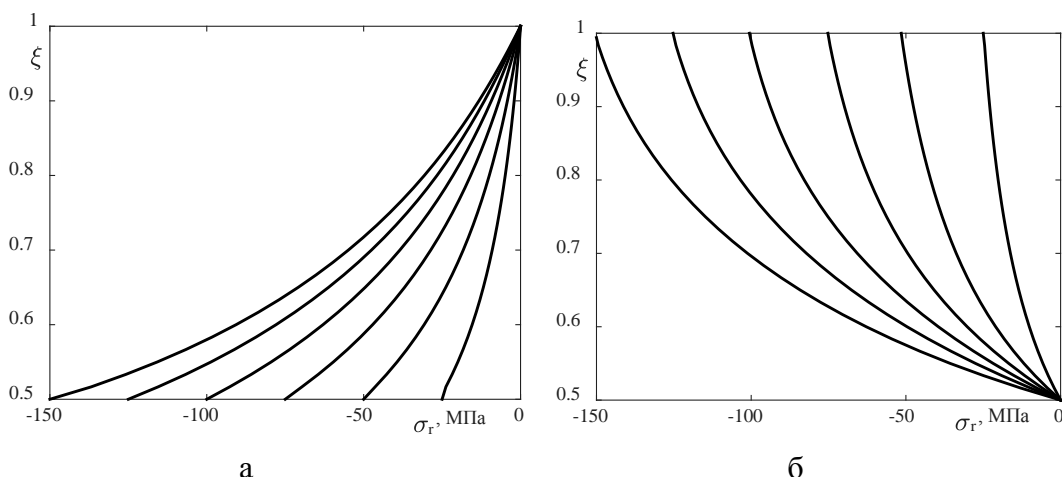


Рис.3. Эпюры $\sigma_r - \xi$. а) внутреннее давление, ПНС; б) внешнее давление, ПНС.

На рис.3а,б и 4б приведенные кривые соответствующие величине $p = 25, 50, 75, 100, 125, 150$ МПа справа налево, а на рис.4а слева направо. Как видно из приведенных рисунков распределения σ_r и σ_θ по сечению имеют нелинейный характер. Исходя из приведенных данных, можно заключить, что при увеличении p от 125 до 150 МПа наблюдается резкий рост $|\sigma_\theta|$ вблизи внутренней

поверхности оболочки. Распределение осевых напряжений σ_z при плоскодеформированном состоянии (ПДС) имеет нелинейный характер и в данной работе не приводится.

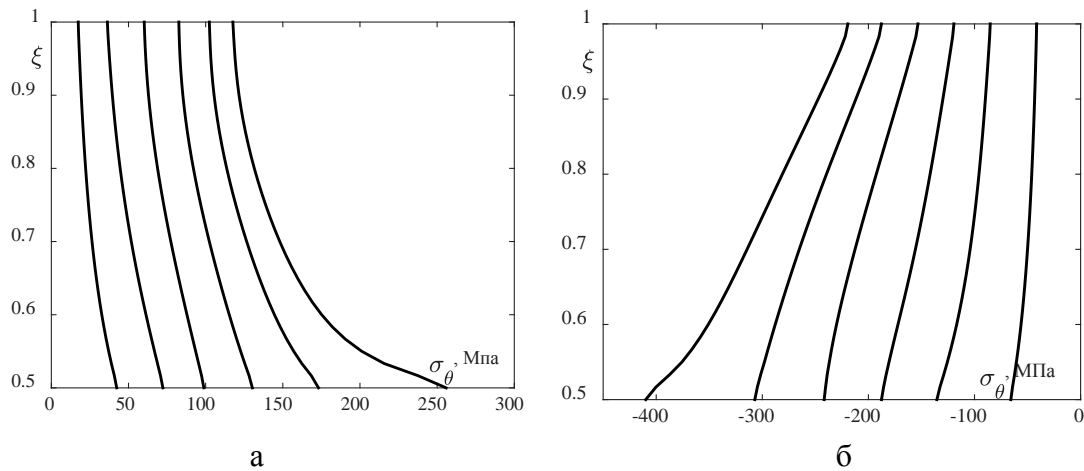


Рис.4. Эпюры $\sigma_\theta - \xi$. а) внутреннее давление, ПНС; б) внешнее давление, ПНС.

В ходе работы было установлено, что параметр вида напряженного состояния меняется в процессе нагружения немонотонно, а также имеет нелинейное распределение по сечению оболочки. Ниже представлены зависимости $p - \mu_\sigma$ для случаев ПНС и ПДС.

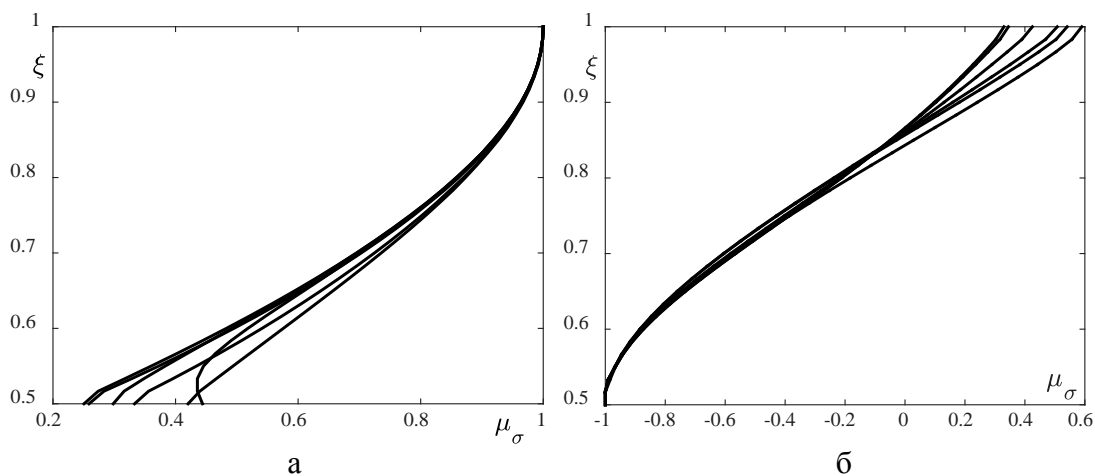


Рис.5. Зависимость $p - \mu_\sigma$. а) внутреннее давление, ПНС; б) внешнее давление, ПНС.

На рис.5а,б и 6б приведенные кривые соответствуют величине $p = 25, 50, 75, 100, 125, 150$ МПа слева направо. На рис.6а справа налево. Как видно из приведенных рисунков распределение μ_σ по сечению зависит от величины приложенного давления p .

В случае действия внутреннего давления как при ПНС, так и при ПДС параметр μ_σ принимает положительные значения. В случае ПНС отмечается рост μ_σ с ростом p вблизи внутреннего радиуса, а в случае ПДС убывании μ_σ почти для всех значений радиуса. На внешней поверхности оболочки в случае ПНС

напряженное состояние соответствует одноосному растяжению. Поэтому здесь $\mu_\sigma = 1$ независимо от значения p .

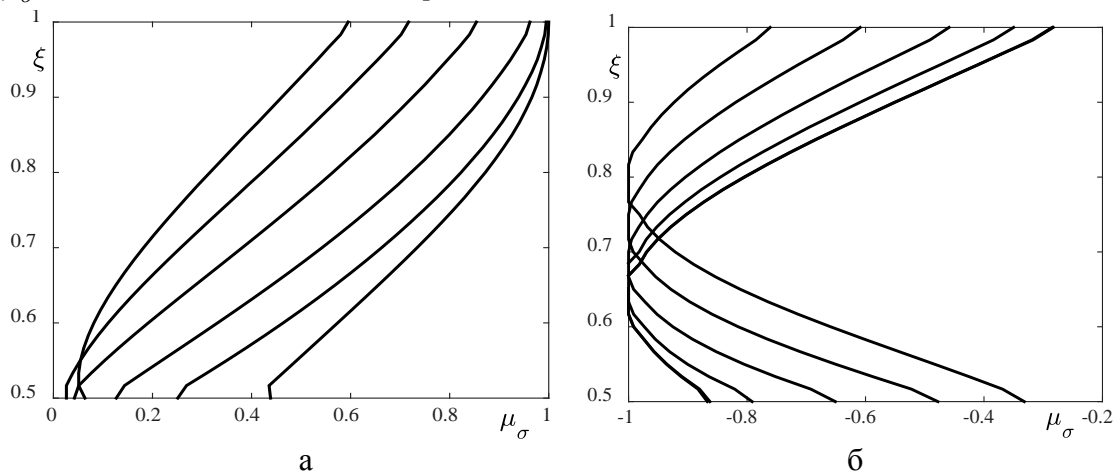


Рис.6. Зависимость $p - \mu_\sigma$. а) внутреннее давление, ПДС; б) внешнее давление, ПДС.

В случае действия внешнего давления при ПНС распределение μ_σ по сечению является знакопеременным. μ_σ вблизи внешней поверхности несколько возрастает с ростом нагрузки, а на внутренней поверхности, где имеет место состояние одноосного сжатия, $\mu_\sigma = -1$ не зависит от величины p . В случае ПДС μ_σ имеет только отрицательные значения и с ростом радиальной координаты меняется немонотонно, сначала убывая до значения $\mu_\sigma = -1$ в некоторой внутренней точке сечения, что соответствует состоянию одноосного сжатия, а потом возрастает, принимая максимальные (но по-прежнему отрицательные значения на внешней поверхности. Изменения величины μ_σ с изменением нагрузки свидетельствуют о том, что нагружение в данном случае является непропорциональным и к решению данной задачи с учетом разнотвердости СПФ не может быть применено положение об активных процессах пропорционального нагружения.

ВЫВОДЫ

В рамках работы выполнено численное моделирование процессов раздачи и обжатия толстостенной цилиндрической оболочки из СПФ в режиме мартенситной неупругости. Решение получено с учетом разнотвердости этих сплавов растяжению-сжатию в плоско-напряженной и плоскодеформированной постановках. Установлено, что в случае действия как внутреннего, так и внешнего давления при ПНС перемещения контрольных точек превышают перемещения при ПДС. Отмечено, что в процессе нагружения эпюры напряжений и параметра вида напряженного состояния зависят от величины приложенного давления, а сами распределения имеют нелинейный вид, а изменение параметра вида напряженного состояния носит немонотонный характер. К решению данной задачи нельзя применять положение об активных процессах пропорционального нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. *Эффект памяти формы*. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. – 216 с.
2. Мовчан А.А., Казарина С.А., Машихин А.Е., Мишустин И.В., Саганов Е.Б., Сафронов П.А. *Краевые задачи механики для сплавов с памятью формы // Ученые записки Казанского университета* – 2015. – Т.157. – С.97-110.
3. Мовчан А.А., Казарина С.А., Сильченко А.Л. *Экспериментальная идентификация модели нелинейного деформирования сплавов с памятью формы при фазовых и структурных превращениях // Деформация и разрушение материалов*. – 2018. – №12. – С.2-11.
4. Мовчан А.А. *Аналитическое решение задач о прямом и обратном превращении для сплавов с памятью формы // Известия АН. Механика твердого тела*. – 1996. – №4. – С.136-144.
5. Drahos P., Kutis V., Lenicky R. *SMA actuator with active clamp // Procedia Engineering*. – 2012. – Vol.48. – Pp.90-95.
6. Merzouki T., Duval A., Zineb T. *Finite element analysis of a shape memory alloy actuator for a micropump // Simulation Modeling Practice and Theory*. – 2012. – Vol.27. – Pp.112-126.
7. Boyd J.G., Lagoudas D.C. *Thermodynamical constitutive model for shape memory materials. part I. the monolithic shape memory alloy // International Journal of Plasticity*. – 1996. – Vol.12. – Iss.6. – Pp.805-842.
8. Chemisky Y., Duval A., Patoor E., Ben-Zineb T. *Constitutive model for shape memory alloys including phase transformation, martensitic reorientation and twins accommodation // Mechanics of Materials*. – 2011. – Vol.43. – Iss.7. – Pp.361-376.
9. Duval A., Haboussi M., Ben-Zineb T. *Modelling of localization and propagation of phase transformation in superelastic sma by a gradient nonlocal approach // International Journal of Solids and Structures*. – 2011. – Vol.48. – Iss.13. – Pp.1879-1893.
10. Нуштаев Д.В., Жаворонок С.И., Клышников К.Ю., Овчаренко Е.А. *Численно-экспериментальное исследование деформирования и устойчивости цилиндрической оболочки ячеистой структуры при осевом сжатии // Труды МАИ*. – 2015. – №82. – С.27.
11. Dhala S., Mishara S., Alankar A. *Three Dimensional Crystal Plasticity Finite Element simulation of notched tensile samples of pseudoelastic NiTi Shape Memory Alloys // Procedia Engineering*. – 2017. – Vol.173. – Pp.786-792.
12. Banderia E., Savi M., Monteiro P.Jr. *Finite element analysis of shape memory alloy adaptive trusses with geometrical nonlinearities // Archive of Applied Mechanics*. – 2006. – Vol.76. – Pp.133-144.
13. Alipour A., Kadkhodaei M., Ghaei A. *Finite element simulation of shape memory alloy wires using a user material subroutine: Parametric study on heating rate, conductivity, and heat convection // Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2015. – Vol.26. – Iss.5. – Pp.1-19.
14. Tobushi H., Iwanaga N., Tanaka K., Hori T., Sawada T. *Deformation behavior of Ni-Ti shape memory alloy subjected to variable stress and temperature // Continuum Mechanics and Thermodynamics*. – 1991. – Vol.3. – Iss.2. – Pp.79-93.
15. Brinson L.C. *One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable // Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 1993. – Vol.4. – Iss.2. – Pp.229-242.

16. Саганов Е.Б. Численное моделирование явления мартенситной неупругости в сплавах с памятью формы с учетом их разноспротивляемости // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2019. – Т.25. – №2. – С.281-294.
17. Мовчан А.А., Мовчан И.А., Сильченко Л.Г. Микромеханическая модель нелинейного деформирования сплавов с памятью формы при фазовых и структурных превращениях // Известия РАН. МТТ. – 2010. – №3. – С.118-130.
18. Мишустин И.В., Мовчан А.А. Моделирование фазовых и структурных превращений в сплавах с памятью формы, происходящих под действием немонотонно меняющихся напряжений // Известия РАН. МТТ. – 2014. – №1. – С.37-53.
19. Мовчан А.А., Мишустин И.В., Казарина С.А. Вариант микроструктурной модели деформирования сплавов с памятью формы // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – №5. – С.6-11.
20. Машихин А.Е., Мовчан А.А. Задача о прямом мартенситном превращении в толстостенном цилиндре из сплава с памятью формы // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2016. – №3. – С.100-114.
21. Машихин А.Е., Мовчан А.А. Краевые задачи термомеханики для цилиндра и сферы из сплава с памятью формы // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2017. – №3. – С.113-128.
22. Lexcellent Ch., Boubakar M., Bouvet Ch., Calloch S. About modeling the shape memory alloy behavior based on the phase transformation surface identification under proportional loading and anisothermal conditions // International Journal of Solids and Structures. – 2006. – Vol.43. – Pp.613-626.

REFERENCES

1. Likhachev V.A., Kuz'min S.L., Kamentseva Z.P. *Ehffekt pamyati formy*. Leningrad, Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta, 1987, 216 p.
2. Movchan A.A., Kazarina S.A., Mashihin A.E., Mishustin I.V., Saganov E.B., Safronov P.A. *Kraevye zadachi mekhaniki dlya splavov s pamyat'yu formy [Boundary-value problems of mechanics of shape memory alloy]*. Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta, 2015, Vol.157, Pp.97-110.
3. Movchan A.A., Kazarina S.A., Sil'chenko A.L. *Experimental Identification of a Nonlinear Deformation Model for a Shape Memory Alloy during Phase and Structural Transformations*. Russian Metallurgy (Metally), 2019, Vol.2019, No.4, Pp.301-308.
4. Movchan A.A. *Analytical solution of problems on the direct and inverse transformations in shape memory alloys*. Mechanics of Solids, 1996, Vol.31, No.4, Pp.116-123.
5. Drahos P., Kutis V., Lenicky R. *SMA actuator with active clamp*. Procedia Engineering, 2012, Vol.48, Pp.90-95.
6. Merzouki T., Duval A., Zineb T. *Finite element analysis of a shape memory alloy actuator for a micropump*. Simulation Modeling Practice and Theory, 2012, Vol.27, Pp.112-126
7. Boyd J.G., Lagoudas D.C. *Thermodynamical constitutive model for shape memory materials. part I. the monolithic shape memory alloy*. International Journal of Plasticity, 1996, Vol.12, Iss.6, Pp.805-842.

8. Chemisky Y., Duval A., Patoor E., Ben-Zineb T. *Constitutive model for shape memory alloys including phase transformation, martensitic reorientation and twins accommodation*. *Mechanics of Materials*, 2011, Vol.43, Iss.7, Pp.361-376.
9. Duval A., Haboussi M., Ben-Zineb T. *Modelling of localization and propagation of phase transformation in superelastic sma by a gradient nonlocal approach*. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, Vol.48, Iss.13, Pp.1879-1893.
10. Nushtaev D.V., Zhavoronok S.I., Klyshnikov K.Yu., Ovcharenko E.A. *Chislennoe eksperimental'noe issledovanie deformirovaniya i ustojchivosti tsilindricheskoj obolochki yacheistoj struktury pri osevom szhatii [Numerically experimental study of deformation and buckling cylindrical cellular shell under axial compression]*. *Trudy MAI*, 2015, Iss.82, Pp.27.
11. Dhala S., Mishara S., Alankar A. *Three Dimensional Crystal Plasticity Finite Element simulation of notched tensile samples of pseudoelastic NiTi Shape Memory Alloys*. *Procedia Engineering*, 2017, Vol.173, Pp.786-792.
12. Banderia E., Savi M., Monteiro P.Jr. *Finite element analysis of shape memory alloy adaptive trusses with geometrical nonlinearities*. *Archive of Applied Mechanics*, 2006, Vol.76, Pp.133-144.
13. Alipour A., Kadkhodaei M., Ghaei A. *Finite element simulation of shape memory alloy wires using a user material subroutine: Parametric study on heating rate, conductivity, and heat convection*. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2015, Vol.26, Iss.5, Pp.1-19.
14. Tobushi H., Iwanaga N., Tanaka K., Hori T., Sawada T. *Deformation behavior of Ni-Ti shape memory alloy subjected to variable stress and temperature*. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 1991, Vol.3, Iss.2, Pp.79-93.
15. Brinson L.C. *One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable*. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1993, Vol.4, Iss.2, Pp.229-242.
16. Saganov E.B. *CHislennoe modelirovanie yavleniya martensitnoj neuprugosti v splavakh s pamyat'yu formy s uchetom ikh raznosprotivlyaemosti [Numerical modeling of the phenomena of martensite inelasticity in shape memory alloys with account of their tension-compression asymetry]*. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*, 2019, Vol.25, No.2, Pp.281-294.
17. Movchan A.A., Movchan I.A., Sil'chenko L.G. *Micromechanical model of non-linear deformation of shape memory alloys under phase and structure transformation*. *Mechanics of Solids*, 2010, Vol.45, No.3, Pp.406-416.
18. Mishustin I.V., Movchan A.A. *Modeling of phase and structure transformations occurring in shape memory alloys under nonmonotonically varying stresses*. *Mechanics of Solids*, 2014, Vol.49, No.1, Pp.27-39.
19. Movchan A.A., Mishustin I.V., Kazarina S.A. *Microstructural Model for the Deformation of Shape Memory Alloys*. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2018, Vol.2018, Iss.4, Pp.316-321.
20. Mashikhin A.E., Movchan A.A. *Problem of Direct Martensite Transformation in a Thick-Walled Cylinder Made of Shape Memory Alloy*. *Mechanics of Solids*, 2016, Vol.51, No.3, Pp.321-333.
21. Mashikhin A.E., Movchan A.A. *Thermomechanical Boundary Problems for a Cylinder and Sphere Made of Shape Memory Alloy*. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2017, No.3, Pp.113-128.

22. LExcellent Ch., Boubakar M., Bouvet Ch., Calloch S. *About modeling the shape memory alloy behavior based on the phase transformation surface identification under proportional loading and anisothermal conditions*. International Journal of Solids and Structures, 2006, Vol.43, Pp.613-626.

Поступила в редакцию 01 ноября 2019 года.

Сведения об авторе:

Саганов Евгений Борисович – с.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, инж., ФТБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия, e-mail: saganoff@yandex.ru