

## Моделирование эффекта мартенситной неупругости в плоских композиционных пружинах, выполненных из сплава с эффектом памяти формы

© А.А. Бутрина, С.М. Ганыш, С.С. Гаврюшин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Разработана математическая модель плоской композиционной пружины, работающей в области малых перемещений, обладающей эффектом памяти формы. Для описания поведения материала применен феноменологический подход, основанный на диаграмме фазовых переходов. В качестве модели материала выбрана феноменологическая модель Бринсон. Предложены соотношения для определения приведенных механических характеристик монослоя, эквивалентного композиционному слою в пружине. Эффект памяти учтен с помощью дополнительного внутреннего силового фактора — момента памяти формы при изгибе, являющегося результатом ориентации мартенсита по сечению. Для получения упругой характеристики плоской пружины использован конечно-элементный подход, в котором момент памяти формы выступает в качестве дополнительной узловой нагрузки. Представлен алгоритм построения зависимости между изгибающим моментом в сечении и моментом памяти формы для изотермического нагружения в зоне стабильности мартенсита. Получены зависимости момента памяти формы при изгибе от изгибающего момента для различных конфигураций поперечного сечения плоской пружины.*

**Ключевые слова:** сплав с эффектом памяти формы, плоская пружина, композиционная пружина

**Введение.** В настоящее время наблюдается повышенный интерес к разработке интеллектуальных материалов и созданию на их основе конструкций с адаптивными возможностями. Он особенно активно проявляется при совершенствовании применяющихся в авиационно-космической отрасли, робототехнике и медицине сенсорных и актюаторных компонентов датчиков, исполнительных механизмов и микроконтроллеров, имеющих упругие элементы, выполненные из сплавов с эффектом памяти формы [1, 2].

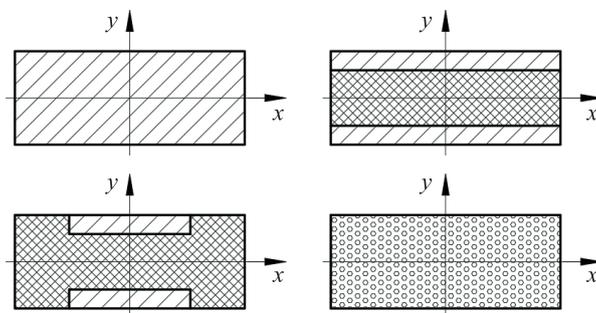
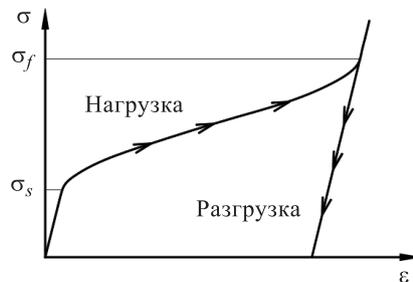


Рис. 1. Примеры поперечного сечения плоской пружины

Среди геометрических форм таких изделий широко распространены плоские пружины, которые могут быть выполнены в виде как монослоя, так и многослойной (композитной) конструкции [3–5] (рис. 1).

Цель работы — разработка алгоритма расчета плоских композиционных пружин, работающих в условиях мартенситной неупругости.

**Математическая модель сплава с эффектом памяти формы.** Такие сплавы обладают рядом особенностей, в том числе способностью подвергаться большим обратимым деформациям и способностью восстанавливать первоначальную форму после термоциклирования. Эффект мартенситной неупругости проявляется в результате накопления структурной деформации, сохраняющейся в процессе разгрузки, которая, однако, может быть снята после окончания термоцикла [6] (рис. 2).



**Рис. 2.** Зависимость напряжения  $\sigma$  от структурной деформации  $\varepsilon$ :  
 $\sigma_s$ ,  $\sigma_f$  — постоянные параметры диаграммы фазовых переходов для сплава с эффектом памяти формы

Для практических расчетов наиболее удобны феноменологические модели макроуровня, основанные на диаграмме фазовых переходов сплава [7]. В процессе исследования была применена модифицированная модель Бринсон [8, 9], в которой для описания эффекта мартенситной неупругости в качестве внутренних переменных используются объемная доля хаотического (неориентированного мартенсита)  $\xi_M$  и объемная доля ориентированного мартенсита  $\xi_S$ , связанные соотношением баланса долей:

$$\xi_S + \xi_M = 1. \quad (1)$$

Соотношение, определяющее объемную долю ориентированного мартенсита, может быть записано в дискретной форме, что позволяет учитывать разгрузку и повторное нагружение:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{При } \sigma_{k+1} > \sigma_k \\ \xi_S^{(k+1)} = \begin{cases} 0, \text{ если } \sigma_{k+1} \leq \sigma_S; \\ F_{MS}(\sigma_{k+1}), \text{ если } F_{MS}(\sigma_{k+1}) > \xi_S^{(k)} \text{ и } \sigma_S < \sigma_{k+1} < \sigma_f; \\ \xi_S^{(k)}, \text{ если } F_{MS}(\sigma_{k+1}) \leq \xi_S^{(k)} \text{ и } \sigma_S < \sigma_{k+1} < \sigma_f; \\ 1, \text{ если } \sigma_{k+1} \geq \sigma_f. \end{cases} \\ \text{При } \sigma_{k+1} \leq \sigma_k \\ \xi_S^{(k+1)} = \xi_S^{(k)}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $\xi_S^{(k+1)}$ ,  $\xi_S^{(k)}$  — объемные доли ориентированного мартенсита на текущем и предыдущем шаге соответственно;  $\sigma_{k+1}$ ,  $\sigma_k$  — напряжения на текущем и предыдущем шаге соответственно;  $F_{MS}(\sigma)$  — функция, аппроксимирующая фазовый переход:

$$F_{MS}(\sigma) = \frac{1}{2} \cos \left[ \pi \frac{\sigma - \sigma_f}{\sigma_S - \sigma_f} \right] + \frac{1}{2}. \quad (3)$$

Для деформаций предполагается справедливым аддитивное разложение на упругую и неупругую составляющие:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{упр}} + \varepsilon_L \xi_S = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_L \xi_S, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_L$  — механическая характеристика материала, представляющая собой максимальную деформацию, возникающую в результате полного перехода мартенсита из хаотического состояния в ориентированное;  $E$  — модуль упругости.

**Момент памяти формы.** Для учета эффекта ориентации мартенсита вводится дополнительный внутренний силовой фактор: момент памяти формы при изгибе [9]. Он приводит к тем же изменениям кривизны осевой линии плоской пружины, что и дополнительные деформации, вызванные ориентацией мартенсита:

$$M_{\text{изг}}^{SMA} = \int_A E \varepsilon_L \xi_S(y) y dA; \quad (5)$$

$$\Delta \varepsilon = \frac{M_{\text{изг}} + M_{\text{изг}}^{SMA}}{EI_{\text{изг}}}, \quad (6)$$

где  $M_{\text{изг}}^{SMA}$  — момент памяти формы в сечении;  $\Delta \varepsilon$  — изменение кривизны осевой линии;  $M_{\text{изг}}$  — изгибающий момент в сечении;

$EI_{\text{изг}}$  — изгибная жесткость поперечного сечения, определяемая соотношением

$$EI_{\text{изг}} = \int_A E(y)y^2 dA. \quad (7)$$

Соотношения (5)–(7) получены для симметричного поперечного сечения в предположении справедливости гипотезы плоских сечений.

**Приведенные механические характеристики слоя.** Если в пределах слоя присутствуют материалы с различными механическими характеристиками, такой слой заменяется слоем из мономатериала. Для получения приведенных свойств монослоя используется двухкомпонентная схема слоя (рис. 3) [10].

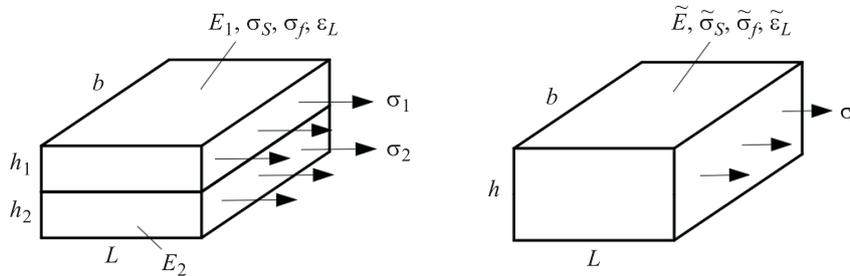


Рис. 3. Переход от двухкомпонентного слоя к монослою

Приведенные модуль упругости  $\tilde{E}$  и максимальная неупругая деформация  $\tilde{\epsilon}_L$  определяются из условий равенства нормальных усилий  $N$  и удлинений  $\Delta L$  слоя, состоящего из двух материалов (двух подслоев в случае шпоночной модели) и эквивалентного монослоя:

$$\begin{aligned} N = \sigma b h &= \sigma_1 b h_1 + \sigma_2 b h_2; \\ \Delta L = \epsilon L &= \epsilon_1 L = \epsilon_2 L, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $b_1, b_2, b, h_1, h_2, h, L$  — геометрические размеры слоя и подслоев (см. рис. 3);  $\sigma_1, \epsilon_1$  — напряжение и деформация в подслое из сплава с памятью формы;  $\sigma_2, \epsilon_2$  — напряжение и деформация в подслое из традиционного материала;  $\sigma, \epsilon$  — напряжение и деформация в эквивалентном монослое.

Физические соотношения для подслоев и монослоя имеют следующий вид:

$$\sigma_1 = E_1 \epsilon + E_1 \epsilon_L \xi_S; \quad (9)$$

$$\sigma_2 = E_2 \epsilon;$$

$$\sigma = \tilde{E} \epsilon + \tilde{E} \epsilon_L \xi_S, \quad (10)$$

где  $E_1$ ,  $\varepsilon_L$  — механические характеристики подслоя с памятью формы;  $E_2$  — модуль упругости в подслое из традиционного материала.

Подставляя соотношения (9), (10) в соотношения (8) и проводя ряд преобразований, получаем формулы для определения приведенных модуля упругости  $\tilde{E}$  и максимальной неупругой деформации  $\tilde{\varepsilon}_L$  монослоя:

$$\tilde{E} = E_1 f_1 + E_2 f_2; \quad (11)$$

$$\tilde{\varepsilon}_L = \frac{E_1 f_1}{E_1 f_1 + E_2 f_2} \varepsilon_L, \quad (12)$$

где  $f_1, f_2$  — объемные доли сплава с памятью формы и традиционного сплава соответственно в пределах рассматриваемого слоя, определяемые соотношениями

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{h_1}{h}; \\ f_2 &= \frac{h_2}{h}. \end{aligned} \quad (13)$$

Приведенные напряжения начала  $\tilde{\sigma}_S$  и окончания  $\tilde{\sigma}_f$  фазового перехода определяем из условия равенства деформаций в монослое и подслое из сплава с памятью формы. В момент начала фазового перехода (объемная доля ориентированного мартенсита  $\xi_S = 0$ ) деформация  $\varepsilon_S$  в монослое и подслое из сплава с памятью формы находится из физических соотношений (9), (10):

$$\varepsilon_S = \frac{\sigma_S}{E_1} = \frac{\tilde{\sigma}_S}{\tilde{E}}. \quad (14)$$

Аналогично в момент окончания фазового перехода (объемная доля ориентированного мартенсита  $\xi_S = 1$ ) деформация, соответствующая окончанию фазового перехода,

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_1} + \varepsilon_L = \frac{\tilde{\sigma}_f}{\tilde{E}} + \tilde{\varepsilon}_L. \quad (15)$$

Выполнив преобразования, получаем выражения для приведенных напряжений начала и окончания фазового перехода:

$$\begin{aligned}\tilde{\sigma}_S &= \frac{\tilde{E}}{E_1} \sigma_S; \\ \tilde{\sigma}_f &= \frac{\tilde{E}}{E_1} \sigma_f + \tilde{E}(\varepsilon_L - \tilde{\varepsilon}_L).\end{aligned}\tag{16}$$

**Численная реализация.** Для численного определения момента памяти формы сечение пружины дискретизируется (рис. 4), т. е. заменяется набором слоев. Предполагается, что напряженно-деформированное и фазовое состояния в пределах слоя постоянны.

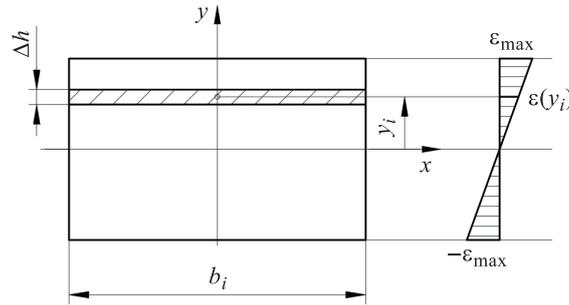


Рис. 4. Дискретизация поперечного сечения плоской пружины

Для построения одной точки зависимости между изгибающим моментом и моментом памяти формы действия выполняются в следующей последовательности:

- 1) задаем некоторое значение деформации  $\varepsilon_{\max}$  на внешнем слое;
- 2) в предположении о линейном распределении деформаций по сечению определяем деформацию в каждом из слоев:

$$\varepsilon(y_i) = \varepsilon_{\max} \frac{2y_i}{h};\tag{17}$$

- 3) для каждого из слоев, если он состоит из двух материалов, вычисляем приведенные механические характеристики по соотношениям (11)–(15);

- 4) определяем составляющую момента памяти формы в каждом из слоев. Если слой не содержит сплав с памятью формы, то составляющая момента памяти формы  $M_i^{SMA}$  равна нулю. Если слой выполнен из сплава с памятью формы или он композитный, то составляющая момента памяти формы определяется соотношением

$$M_i^{SMA} = E_i(\varepsilon_L)_i b_i \xi_S(|\varepsilon_i|) \text{sign}(\varepsilon_i) \cdot y_i \Delta h;\tag{18}$$

- 5) рассчитываем момент памяти формы по формуле

$$M_{\text{изг}}^{SMA} = \sum_{i=1}^{2n} M_i^{SMA};\tag{19}$$

б) находим изгибную жесткость сечения и изгибающий момент в сечении, соответствующий вычисленному моменту памяти формы и заданной деформации на внешнем слое:

$$EI_{\text{изг}} = \sum_{i=1}^{2n} E_i y_i^2 b_i \Delta h; \quad (20)$$

$$M_{\text{изг}} = EI_{\text{изг}} \Delta \varepsilon - M_{\text{изг}}^{SMA} = EI_{\text{изг}} \frac{2\varepsilon_{\text{max}}}{h} - M_{\text{изг}}^{SMA}. \quad (21)$$

**Упругая характеристика плоской пружины.** Для построения упругой характеристики плоской пружины, работающей в области малых перемещений, применяется конечно-элементный подход [11, 12]. Каноническое уравнение метода конечных элементов для элемента из сплава с памятью формы имеет вид

$$\left( \frac{EI_{\text{изг}}}{L^3} \right)^{(e)} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \cdot \{a^{(e)}\} = \{F^{(e)}\} + \begin{Bmatrix} 0 \\ -M_{\text{изг}}^{SMA} \\ 0 \\ M_{\text{изг}}^{SMA} \end{Bmatrix}. \quad (22)$$

Для расчета плоской пружины, работающей в области малых перемещений, можно также применять дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня [11]:

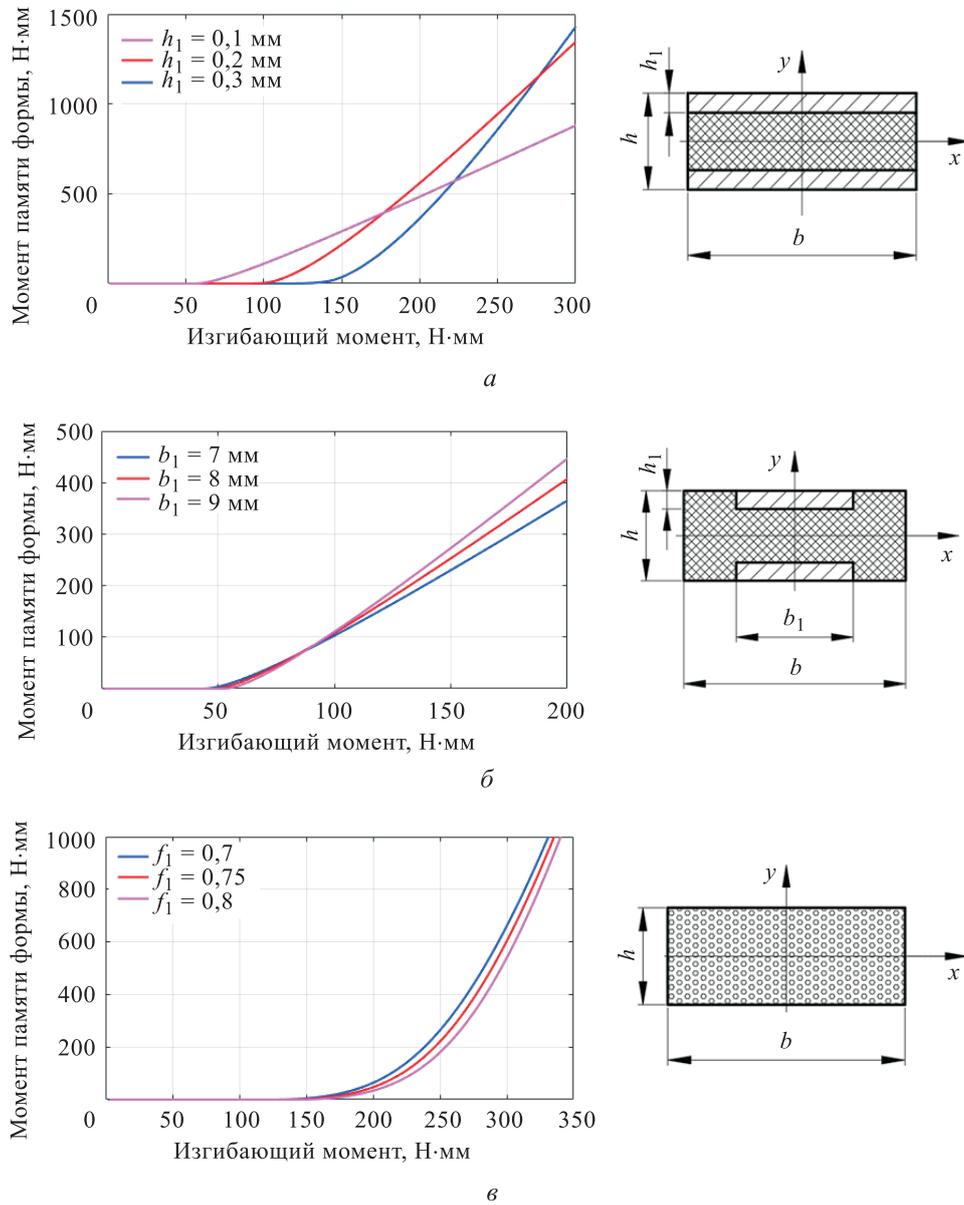
$$EI_{\text{изг}} \frac{d^2 V(z)}{dz^2} = M_{\text{изг}}(z) + M_{\text{изг}}^{SMA}(z). \quad (23)$$

**Результаты численного моделирования.** На основе предложенных соотношений и алгоритмов в среде MATLAB был создан программный комплекс для расчета плоских пружин, работающих в условиях мартенситной неупругости. Расчет проводился для следующих параметров материала [13]:

$$\begin{aligned} E_1 &= 20\,000 \text{ МПа}; E_2 = 1500 \text{ МПа}; \varepsilon_L = 0,05; \\ \sigma_S &= 25 \text{ МПа}; \sigma_f = 78 \text{ МПа}. \end{aligned} \quad (24)$$

Зависимости момента памяти формы от изгибающего момента для различных типов поперечных сечений представлены на рис. 5.

Полученные зависимости для момента памяти формы позволяют моделировать эффект мартенситной неупругости в плоских пружинах. На рис. 6 представлено семейство упругих характеристик для консольной плоской пружины длиной 80 мм с поперечным сечением № 1 (рис. 5, а), нагруженной сосредоточенной нагрузкой.



**Рис. 5.** Зависимость момента памяти формы от изгибающего момента:  
 а — сечение № 1 ( $b = 10$  мм,  $h = 2$  мм); б — сечение № 2 ( $b = 10$  мм,  $h = 2$  мм,  $h_1 = 0,1$  мм);  
 в — сечение № 3 ( $b = 10$  мм,  $h = 2$  мм)

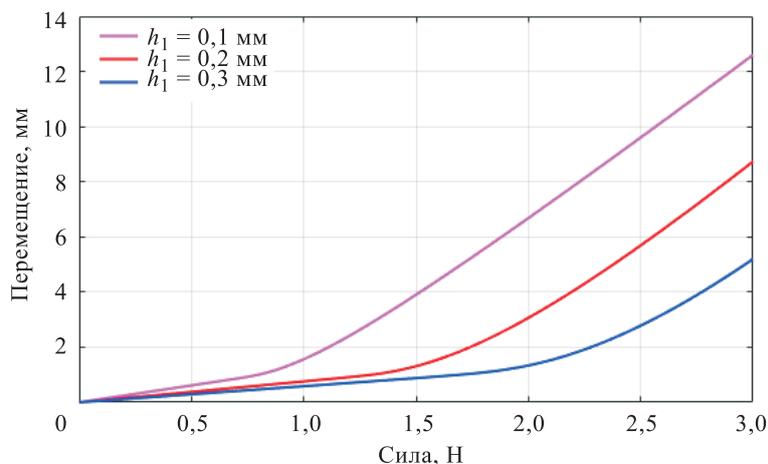


Рис. 6. Семейство упругих характеристик для плоской пружины

Справедливость полученных результатов была подтверждена сравнением с теоретическими и экспериментальными результатами, представленными в [3–5, 11–13].

**Заключение.** Разработана математическая модель плоской композиционной пружины, обладающей эффектом памяти формы, работающей при малых перемещениях. Получены соотношения для приведенных характеристик монослоя: модуля упругости, напряжений начала и окончания фазового перехода, максимальной неупругой деформации, позволяющие учитывать эффект ориентации мартенсита с помощью виртуального дополнительного внутреннего силового фактора — момента памяти формы при изгибе. Предложен алгоритм построения зависимости момента памяти формы от изгибающего момента для композиционного сечения. Написана пользовательская программа на языке MATLAB, с помощью которой получены результаты расчета плоских пружин с различными поперечными сечениями. Представленные в работе методика, алгоритм и соотношения могут быть рекомендованы для проектирования термодатчиков и предохранителей с исполнительным элементом в форме плоских пружин, обладающих эффектом памяти формы.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Jani J.M., Leary M., Subic A., Gibson M.A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design*, 2015, vol. 56, pp. 1078–1113.
- [2] Narahari P.S., Wanhill R.J.H. Aerospace materials and material technologies. *Springer Science+Business Media*, 2017, vol. 1, pp. 1–14.
- [3] Zhang Y., Zhao Y.-P. A study of composite beam with shape memory alloy arbitrarily embedded under thermal and mechanical loadings. *Materials & Design*, 2007, vol. 28 (4), pp. 1096–1115.

- [4] Rasid Z.A., Zahari R. The deflection of the shape memory alloy composite beams using finite element method. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 695, pp. 135–138.
- [5] Saraswat Y., Yadav S., Parihar H.S. The effect of shape memory alloy in composite beam. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2019, vol. 8, pp. 130–134.
- [6] Тихомирова К.А. Изотермическое деформирование сплава с памятью формы в разных температурных интервалах. Случай одноосного растяжения. *Механика композиционных материалов и конструкций*, 2017, т. 23, № 2, с. 263–282.
- [7] Cisse C., Zaki W., Zineb T.B. A review of modeling techniques for advanced effects in shape memory alloy behavior. *Smart Materials and Structures*, 2016, vol. 25 (10), pp. 1–36.
- [8] Poorasadion S., Arghavani J., Naghdabadi R., Sohrabpour S. An improvement on the Brinson model for shape memory alloys with application to two-dimensional beam element. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2013, vol. 25, pp. 1905–1920.
- [9] Гаврюшин С.С., Ганыш С.М. Расчет элементов коммутационных и исполнительных устройств, выполненных из сплава с памятью формы. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2019, № 7, с. 6–14.
- [10] Кузьмин М.А., Лебедев Д.Л., Попов Б.Г. *Прочность, жесткость, устойчивость элементов конструкций. Теория и практикум*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 344 с.
- [11] Гаврюшин С.С., Ганыш С.М. Построение упругих характеристик для плоских и винтовых цилиндрических пружин, выполненных из сплава с эффектом памяти формы. *Сб. науч. трудов: Математическое моделирование и экспериментальная механика деформируемого твердого тела*. Тверь, 2018, т. 2, с. 21–25.
- [12] Гаврюшин С.С., Ганыш С.М. Применение метода конечных элементов для расчета плоских пружин, выполненных из сплавов с памятью формы. *Сб. науч. трудов: Современные вопросы устойчивости, пластичности и ползучести в механике деформируемого твердого тела*, Тверь, 2020, с. 94–105.
- [13] Sayyaadi H., Zakerzadeh M.R., Salehi H. A comparative analysis of some one-dimensional shape memory alloy constitutive models based on experimental tests. *Scientia Iranica*, 2012, vol. 19 (2), pp. 249–257.

Статья поступила в редакцию 03.01.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бутрина А.А., Ганыш С.М., Гаврюшин С.С. Моделирование эффекта мартенситной неупругости в плоских композиционных пружинах, выполненных из сплава с эффектом памяти формы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-1-2142>

**Бутрина Анастасия Андреевна** — студентка кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: композиционные материалы, метод конечных элементов, робототехника. e-mail: butrina\_99@mail.ru

**Ганыш Святослав Мирославович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: метод конечных элементов, материалы с памятью формы. e-mail: s.ganysh@bmstu.ru

**Гаврюшин Сергей Сергеевич** — д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: gss@bmstu.ru

## Modeling the martensitic inelasticity effect in flat composite springs made of a shape memory alloy

© A.A. Butrina, S.M. Ganysh, S.S. Gavryushin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The purpose of the study was to develop a mathematical model of a flat composite spring operating in the region of small displacements and having a shape memory effect. To describe the behavior of the material, we applied a phenomenological approach based on the phase transition diagram; as the material model, we chose the Brinson phenomenological model. As a result, we proposed relationships for determining the reduced mechanical characteristics of a monolayer equivalent to a composite layer in the spring. The memory effect was taken into account by an additional internal force factor, i. e. the shape memory moment during bending, which resulted from the cross-section orientation of the martensite. To obtain the elastic characteristic of the spring, we used a finite element approach, in which the shape memory moment acts as an additional nodal load. Eventually, we introduced an algorithm for the dependence between the bending moment in the section and the shape memory moment for isothermal loading in the martensite stability zone and obtained the dependences of the shape memory moment during bending on the bending moment for various configurations of the cross-section of the spring.*

**Keywords:** shape memory alloy, flat spring, composite spring

### REFERENCES

- [1] Jani J.M., Leary M., Subic A., Gibson M.A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design*, 2015, vol. 56, pp. 1078–1113.
- [2] Narahari P.S., Wanhill R.J.H. Aerospace materials and material technologies. *Springer Science+Business Media*, 2017, vol. 1, pp. 1–14.
- [3] Zhang Y., Zhao Y.-P. A study of composite beam with shape memory alloy arbitrarily embedded under thermal and mechanical loadings. *Materials & Design*, 2007, vol. 28 (4), pp. 1096–1115.
- [4] Rasid Z.A., Zahari R. The deflection of the shape memory alloy composite beams using finite element method. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 695, pp. 135–138.
- [5] Saraswat Y., Yadav S., Parihar H.S. The effect of shape memory alloy in composite beam. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2019, vol. 8, pp. 130–134.
- [6] Tikhomirova K.A. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii — Journal on Composite Mechanics and Design*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 263–282.
- [7] Cisse C., Zaki W., Zineb T.B. A review of modeling techniques for advanced effects in shape memory alloy behavior. *Smart Materials and Structures*, 2016, vol. 25 (10), pp. 1–36.
- [8] Poorasadion S., Arghavani J., Naghdabadi R., Sohrabpour S. An improvement on the Brinson model for shape memory alloys with application to two-dimensional beam element. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2013, vol. 25, pp. 1905–1920.
- [9] Gavryushin S.S., Ganysh S.M. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin — Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2019, no. 7, pp. 6–14.

- [10] Kuzmin M.A., Lebedev D.L., Popov B.G. *Prochnost, zhestkost, ustoychivost elementov konstruksii. Teoriya i praktikum* [Strength, rigidity, stability of structural elements. Theory and practice]. Moscow, BMSTU Publ., 2012, 344 p.
- [11] Gavryushin S.S., Ganysh S.M. Postroenie uprugikh kharakteristik dlya ploskikh i vintovykh tsilindricheskikh pruzhin, vypolnennykh iz splava s efektom pamyati formy [Building elastic characteristics for flat and helical coil springs made of shape memory alloy]. In: *Sb. nauch. tr. Matematicheskoe modelirovanie i eksperimentalnaya mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Collection of scientific papers Mathematical modeling and experimental mechanics of a deformable solid body]. Tver, 2018, vol. 2, pp. 21–25.
- [12] Gavryushin S.S., Ganysh S.M. Primenenie metoda konechnykh elementov dlya rascheta ploskikh pruzhin, vypolnennykh iz splavov s pamyatyu formy [Application of the finite element method for the calculation of flat springs made of shape memory alloys]. In: *Sb. nauch. tr. Sovremennye voprosy ustoychivosti, plastichnosti i polzuchesti v mekhanike deformiruemogo tverdogo tela* [Collection of scientific papers. Modern issues of stability, plasticity and creep in the mechanics of a deformable solid body]. Tver, 2020, pp. 94–105.
- [13] Sayyaadi H., Zakerzadeh M.R., Salehi H. A comparative analysis of some one-dimensional shape memory alloy constitutive models based on experimental tests. *Scientia Iranica*, 2012, vol. 19 (2), pp. 249–257.

**Butrina A.A.**, student, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: composite materials, finite element method, robotics. e-mail: butrina\_99@mail.ru

**Ganysh S.M.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: finite element method, shape memory materials. e-mail: s.ganysh@bmstu.ru

**Gavryushin S.S.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department of Computer Systems of Manufacturing Automation, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: gss@bmstu.ru