

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-3-61-66>

ФОРМОВОССТАНОВЛЕНИЕ ПЛАСТИНЫ ИЗ НИКЕЛИДА ТИТАНА

© **Иван Николаевич Андронов¹, Маргарита Юрьевна Демина²**¹ Ухтинский государственный технический университет, Россия, Республика Коми, 169300, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13.² Сыктывкарский лесной институт (филиал) Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Ленина, д. 39; e-mail: mdemina59@mail.ru

*Статья поступила 3 апреля 2019 г. Поступила после доработки 7 августа 2019 г.
Принята к публикации 3 октября 2019 г.*

Сплавы с памятью формы, в частности никелид титана, в настоящее время применяются в различных областях техники, строительстве, медицине, что обусловлено их уникальной способностью восстанавливать при нагреве значительные неупругие деформации. Пластины из никелида титана в качестве элементов конструкций или изделий медицинского назначения подвергаются сложному температурно-силовому воздействию в процессе работы, в результате которого изменяется напряженно-деформированное состояние материала. Например, пластина, жестко защемленная по одной из сторон, существенно меняет кривизну поверхности при термоциклировании под нагрузкой или в результате нагрева после предварительной пластической деформации. Подобные режимы воздействия на пластину реализуются в устройствах, в которых она используется как чувствительный элемент, например, датчиках температуры, электрических контактах, интеллектуальных элеронах и т.п. При проектировании данных элементов важно учитывать изменение таких деформационных параметров, как кривизна, деформация, коэффициент восстановления формы, что для пластин из никелида титана мало изучено. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования формовосстановления пластины из никелида титана как в процессе изотермической разгрузки после пластического деформирования, так и при термоциклировании под действием постоянной изгибающей силы. Показано, что пластическое деформирование пластины в изотермических условиях с увеличением исходного радиуса кривизны в 3,35 раза после псевдоупругой разгрузки приводит к возрастанию кривизны в 4,83 раза. Установлено, что эффект памяти формы после изотермического изгиба прямоугольной пластины из никелида титана возрастает при уменьшении задаваемого радиуса кривизны. При этом кривизна при термоциклировании под постоянной нагрузкой сложным образом изменяется. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании устройств, в которых используются пластины из никелида титана.

Ключевые слова: эффект памяти формы; никелид титана; пластина; кривизна; термоупругость; пластичность превращения.

SHAPE RECOVERY OF THE OF NICKELIDE TITANE PLATE

© **Ivan N. Andronov¹, Margarita Yu. Demina²**¹ Ukhta State Technical University, 13, Pervomayskaya str., Ukhta, 169300, Russia.² Syktyvkar Forest Institute — Branch of the St. Petersburg State Forestry University, 39, Lenina str., Syktyvkar, 167000, Russia; e-mail: mdemina59@mail.ru

Received April 3, 2019. Revised August 7, 2019. Accepted October 3, 2019.

Shape memory alloys such as titanium nickelide are currently used in different fields of engineering, construction, and medicine, due to their unique ability to recover significant inelastic deformations upon heating. Titanium nickelide plates as structural elements or medical devices are exposed to complex temperature and force impacts during operation, which leads to a change in the stress-strain state of the material. For example, a plate rigidly clamped on one side significantly changes the surface curvature during thermal cycling under load or as a result of heating after preliminary plastic deformation. Similar exposures are implemented in the devices in which the plate is used as a sensitive element, for example, temperature sensors, electrical contacts, smart ailerons, etc. When designing these elements, it is important to take into account changes in such deformation parameters as curvature, deformation, and shape recovery coefficient. The lack of information on those parameters is observed for titanium nickelide plates. We present the results of the experimental study of the shape reduction of a titanium nickelide plate both during isothermal unloading after plastic deformation and during thermal cycling under the impact of a constant bending force. It is shown that plastic deformation of the plate under isothermal conditions with an increase in the initial radius of the curvature by 3.35 times leads to an increase in the curvature by 4.83 times after pseudoelastic unloading. It is shown that the shape memory effect after isothermal bending of

a rectangular titanium nickelide plate increases as the prescribed radius of the curvature decreases. Moreover, the curvature under constant load changes during thermal cycling in a complex way. The results of the study can be used in designing devices based on titanium nickelide plates.

Keywords: shape memory effect; titanium nickelide; plate; curvature; thermoelasticity; transformation plasticity.

Введение

Свойства материалов с памятью формы достаточно хорошо изучены, но их применение в элементах конструкций, различных устройствах и механизмах предполагает знание деформационного поведения детали, уровня возникающих напряжений в ней в процессе работы. Вследствие этого актуальными являются теоретические [1, с. 723] и экспериментальные [2] исследования по изменению и проектированию формы, размеров деталей при конкретных температурно-силовых условиях работы. Одна из возможных форм рабочих элементов с памятью формы — плоская прямоугольная пластина из никелида титана, или биметаллический композит, сочетающий термоупругий и упругий материалы [3, с. 52]. Прямоугольные пластины применяют в различных областях техники и медицины, например, в качестве элементов интеллектуальных элеронов [4, с. 475], имплантируемых опорных пластин [5, с. 37], причем деформационные свойства подобных изделий зависят от состава и числа слоев [6, с. 88], предварительной термической и пластической обработки металла [7, с. 1665], а также уровня действующих усилий [8, с. 79].

Цель работы — изучение формовосстановления плоской пластины из никелида титана в условиях изотермических и неизотермических силовых воздействий.

Проведено экспериментальное исследование плоского изгиба прямоугольной пластины из никелида титана в изотермических условиях и при термоциклировании под постоянной сосредото-

ченной силой, а также рассчитана возникающая при этом линейная деформация.

Материалы и методы исследования

Исследовали плоский изгиб прямоугольной пластины толщиной $h = 0,60 \pm 0,05$ мм, шириной $b = 18,31 \pm 0,08$ мм и длиной $l = 77,16 \pm 0,08$ мм, выполненной из эквиатомного никелида титана с температурами фазовых переходов $M_n = 62^\circ\text{C}$, $M_s = 30^\circ\text{C}$, $A_n = 44^\circ\text{C}$, $A_s = 72^\circ\text{C}$. Моменты инерции прямоугольного сечения $J_z = bh^3/12 = 0,33 \text{ мм}^4$ и $J_y = hb^3/12 = 306,93 \text{ мм}^4$, а наименьшая и наибольшая жесткости сечения пластины на изгиб при модуле упругости мартенсита $E_m = 30 \text{ ГПа}$ составили соответственно $EJ_z = 0,01 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ и $EJ_y = 9,21 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$. Пластину предварительно отжигали при температуре 500°C в течение часа в заневоленном состоянии между плоскими жесткими брусками.

Эксперимент выполняли в следующей последовательности. На первом этапе (см. рис. 1) плоскую пластину пластически деформировали при температуре $\sim 20^\circ\text{C}$, прижимая ее силой $P \approx 30 \text{ Н}$ к цилиндрической поверхности радиусом ρ_0 , затем разгружали. При изотермической (псевдоупругой) разгрузке радиус кривизны длинной стороны пластины изменялся до ρ . Далее пластину нагревали при помощи электрокалорифера в свободном состоянии через интервал обратного мартенситного превращения.

Радиус цилиндрической оправки ρ_0 измеряли с точностью до $0,05 \text{ мм}$; радиус кривизны ρ после разгрузки рассчитывали, измерив соответствующие изогнутой форме пластины хорду a и высоту сегмента c , по формуле

$$\rho = \frac{(a/2)^2 + c^2}{2c}. \quad (1)$$

Конечный радиус кривизны пластины $\rho_{\text{вос}}$ определяли также по формуле (1), измерив хорду и сегмент при температуре 90°C , превышающей температуру A_n .

Псевдоупругую деформацию находили по формуле

$$\varepsilon_{\text{пу}} = \frac{h}{2\rho_0} - \frac{h}{2\rho}, \quad (2)$$

деформацию, обусловленную эффектом памяти формы при последующем нагревании пластины

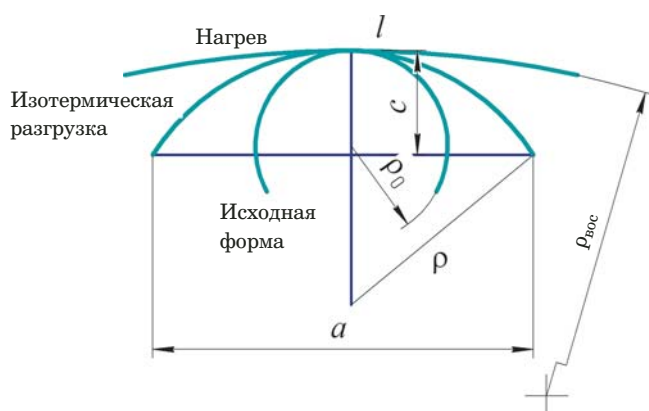


Рис. 1. Изменение радиуса кривизны ρ пластины

Fig. 1. Change in the radius of the plate curvature ρ

через интервал обратного мартенситного превращения, — по формуле

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \frac{h}{2\rho} - \frac{h}{2\rho_{\text{вос}}}. \quad (3)$$

В случае реализации при нагревании совершенного эффекта памяти формы, когда $\rho_{\text{вос}} = \infty$, соответствующая деформация составит

$$\varepsilon_{\text{эф}}^c = \frac{h}{2\rho}. \quad (4)$$

Введем коэффициент восстановления формы пластины за счет эффекта памяти формы:

$$k_c = \frac{\varepsilon_{\text{эф}}}{\varepsilon_{\text{эф}}^c}, \quad (5)$$

или

$$k_c = \frac{h/2\rho - h/2\rho_{\text{вос}}}{h/2\rho} = 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{вос}}}. \quad (6)$$

Исходный радиус кривизны ρ_{0i} цилиндрической оправки постепенно уменьшали в следующей последовательности: 41,09; 32; 20,67; 15,55; 12,26 мм. Опыт для каждого значения ρ_0 повторяли три раза, оценивая погрешности деформаций $\varepsilon_{\text{пу}}$, $\varepsilon_{\text{эф}}$.

На втором этапе пластину подвергали плоскому изгибу под действием постоянной силы P при изменении температуры в интервалах мартенситных переходов. Пластику зажимали жестко по одной из коротких сторон, нагревали до температуры 90 °С, нагружали постоянной сосредоточенной силой P , приложенной к противоположному незакрепленному концу (рис. 2), и охлаждали под нагрузкой до температуры ~24 °С, затем нагревали до 90 °С. Применяли следующие значения нагрузки P_i : 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0 Н. Нагрев выполняли при помощи инфракрасной лампы ИКЗК электрической мощностью 200 Вт. При охлаждении под нагрузкой пластина изгибалась в вертикальной плоскости, изменяя кривизну, при нагреве под нагрузкой плоская форма пластины восстанавливалась. При охлаждении и нагреве измеряли смещение незакрепленной стороны пластины по горизонтали x и вертикали y через 2 °С.

При исследовании больших перемещений при упругом изгибе тонкой пластины никаких ограничений на изменение конфигурации упругой линии не накладывается, поэтому в отличие от случая малых перемещений нельзя рассматривать пластину как абсолютно твердое тело. Все опорные реакции (силы и моменты) будут существенно зависеть от значений искомых переме-

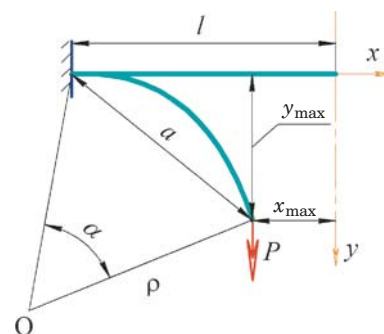


Рис. 2. Схема деформирования пластины в термоцикле под нагрузкой

Fig. 2. Scheme of the plate deformation in a thermal cycle under load

щений при изгибе, следовательно, задача определения внутренних усилий, напряжений и деформаций становится статически неопределимой [10 – 11].

Для определения радиуса кривизны пластины в конце охлаждения под нагрузкой измеряли максимальные смещения свободного конца пластины x_{max} и y_{max} при температуре ~22°, вычисляли длину хорды $a = \sqrt{(l - x_{\text{max}})^2 + y_{\text{max}}^2}$, предполагая, что длина пластины l не изменяется и радиус кривизны имеет одинаковое значение по всей длине пластины. Численным решением уравнения

$$360l \sin \frac{\alpha}{2} - \pi a \alpha = 0 \quad (7)$$

определяли угол $\alpha \in (0, 360^\circ)$, а затем радиус кривизны пластины

$$\rho_T = \frac{a}{2\sin(\alpha/2)}. \quad (8)$$

Деформацию, соответствующую эффекту пластичности прямого превращения, рассчитывали как

$$\varepsilon = \frac{h}{2\rho_T}. \quad (9)$$

Обсуждение результатов

При пластическом деформировании в изотермических условиях увеличение исходного радиуса кривизны пластины в 3,35 раза приводит к возрастанию радиуса кривизны после псевдоупругой разгрузки в 4,83 раза. Псевдоупругая деформация, определяемая по формуле (2), уменьшается в 0,68 раза и незначительно зависит от радиуса ρ_0 (см. рис. 1). Деформация пластины, сформированная изотермически, восстанавливалась за счет эффекта памяти формы и рассчитывалась по формуле (3). Значение $\varepsilon_{\text{эф}}$ существен-

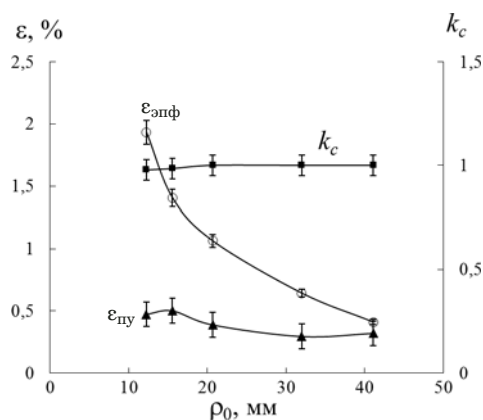


Рис. 3. Зависимости псевдоупругой деформации, эффекта памяти формы и коэффициента восстановления формы пластины после изотермического деформирования от радиуса кривизны

Fig. 3. Dependence of pseudoelastic deformation, shape memory effect, and plate shape recovery coefficient on the curvature radius after isothermal deformation

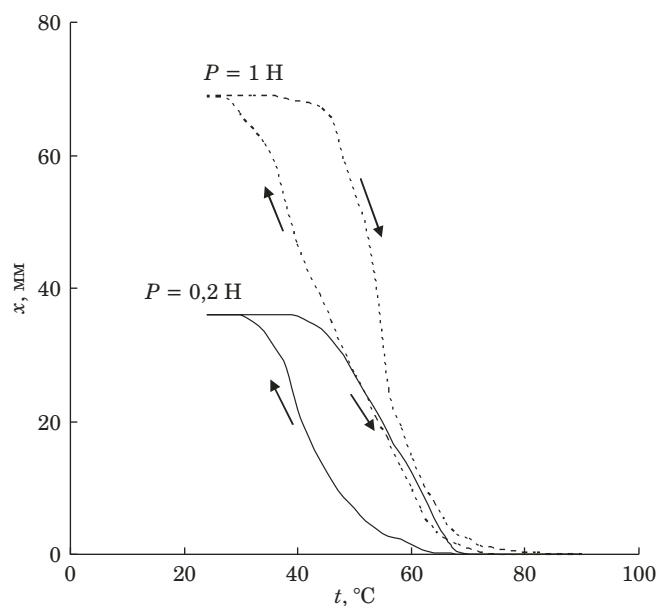


Рис. 4. Температурные зависимости горизонтального смещения свободного сечения пластины в термоцикле под постоянной нагрузкой

Fig. 4. The temperature dependences of the horizontal displacement of the free section of the plate in the thermal cycle under constant load

но зависит от радиуса кривизны ρ_0 и уменьшается в 4,7 раза. При этом, как показано на рис. 3, коэффициент восстановления формы k_c (формула 6) равен практически единице при всех ρ_0 , т.е. деформация пластины при нагреве восстанавливалась полностью.

В результате изотермического деформирования с постепенно увеличивающейся кривизной у пластины были сформированы низкотемпературная криволинейная форма и высокотем-

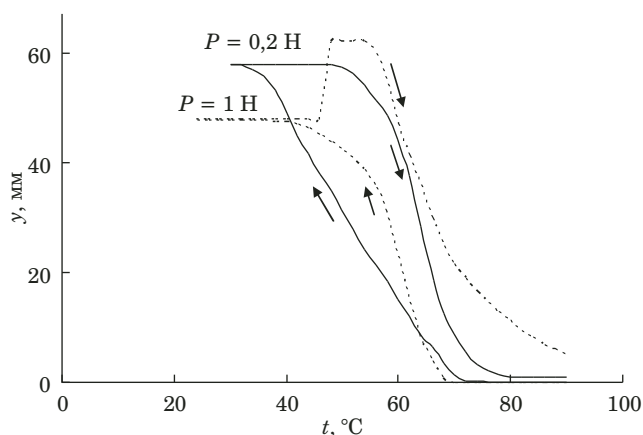


Рис. 5. Температурные зависимости вертикального смещения свободного сечения

Fig. 5. The temperature dependence of the vertical displacement of the free section

пературная плоская форма. Далее пластину деформировали, проводя термоцикл от 90 до 24 °C и обратно под постоянной нагрузкой. На этапе охлаждения наблюдали изгиб пластины вдоль длинной стороны и смещение незакрепленной короткой стороны вдоль горизонтальной и вертикальной осей, как показано на рис. 2.

Зависимости смещения концевой сечения по горизонтали от температуры при двух значениях изгибающей силы представлены на рис. 4, а по вертикали — на рис. 5. Температурные кривые, приведенные на рис. 4, показывают, что максимальное смещение сечения по горизонтали возрастает с увеличением приложенной силы. Температурные интервалы мартенситных переходов смещены друг относительно друга для представленных нагрузок. Из рис. 5 видно, что вертикальное смещение сечения при нагрузке $P = 0,2$ Н в температурном цикле изменяется гистерезисным образом. При нагрузке $P = 1$ Н пластичность превращения уменьшается по сравнению с эффектом при $P = 0,2$ Н, а на этапе нагрева наблюдается реверс перемещения вблизи температуры A_n . При обратном мартенситном переходе пластина частично выпрямляется в сторону приложенной силы, что на начальном этапе нагрева приводит к увеличению вертикального смещения концевой сечения, по мере дальнейшего нагрева наблюдается восстановление вертикальной составляющей изгиба. По-видимому, сложная немонотонная зависимость $y(t)$ обусловлена предварительно сформированной на первом этапе изотермического деформирования кольцевой формой, к которой пластина стремится вернуться при охлаждении.

На рис. 6 представлены траектории перемещения незакрепленного сечения пластины при изгибе под действием постоянной силы, которые

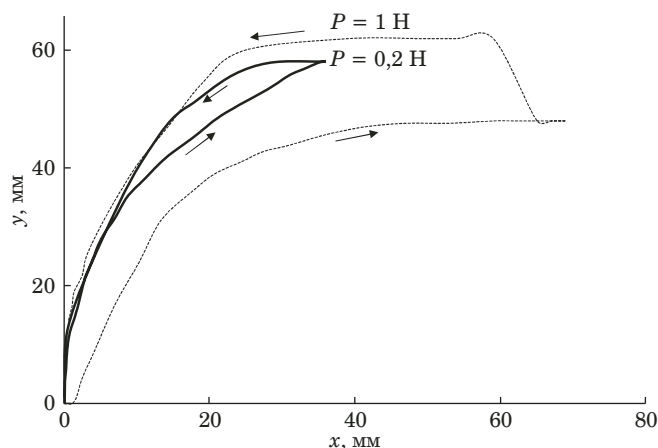


Рис. 6. Траектория смещения свободного сечения пластины при термоциклировании под постоянной нагрузкой

Fig. 6. The trajectory of the displacement of the free section of the plate during thermal cycling under constant load

показывают изменение кривизны пластины при охлаждении и нагреве. На начальном этапе охлаждения незакрепленный конец пластины интенсивно смещается по вертикали y , т.е. наблюдается плоский изгиб, затем увеличивается скорость накопления горизонтального смещения x , приводящая к возрастанию кривизны пластины, что хорошо заметно на траектории при усилии $P = 1,0$ Н. В начале обратного мартенситного перехода под нагрузкой $P = 0,2$ Н наблюдается восстановление формы пластины в горизонтальном направлении, затем синхронное формовосстановление по x и y . В условиях действия нагрузки $P = 1,0$ Н (см. рис. 6) на начальном этапе обратного перехода пластина выпрямляется, о чем свидетельствует повышение координаты y и последующее уменьшение координаты x .

Смещения концевой сечения пластины за счет пластичности прямого мартенситного превращения по горизонтали и вертикали от начального положения в зависимости от действующего усилия показаны на рис. 7. Горизонтальное смещение возрастает при увеличении действующей при охлаждении нагрузки P , вертикальное смещение при этом убывает в силу того, что свободный конец пластины при нагрузках более 0,6 Н перемещается так, что пластина сворачивается в кольцо.

Линейную деформацию растянутой поверхности пластины, обусловленную пластичностью прямого превращения, вычисляли по формуле (9). Эта деформация монотонно возрастает с увеличением приложенной силы (рис. 8).

Заключение

Предложена методика расчета деформаций при формовосстановлении плоской пластины из

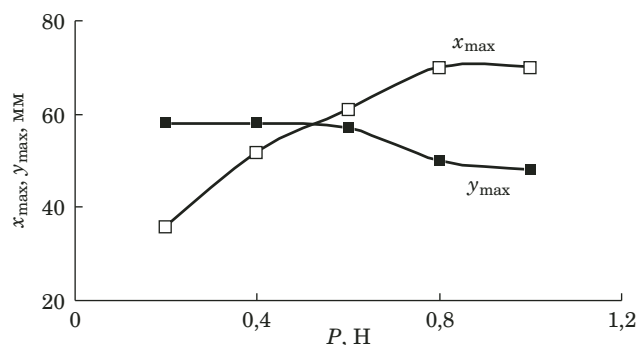


Рис. 7. Зависимости максимального смещения свободного сечения пластины на этапе охлаждения от нагрузки

Fig. 7. The dependence of the maximum displacement of the free section of the plate on the load at the stage of cooling

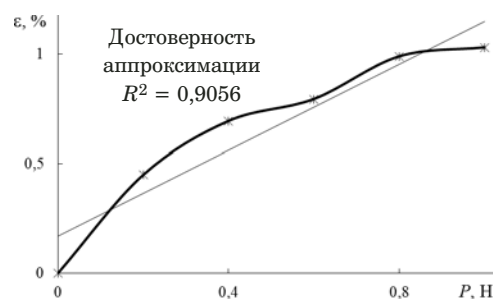


Рис. 8. Зависимость линейной деформации, обусловленной пластичностью превращения, от нагрузки

Fig. 8. The dependence of the linear deformation attributed to the transformation plasticity on the load

никелида титана в условиях изотермических и неаизотермических силовых воздействий.

Показано, что эффект памяти формы прямоугольной пластины из никелида титана после изотермического изгиба возрастает при уменьшении задаваемого радиуса кривизны.

Показано, что кривизна сложным образом изменяется при изгибе защемленной пластины путем термоциклирования под постоянной нагрузкой через интервалы мартенситных переходов.

Из полученных результатов следует, что пластина из никелида титана — перспективный элемент конструкций исполнительных механизмов, действующих в разнообразных функционально-механических условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Belyaev S., Evard M., Lomakin I., Resnina N., Volkov A., Rubanik V. Functional properties of shape memory bimetal plate / Materials Today: Proceedings 2S. 2015. P. 723 – 726. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.384.
2. Belyaev S., Resnina N., Lomakin I., Rubanik V. Functional properties of 'Ti₅₀Ni₅₀ – Ti_{49,3}Ni_{50,7}' shape memory composite produced by explosion welding / Smart Materials and Structures. 2014. Vol. 23. N 8. 085029 (8 p.). DOI: 10.1088/0964-1726/23/8/085029.

3. Belyaev S., Resnina N., Borisov V., Lomakin I., Rubanik V., Rubanik V., Rubanik O. Functional properties of bi-metal composite of “stainless steel – TiNi alloy” produced by explosion welding / *Physics Procedia*. 2010. N 10. P. 52 – 57. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.11.074.
4. Velaphi Msomi, Graeme John Oliver. Smart morphing based on shape memory alloy plate / *Journal of Engineering, Design and Technology*. 2016. Vol. 14. Issue 3. P. 475 – 488. DOI: 10.1108/JEDT-08-2014-0056.
5. Гусев Д. Е., Колеров М. Ю., Орешко Е. И. и др. Оценка биомеханической совместимости имплантируемых опорных пластин из сплавов на основе титана и никелида титана методом компьютерного моделирования / *Титан*. 2011. N 3. С. 37 – 42. https://www.implants.ru/files/Science/articles_technology/28.pdf.
6. Viet N. V., Zaki W., Umer R. Bending models for superelastic shape memory alloy laminated composite cantilever beams with elastic core layer / *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 147. N 15. P. 86 – 103. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.04.035.
7. Reza Mirzaeifar, Reginald DesRoches, Arash Yavari, Ken Gall. On superelastic bending of shape memory alloy beams / *International Journal of Solids and Structures*. 2013. Vol. 50. N 10. P. 1664 – 1680. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2013.01.035.
8. Young-JinKim, Chang-Ho Lee, Joung-Hun Kim, Jae Hyuk Lim. Numerical modeling of shape memory alloy plates considering tension/compression asymmetry and its verification under pure bending / *International Journal of Solids and Structures*. 2018. Vol. 136 – 137. N 10. P. 77 – 88. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.12.004.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1970. — 720 с.
10. Тимошенко С. П. Курс теории упругости. — М.: Наукова думка, 1972. — 501 с.
11. Ландау Л. Д. Теория упругости. — М.: Наука, 1987. — 248 с.
2. Belyaev S., Resnina N., Lomakin I., Rubanik V. Functional properties of ‘Ti₅₀Ni₅₀ – Ti_{49.3}Ni_{50.7}’ shape memory composite produced by explosion welding / *Smart Materials and Structures*. 2014. Vol. 23. N 8. 085029 (8 p.). DOI: 10.1088/0964-1726/23/8/085029.
3. Belyaev S., Resnina N., Borisov V., Lomakin I., Rubanik V., Rubanik V., Rubanik O. Functional properties of bi-metal composite of “stainless steel – TiNi alloy” produced by explosion welding / *Physics Procedia*. 2010. N 10. P. 52 – 57. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.11.074.
4. Velaphi Msomi, Graeme John Oliver. Smart morphing based on shape memory alloy plate / *Journal of Engineering, Design and Technology*. 2016. Vol. 14. Issue 3. P. 475 – 488. DOI: 10.1108/JEDT-08-2014-0056.
5. Gusev D. E., Kolerov M. Yu., Oreshko E. I. Estimation of the biomechanical compatibility of implantable support plates of titanium-based and titanium-nickelide-based alloys by the method of computer simulation / *Titan*. 2011. N 3. P. 37 – 42. https://www.implants.ru/files/Science/articles_technology/28.pdf.
6. Viet N. V., Zaki W., Umer R. Bending models for superelastic shape memory alloy laminated composite cantilever beams with elastic core layer / *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 147. N 15. P. 86 – 103. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.04.035.
7. Reza Mirzaeifar, Reginald DesRoches, Arash Yavari, Ken Gall. On superelastic bending of shape memory alloy beams / *International Journal of Solids and Structures*. 2013. Vol. 50. N 10. P. 1664 – 1680. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2013.01.035.
8. Young-JinKim, Chang-Ho Lee, Joung-Hun Kim, Jae Hyuk Lim. Numerical modeling of shape memory alloy plates considering tension/compression asymmetry and its verification under pure bending / *International Journal of Solids and Structures*. 2018. Vol. 136 – 137. N 10. P. 77 – 88. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.12.004.
9. Korn G., Korn T. Handbook of Mathematics. — Moscow: Nauka, 1970. — 720 p. [in Russian].
10. Timoshenko S. P. Course of the theory of elasticity. — Moscow: Naukova Dumka, 1972. — 501 p. [in Russian].
11. Landau L. D. Theory of Elasticity. — Moscow: Nauka, 1987. — 248 p. [in Russian].

REFERENCES