

## О ВЫБОРЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОРИСТЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

© 2017

*А.Е. Волков*, доктор физико-математических наук, профессор*М.Е. Евард*, кандидат физико-математических наук, доцент*Е.Н. Япарова*, аспирант*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург (Россия)*

**Ключевые слова:** сплавы с памятью формы; моделирование; пористые материалы.

**Аннотация:** Предложена модель для описания функционально-механического поведения образца из пористого сплава с памятью формы, структурные элементы которого аппроксимированы плоскими прорезными пружинами. Такие пружины, в свою очередь, состоят из балок. В процессе деформирования балки, ориентированные перпендикулярно по отношению к направлению нагружения, вносят основной вклад в макроскопическую деформацию образца.

Исследовано влияние условий закрепления балки на результаты моделирования. Рассмотрены два типа граничных условий: шарнирное опирание и жесткое защемление. В рамках методов сопротивления материалов для указанных видов опор решены задачи статики, найдены напряжения в наиболее напряженном участке и прогибы балок. Для расчета неупругой деформации, возникающей в процессе мартенситного превращения в сплавах с памятью формы, использована микроструктурная модель, позволяющая описывать функциональные свойства этих материалов. Геометрические параметры балок выбраны на основании анализа микрофотографий пористого сплава TiNi.

Выполнено моделирование поведения пористого образца из сплава с памятью формы при изотермическом сжатии при различных температурах, когда сплав с памятью формы находится в аустенитном и мартенситном состояниях. Проведен расчет деформации образца при охлаждении и нагреве под постоянным напряжением, при этом реализуются эффекты пластичности превращения и памяти формы. Показано, что выбор граничных условий имеет существенное значение при расчете поведения пористого сплава с памятью формы. Использование структурных элементов с жесткой заделкой приводит к меньшим напряжениям в моделируемом объекте и позволяет получить лучшее соответствие результатов расчета с экспериментальными данными.

### ВВЕДЕНИЕ

Благодаря своим уникальным свойствам сплавы с памятью формы (далее – СПФ) уже много лет привлекают к себе внимание исследователей в инженерных областях науки [1; 2] и в медицине [3]. Важное место среди этих материалов занимают СПФ с пористой структурой, чьи свойства очень близки к свойствам человеческой костной ткани [4].

Для эффективного использования пористых СПФ необходимо иметь модель, адекватно описывающую их механическое поведение. Практически все имеющиеся в настоящее время работы, посвященные моделированию механического поведения пористых СПФ, ограничены описанием изотермического деформирования и используют макроскопические феноменологические модели деформации СПФ. Д. Лагодас и П. Енчев в работе [5] рассматривали пористый материал как композиционный и использовали методы механики композитов [6–8]. Эти методы ранее использовались Д. Лагодасом и соавторами при описании композитов с неупругим поведением составляющих в работе [9]. В работах [5; 10] пористый СПФ представлен как композит с включениями нулевой жесткости, выполнен расчет деформации цилиндрического образца при изотермическом сжатии и сжатии с одновременным кручением.

Теория эффективного поля Мори-Танаки [11] была использована Чжао и Тайя [12] при расчете поведения пористого образца из СПФ в режиме изотермического сжатия, а также в работе Сю и Дуй [13] при моделировании сжатия образца с пористостью, переменной вдоль радиуса. В работе [14] рассчитаны диаграммы дефор-

мирования пористой ячейки с использованием феноменологической модели, имплементированной в пакет ABAQUS. Благодаря вводу в феноменологическую модель разных значений максимальной обратимой деформации при одноосном растяжении и сжатии М. Равари, М. Кадходаеи удалось описать асимметрию растяжения и сжатия пористых СПФ [15]. В работе А. Ашрафи и Дж. Аргавани [16] феноменологический подход впервые использовался для расчета деформации при нагреве после деформирования в мартенситном состоянии.

Среди подходов к описанию функционально-механических свойств СПФ стоит выделить микроструктурное моделирование, позволяющее учитывать физические механизмы деформирования отдельных структурных элементов. В основе такого подхода лежит гипотеза о многоуровневости развития деформации: макродеформация рассчитывается путем усреднения микродеформаций. Такой метод позволяет рассчитывать деформацию образцов из СПФ при различных термомеханических нагрузках. По-видимому, единственная попытка использования микроструктурной модели для описания поведения пористого СПФ сделана в работе М. Панико и Л.К. Бринсон [17], в которой был выполнен расчет деформации образца при изотермическом циклическом воздействии.

Структура пористых СПФ, как правило, очень сложна и является одним из важнейших факторов, определяющих механическое поведение образцов [18–20]. Таким образом, при моделировании этих материалов необходимо учитывать не только присущие им сложные механизмы неупругой фазовой деформации,

но и особенности пористой структуры. Существующие модели пористых СПФ учитывают это лишь косвенно.

В работах [21–23] предложена модель механического поведения образца из пористого СПФ, позволяющая, основываясь на знании о структуре конкретного образца и используя микроструктурную модель для расчета фазовой деформации СПФ [24], предсказать его поведение в условиях изотермического нагружения. При расчете такой сложной структуры приходится прибегать к определенным упрощениям. Так, в работе [22] структуру пористого образца из сплава TiNi (см. рис. 1), полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, было предложено аппроксимировать плоскими прорезными пружинами (см. рис. 2). При этом неупругую деформацию, связанную с протеканием в СПФ обратимого мартенситного превращения, рассчитывали с помощью микроструктурной модели [24], позволяющей описывать различные функциональные свойства СПФ. Для того чтобы избежать решения сложной краевой задачи с граничными условиями на свободной поверхности пор, было сделано предположение, что функционально-механическое поведение каждого сегмента перегородок, составляющего структуру пористого тела, определяется поведением его наиболее напряженного участка.

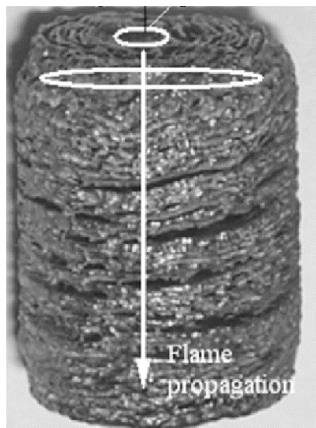


Рис. 1. Продольное сечение образца из сплава TiNi, полученного методом СВС [19]

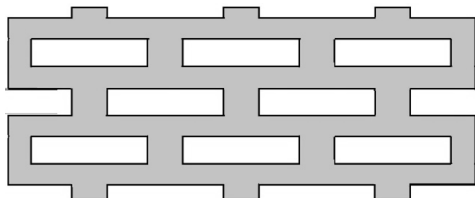


Рис. 2. Плоская прорезная пружина – математический объект, предлагаемый для моделирования пористой структуры

При применении к элементам плоской прорезной пружины элементарной теории балок возникает вопрос

о граничных условиях. В работе [22] считали, что горизонтальные балки, составляющие плоскую прорезную пружину, закреплены шарнирно, что привело к постановке статически определимой задачи. Вместе с тем понятно, что в реальном пористом материале шарниров нет, и излишнее упрощение может привести к существенной погрешности при определении напряжений и деформаций.

Цель настоящей работы – исследование влияния условий закрепления балки на результаты моделирования деформационного поведения образцов из пористого СПФ. Рассмотрены два типа граничных условий: шарнирная опора и жесткая заделка.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗЦА ИЗ ПОРИСТОГО СПФ В СЛУЧАЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МЕЖПОРОВЫХ ПЕРЕГОРОДОК КАК «ШАРНИРНО-ОПЕРТЫХ» БАЛОК

Горизонтальная переемычка – основной структурный элемент плоской прорезной пружины, несущий нагрузку, – была аппроксимирована балкой, в центральной части нагруженной распределенной на небольшом участке длины  $a$  нагрузкой интенсивности  $q$ . Балка закреплена шарнирно, для расчета ее напряженно-деформированного состояния была решена статически определимая задача (см. рис. 3).

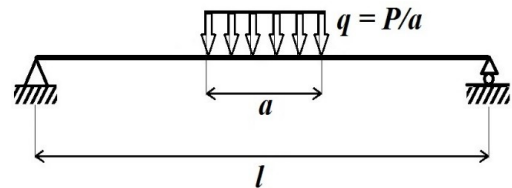


Рис. 3. Схема деформирования балки на шарнирной опоре

Вычисления выполняли пошагово. Предполагали, что в представительном объеме имеются несколько характерных типов балок  $i$ -го типа, размеры которых считали дискретно распределенными величинами со значениями, соответствующими модам реального распределения.

Наибольшее нормальное напряжение в каждой такой балке достигалось в ее центральном сечении и рассчитывалось по формуле сопротивления материалов:

$$\sigma_{\max_i} = \frac{3P \left( l_i - \frac{a_i}{2} \right)}{2b_i h_i^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимальное напряжение в балке;  $l_i$ ,  $b_i$  и  $h_i$  – соответственно, длина, ширина и толщина балки;  $a_i$  – длина участка, на котором распределена нагрузка;  $P=qa_i$  – результирующая сила, действующая на балку.

По заданному приращению силы  $\Delta P$  с помощью формулы (1) вычисляли приращение значения максимального

напряжения  $\Delta\sigma_{\max}$ . Далее при помощи микроструктурной модели [24] определяли приращение деформации балки  $\Delta\varepsilon_i$ . Приращение максимального прогиба  $\Delta w_i$  балки выражали через приращение деформации по формуле, полученной методами сопротивления материалов:

$$\Delta w_i = \frac{\Delta\varepsilon_i(-8l_i^3 + 4l_i a_i^2 - a_i^3)}{24h_i(2l_i - a_i)} \quad (2)$$

Деформацию представительного объема определяли отношением суммарного прогиба к исходной длине образца:

$$E = \frac{\sum_i (w_i)}{\sum_i (h_i + H_i)} \quad (3)$$

где  $H_i$  – размер прорези пружины.

Деформацией сжатия вертикальных элементов пренебрегали, а после касания горизонтальными элементами друг друга приращение деформации образца рассчитывали как приращение деформации в вертикальном стержне при одноосном сжатии.

Эффективное макроскопическое напряжение  $S$  с учетом пористости образца  $p$  определяли следующим образом:

$$S = \frac{P(n-1)^2}{b_{av} h_{av} (n-1+p)^2} \quad (4)$$

где  $n$  – количество перемычек, попадающих на поперечный срез,

$b_{av}$  и  $h_{av}$  – средние значения поперечных размеров балок.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ОБРАЗЦА ИЗ ПОРИСТОГО СПФ ПРИ УСЛОВИИ «ЖЕСТКОЙ ЗАДЕЛКИ» ДЛЯ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В данном разделе считали, что горизонтальные перемычки, составлявшие плоскую прорезную пружину, закреплены жестко (см. рис. 4). Остальные предположения сохранялись.

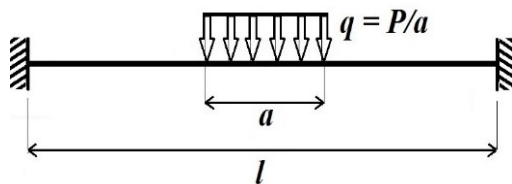


Рис. 4. Схема деформирования балки с жесткой заделкой

Для расчета напряжения была решена статически неопределимая задача. Наибольшее нормальное напряжение, которое достигалось в центральном сечении балки, рассчитывалось аналогично формуле (1) по методам сопротивления материалов

$$\sigma_{\max_i} = \frac{3P \left( l_i - a_i + \frac{a_i^2}{3l_i} \right)}{4b_i h_i^2} \quad (5)$$

При решении задачи была получена формула (6) для вычисления приращения максимального прогиба балки. Она подобна выражению (2):

$$\Delta w_i = \frac{\Delta\varepsilon_i \left( -2l_i^3 + 2l_i a_i^2 - a_i^3 \right)}{24h_i \left( l_i - a_i + \frac{a_i^2}{3l_i} \right)} \quad (6)$$

Расчет деформации  $i$ -ой балки, а также остальные вычисления выполнялись, как и в случае шарнирно-опертой балки: деформация образца была вычислена по формуле (3), напряжение всего образца рассчитывалось по формуле (4).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Из сравнения формул (1) и (5) для напряжений, и (2) и (6) для перемещений математически можно сделать вывод о том, что напряжения и деформации при моделировании структуры образца при помощи балок с жесткой заделкой будут ниже, чем при использовании для расчета балок на шарнирной опоре.

На основании предложенных схем расчета выполнено моделирование сжатия пористого образца из сплава TiNi со следующими константами материала:  $M_s=341$  К,  $M_f=321$  К,  $A_s=355$  К,  $A_f=375$  К, скрытая теплота превращения  $q_o=-190$  МДж/м<sup>3</sup>. Геометрические размеры балок, представленные в таблице 1, были выбраны в качестве элементов плоской прорезной пружины на основании анализа микрофотографии образца пористого TiNi, приведенной в работе [19]. Пористость моделируемого образца  $p$  составляла 54 %.

Таблица 1. Геометрические параметры балок

$l$ , мм	$a$ , мм	$b$ , мм	$h$ , мм	$H$ , мм
4,7	0,8	1,2	0,4	0,5
6,7	1,1	1,5	1	1,3
9,4	1,7	1,2	1,5	1,6

На рисунке 5 приведены диаграммы деформирования модельных образцов в мартенситном и аустенитном состояниях (см. рис. 5 а и 5 б соответственно), а также результаты эксперимента [19]. Расчеты выполнены для моделей, состоящих из элементов с шарнирной опорой и жесткой заделкой. Сравнение кривых позволяет заключить, что при одинаковом напряжении условие жесткой заделки приводит к меньшей деформации, чем при расчетах, основанных на условии шарнирно опертой балки, а результат лучше согласуется с имеющимися экспериментальными данными. Рисунок 6 иллюстрирует поведение модельных конструкций с разными типами закрепления при охлаждении и нагреве под постоянным напряжением 50 и 100 МПа. При охлаждении за счет эффекта пластичности

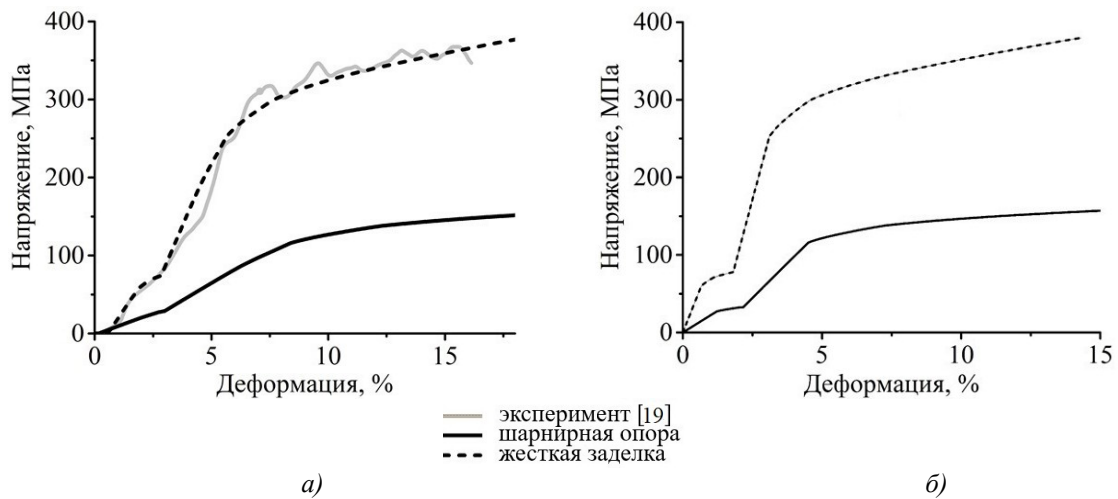


Рис. 5. Диаграммы деформирования образца из пористого TiNi в мартенситном (а) и аустенитном (б) состояниях

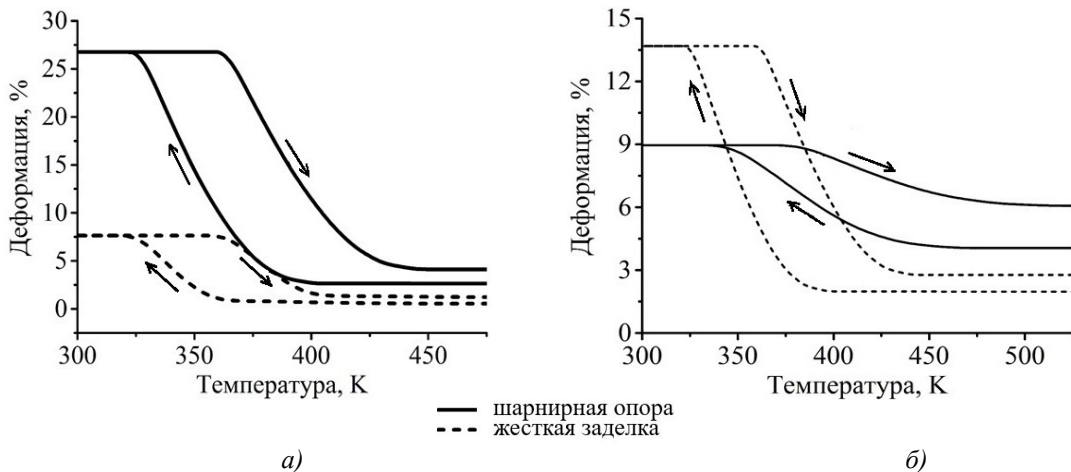


Рис. 6. Расчет поведения образца из пористого TiNi при охлаждении и нагреве под постоянной нагрузкой 50 МПа (а) и 100 МПа (б)

превращения деформация накапливается, а при нагреве частично возвращается благодаря эффекту памяти формы в СПФ.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, показано, что выбор граничных условий в балочной модели пористого сплава с памятью формы существенно влияет на результаты моделирования его деформации. При одинаковых нагрузках условия жесткой заделки приводят к меньшим локальным напряжениям в структурном элементе, чем при его моделировании шарнирно опертой балкой, а результат лучше согласуется с имеющимися экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 15-01-07657 и № 15-08-05021.

Статья подготовлена по материалам докладов участников VIII Международной школы «Физическое материаловедение» с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 3–12 сентября 2017 г.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liang C., Davidson F., Sejetky L.M., Straub F.K. Applications of torsional shape memory alloy actuators for active rotor blade control: opportunities and limitations // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 1996. Vol. 2717. P. 91–100.
2. Garner L.J., Wilson L.N., Lagoudas D.C., Rediniotis O.K. Development of a shape memory alloys actuated biomimetic vehicle // Smart Materials and Structures. 2000. Vol. 9. № 5. P. 673–683.
3. Gunther V.E., Dambaev G.Ts., Sysolyatin P.G. Delay law and new class of materials and implants in medicine. Northampton: STT, 2000. 432 p.
4. Bansiddhi A., Sargeant T.D., Stupp S.I., Dunand D.C. Porous NiTi for bone implants: A review // Acta Biomaterialia. 2008. Vol. 4. № 4. P. 773–782.
5. Entchev P., Lagoudas D. Modeling porous shape memory alloys using micromechanical averaging techniques // Mechanics of Materials. 2002. Vol. 34. № 1. P. 1–24.

6. Benveniste Y. A new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite material // *Mechanics of Materials*. 1987. Vol. 6. P. 147–157.
7. Budiansky B. On the elastic moduli of some heterogeneous materials // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1965. Vol. 13. № 4. P. 223–227.
8. Nemat-Nasser S., Hori M. *Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials*. North-Holland: Elsevier, 1993. 113 p.
9. Qidwai M.A., Entchev P.B., Lagoudas D.C., DeGiorgi V.G. Modeling of the thermomechanical behavior of porous shape memory alloys // *International journal of solids and structures*. 2001. Vol 38. № 48-49. P. 8653–8671.
10. Entchev P.B., Lagoudas D.C. Modeling of transformation-induced plasticity and its effect on the behavior of porous shape memory alloys. Part I, II // *Mechanics of Materials*. 2004. Vol. 36. № 9. P. 865–913.
11. Tanaka K. Thermomechanical sketch of shape memory effect: One-dimensional tensile behavior // *Res Mechanica: International journal of structural mechanics and materials science*. 1986. Vol. 18. № 3. P. 251–263.
12. Zhao Y., Taya M., Kang Y.S., Kawasaki A. Compression behavior of porous NiTi shape memory alloy // *Acta Materialia*. 2005. Vol. 53. P. 337–343.
13. Xue L., Dui G., Liu B., Xin L. A phenomenological constitutive model for functionally graded porous shape memory alloy // *International journal of engineering science*. 2014. Vol. 78. P. 103–113.
14. Sayed T., Gurses E., Siddiq A. A phenomenological two-phase constitutive model for porous shape memory alloys // *Computational Materials Science*. 2012. Vol. 60. P. 44–52.
15. Ravari M., Kadhodaei M., Ghaei A. Effects of asymmetric material response on the mechanical behavior of porous shape memory alloys // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2016. Vol. 27. № 12. P. 1687–1701.
16. Ashrafi A., Argavani J., Naghdabadi R., Sohrabpour S. A 3-D constitutive model for pressure dependent phase transformation of porous shape memory alloys // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2016. Vol. 42. P. 292–310.
17. Panico M., Brinson L.C. Computational modeling of porous shape memory alloys // *International Journal of Solids Structures*. 2008. Vol. 45. № 21. P. 5613–5626.
18. Li B.Y., Rong L.J., Li Y.Y., Gjunter V.E. Synthesis of porous NiTi shape memory alloys by self-propagating high-temperature synthesis: reaction mechanism and anisotropy in pore structure // *Acta Materialia*. 2000. Vol. 48. P. 3895–3904.
19. Kaya M., Orhan N., Tosun G. The effect of the combustion channels on the compressive strength of porous NiTi shape memory alloy fabricated by SHS as implant material // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2010. Vol. 14. P. 21–25.
20. Zanotti C., Giuliani P., Bassani P., Passaretti F., Tuissi A. Characterization of porous NiTi alloys produced by SHS // *Proceedings of the International Conference on Shape Memories and Superelastic Technologies*. 2006. P. 373–380.
21. Volkov A.E., Evarд M.E., Iaparova E.N. Modeling of functional properties of porous shape memory alloy // *MATEC Web of Conferences*. 2015. Vol. 33. P. 02006.
22. Волков А.Е., Евард М.Е., Япарова Е.Н. Деформация пористого образца из сплава с памятью формы с поперечной ориентацией пор относительно оси нагружения // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2016. Т. 21. № 3. С. 913–916.
23. Volkov A.E., Evarд M.E., Iaparova E.N. A beam model of porous shape memory alloy deformation // *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4. P. 4631–4636.
24. Evarд M.E., Volkov A.E. Modeling of martensite accommodation effect on mechanical behavior of shape memory alloys // *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1999. Vol. 121. № 1. P. 102–104.

## REFERENCES

1. Liang C., Davidson F., Scjetky L.M., Straub F.K. Applications of torsional shape memory alloy actuators for active rotor blade control: opportunities and limitations. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 1996, vol. 2717, pp. 91–100.
2. Garner L.J., Wilson L.N., Lagoudas D.C., Rediniotis O.K. Development of a shape memory alloys actuated biomimetic vehicle. *Smart Materials and Structures*, 2000, vol. 9, no. 5, pp. 673–683.
3. Gunther V.E., Dambaev G.Ts., Sysolyatin P.G. *Delay law and new class of materials and implants in medicine*. Northampton, STT, 2000. 432 p.
4. Bansiddhi A., Sargeant T.D., Stupp S.I., Dunand D.C. Porous NiTi for bone implants: A review. *Acta Biomaterialia*, 2008, vol. 4, no. 4, pp. 773–782.
5. Entchev P., Lagoudas D. Modeling porous shape memory alloys using micromechanical averaging techniques. *Mechanics of Materials*, 2002, vol. 34, no. 1, pp. 1–24.
6. Benveniste Y. A new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite material. *Mechanics of Materials*, 1987, vol. 6, pp. 147–157.
7. Budiansky B. On the elastic moduli of some heterogeneous materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1965, vol. 13, no. 4, pp. 223–227.
8. Nemat-Nasser S., Hori M. *Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials*. North-Holland, Elsevier, 1993. 113 p.
9. Qidwai M.A., Entchev P.B., Lagoudas D.C., DeGiorgi V.G. Modeling of the thermomechanical behavior of porous shape memory alloys. *International journal of solids and structures*, 2001, vol 38, no. 48-49, pp. 8653–8671.
10. Entchev P.B., Lagoudas D.C. Modeling of transformation-induced plasticity and its effect on the behavior of porous shape memory alloys. Part I, II. *Mechanics of Materials*, 2004, vol. 36, no. 9, pp. 865–913.
11. Tanaka K. Thermomechanical sketch of shape memory effect: One-dimensional tensile behavior. *Res Mechanica: International journal of structural mechanics and materials science*, 1986, vol. 18, no. 3, pp. 251–263.
12. Zhao Y., Taya M., Kang Y.S., Kawasaki A. Compression behavior of porous NiTi shape memory alloy. *Acta Materialia*, 2005, vol. 53, pp. 337–343.
13. Xue L., Dui G., Liu B., Xin L. A phenomenological constitutive model for functionally graded porous shape memory alloy. *International journal of engineering science*, 2014, vol. 78, pp. 103–113.
14. Sayed T., Gurses E., Siddiq A. A phenomenological two-phase constitutive model for porous shape memory

- alloys. *Computational Materials Science*, 2012, vol. 60, pp. 44–52.
15. Ravari M., Kadkhodaei M., Ghaei A. Effects of asymmetric material response on the mechanical behavior of porous shape memory alloys. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2016, vol. 27, no. 12, pp. 1687–1701.
  16. Ashrafi A., Argavani J., Naghdabadi R., Sohrabpour S. A 3-D constitutive model for pressure dependent phase transformation of porous shape memory alloys. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, vol. 42, pp. 292–310.
  17. Panico M., Brinson L.C. Computational modeling of porous shape memory alloys. *International Journal of Solids Structures*, 2008, vol. 45, no. 21, pp. 5613–5626.
  18. Li B.Y., Rong L.J., Li Y.Y., Gjunter V.E. Synthesis of porous NiTi shape memory alloys by self-propagating high-temperature synthesis: reaction mechanism and anisotropy in pore structure. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48, pp. 3895–3904.
  19. Kaya M., Orhan N., Tosun G. The effect of the combustion channels on the compressive strength of porous NiTi shape memory alloy fabricated by SHS as implant material. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2010, vol. 14, pp. 21–25.
  20. Zanotti C., Giuliani P., Bassani P., Passaretti F., Tuissi A. Characterization of porous NiTi alloys produced by SHS. *Proceedings of the International Conference on Shape Memories and Superelastic Technologies*, 2006, pp. 373–380.
  21. Volkov A.E., Evard M.E., Iaparova E.N. Modeling of functional properties of porous shape memory alloy. *MATEC Web of Conferences*, 2015, vol. 33, pp. 02006.
  22. Volkov A.E., Evard M.E., Yaparova E.N. Deformation of porous shape memory alloy sample with pores transversally oriented relative to the load direction. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2016, vol. 21, no. 3, pp. 913–916.
  23. Volkov A.E., Evard M.E., Iaparova E.N. A beam model of porous shape memory alloy deformation. *Materials Today: Proceedings*, 2017, vol. 4, pp. 4631–4636.
  24. Evard M.E., Volkov A.E. Modeling of martensite accommodation effect on mechanical behavior of shape memory alloys. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1999, vol. 121, no. 1, pp. 102–104.

**CONCERNING THE SELECTION OF BOUNDARY CONDITIONS  
DURING THE COMPUTER MODELLING OF FUNCTIONAL-MECHANICAL BEHAVIOR  
OF POROUS SHAPE MEMORY ALLOY SAMPLES**

© 2017

*A.E. Volkov*, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor  
*M.E. Evard*, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor  
*E.N. Yaparova*, postgraduate student  
*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg (Russia)*

*Keywords:* shape memory alloys; modelling; porous materials.

*Abstract:* The authors proposed a model for the description of the functional and mechanical behavior of a sample of the porous shape memory alloy, the structural elements of which were approximated by flat slotted springs. These springs, in their turn, consist of beams. During the deformation process, beams oriented perpendicular to the loading direction contribute significantly to the sample macroscopic strain.

The authors investigated the influence of beam supporting conditions on the modeling results. Two types of boundary conditions are considered – hinge support and rigid fixing. Within the methods of the strength of materials for the specified types of supports, the authors solved the static problems; found the stresses in the most strained area and beam deflections. To calculate the anelastic deformation arising from the martensitic transformation in the shape memory alloys, the microstructural model allowing describing the functional properties of these materials was used. Basing on the analysis of microphotography of porous TiNi alloy, the geometrical parameters of beams were chosen. The authors carried out the simulation of the behavior of the porous shape memory alloy sample during the isothermal compression at various temperatures when the shape memory alloy is in austenitic and martensitic states. The deformation of a sample during the cooling and heating under the constant stress was calculated, in this case, the transformation plasticity and shape memory effects occur. It is shown, that the selection of boundary conditions has the important significance when modeling porous shape memory alloy behavior. The application of fixed-ended structural elements leads to the lower stresses in the modeled object and allows obtaining better correspondence between the calculation results and experimental data.