

УДК 539.3

## МОДЕЛЮВАННЯ ХОЛОДНОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ОТВОРІВ У ЗРАЗКАХ ЗІ СПЛАВУ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ

*П. В. ЯСНІЙ, О. В. ДИВДИК, В. П. ЯСНІЙ*

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*

Методом скінченних елементів (МСЕ) змодельоване холодне пластичне деформування отвору в пластині з використанням сплаву із пам'яттю форми. Для цього використано механічні характеристики та температури старту й фінішу прямих і зворотних фазових перетворень. За результатами моделювання МСЕ у середовищі ANSYS Workbench отримано розподіл залишкових напружень у пластині в околі функціонального отвору після вилучення інструменту із пластини. Найбільші нормальні стискувальні напруження виникають всередині пластини, а на відстані 2...4 mm від отвору – напруження розтягу.

**Ключові слова:** *ефект пам'яті форми, NiTi сплав, фазові перетворення, мартенсит, аустенит, нормальні напруження, зміцнення отворів.*

**Вступ.** Розвиток техніки висуває підвищені вимоги до конструкційних матеріалів, їх характеристик міцності і довговічності. Сплави з пам'яттю форми (СПФ) [1–3] володіють хорошими характеристиками довговічності, високою міцністю, хорошою демпфувальною здатністю та стійкістю до агресивних середовищ [4, 5], що обумовлює їх застосування у багатьох галузях техніки. За відсутності напружень при низькій температурі мартенсит перебуває у фазі двійникування, а після механічного навантаження переходить у фазу переорієнтації і змінює свою мікроструктуру [6].

Розподіл залишкових напружень елементів конструкцій з отворами після їх холодної обробки тиском визначають аналітичними [7], числовими [8–10] і експериментальними методами [8, 11]. Виявлено основні закономірності впливу на тягу дорнування і діаметра отвору на розподіл напружень в околі отвору та довговічність пластин із алюмінієвого сплаву за сталої амплітуди навантаження [10, 12, 13]. Для зміцнення отворів холодним пластичним деформуванням використовують різні технологічні методи: продавлювання сферичних куль чи дорнів конічної форми з калібрувальною ділянкою [13–15], метод розрізної втулки [16, 17] та бар'єрного обтискування.

Перспективним є метод холодного зміцнення отворів за допомогою інструменту зі сплаву з пам'яттю форми [18, 19], зокрема, вдосконалений метод для зміцнення отворів, який забезпечує залишкові стискувальні напруження навколо отвору в осьовому і радіальному напрямках [19], завдяки інструменту із циліндричними буртами зі СПФ. Для моделювання ефекту пам'яті форми застосовують метод скінченних елементів (МСЕ) з використанням 3D термомеханічних моделей [20–22].

Мета роботи – змодельовати МСЕ перебіг пластичного деформування інструменту зі СПФ та обчислити залишкові напруження в околі функціонального отвору.

**Методика дослідження.** В основу дослідження для визначення залишкових стискувальних напружень в околі отвору взято МСЕ та метод холодного зміцнен-

ня отворів з використанням інструменту зі СПФ. Змодельовано в програмному середовищі ANSYS Workbench для матеріалу з односторонньою пам'яттю форми [21]. На пластину в системі координат  $XYZ$  накладено в точці  $A$  обмеження заборони переміщення вздовж осі  $Z$  (рис. 1a). Побудована скінченно-елементна геометрична 3D модель пластини з отвором (рис. 1b) і робочого інструменту зі СПФ (рис. 1c).

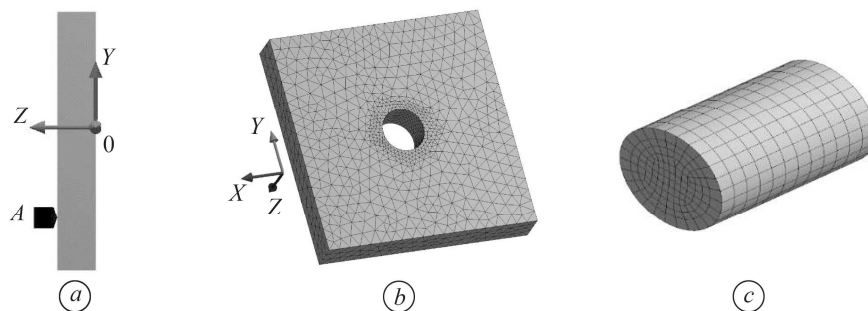


Рис. 1. Пластина в системі координат  $XYZ$  (a), скінченно-елементна геометрична 3D модель пластини (b) та робочого інструменту (c).

Fig. 1. Plate in the  $XYZ$  coordinate system (a), finite element 3D model of the plate (b) and working tool (c).

Розглядали квадратну пластину завтовшки  $t = 6$  mm зі сторонами  $40 \times 40$  mm та з функціональним отвором  $d = 8; 10$  та  $12$  mm із алюмінієвого сплаву Д16чТ (рис. 1b). Робочий інструмент зі СПФ у вигляді циліндра довжиною  $L = 12$  mm (рис. 1c). Діаграма деформування алюмінієвого сплаву за одновісного розтягу зображена на рис. 2. Механічні характеристики сплаву Д16чТ при  $20^\circ\text{C}$ :  $\sigma_{\text{uts}} = 300$  МПа, границя міцності  $\sigma_{0,2} = 430$  МПа. Фізико-механічні характеристики матеріалу інструменту подані у табл. 1 [23].

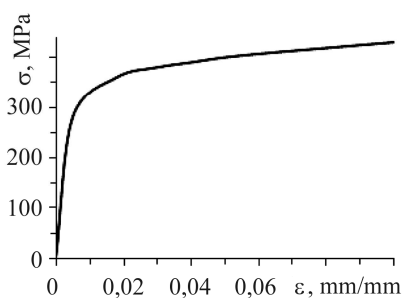


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Діаграма розтягу алюмінієвого сплаву Д16чТ.

Fig. 2. Stress-strain diagram of D16ChT aluminum alloy.

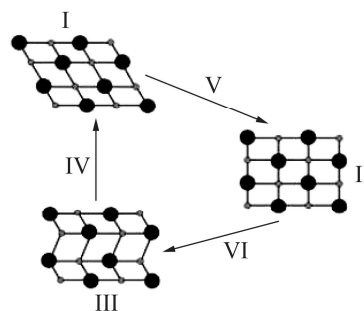


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Перетворення кристалічної ґратки у СПФ: I – мартенсит у фазі без двійникування; II – аустеніт; III – двійникований мартенсит; IV – навантаження; V – нагрів; VI – охолодження.

Fig. 3. Transformation of crystal structure of the shape memory alloys (SMA): I – detwinned martensite; II – austenite; III – twinned martensite; IV – loading; V – heating; VI – cooling.

Фаза мартенситу проявляється за нижчих температур і двічі змінюється кристалографічна ґратка (рис. 3): двійникування в холодному стані та переорієнтація за навантаження, зберігаючи деформацію у цій фазі після розвантаження.

Підвищення до температури  $A_f$  спричинятиме аустенітне перетворення, повертаючи матеріал до вихідного недеформованого стану.

**Таблиця 1. Фізико-механічні характеристики сплаву NiTi з ефектом пам'яті форми [23]**

Модуль пружності, МПа		Коефіцієнт Пуассона	Температури перетворень, °С			
			Фази мартенситу		Фази аустеніту	
$E_a$	$E_m$	$\nu$	$M_f$	$M_s$	$A_s$	$A_f$
52700	45000	0,33	-96	-69	-60,5	-38,7

Подані (табл. 2) діаметри отвору пластини зі сплаву Д16сТ, інструменту з NiTi сплаву до  $D_0$  та після деформування  $D_1$  у фазі мартенситу. Для моделювання обрали робочий інструмент у вигляді суцільного циліндра із пам'яттю форми діаметром  $D_0 = 8; 10$  і  $12$  mm, більшим за початковий діаметр отвору в пластині  $d_0$ , який деформували одновісним розтягом до діаметру  $D_1 < d_0$  і поміщали в отвір пластини. За нагрівання до температури  $A_f$  СПФ переходить у фазу аустеніту і, розширюючись у отворі пластини до  $d_0$ , створюватиме напруження в околі отвору. Після охолодження до температури  $M_f$  інструмент вилучають із отвору, формуючи залишкові стискувальні напруження в його околі. Розширення отвору визначали за формулою

$$i = (d_1 - d_0)/d_0 \cdot 100\%.$$

**Таблиця 2. Геометричні розміри пластини та інструменту зі СПФ**

Розмір пластини $a \times b$	Початковий діаметр інструменту $D_0$	Діаметр інструменту після деформації $D_1$	Початковий діаметр отвору пластини $d_0$	Діаметр пластини після зміцнення $d_1$	Натяг дорнування $i, \%$
mm					
40×40	8	7,736	7,76	7,95	2,4
		7,736	7,84	7,96	1,5
	10	9,67	9,70	9,94	2,4
		9,67	9,80	9,95	1,5
	12	11,604	11,64	11,93	2,4
		11,604	11,76	11,94	1,5

Для дискретизації моделей використано двадцятивузловий 3D скінченний елемент (СЕ) SOLID186. Для підвищення точності розрахунку МСЕ пластину дискретизували тетраедрами зі стороною 2 mm (див. рис. 1b), а навколо отвору тетраедрами зі стороною 0,5 mm. Інструмент – двадцятивузловими СЕ зі стороною 1 mm (див. рис. 1c).

Пластичне деформування отвору моделювали п'ятьма етапами. Робочий інструмент деформували розтягом за температури  $M_f = -96^\circ\text{C}$  (I); розвантажували і переміщували в отвір пластини за температури  $M_f = -96^\circ\text{C}$  (II). Поміщений в отвір інструмент нагрівали до температури вище  $A_f = -15^\circ\text{C}$  (III), після чого його деформували розтягом всередині отвору (IV) за температури  $M_f = -96^\circ\text{C}$  для вилучення з нього (V).

**Результати досліджень.** Побудовано розподіли нормальних залишкових напружень  $\sigma_y$  вздовж осі  $X$  в околі функціонального отвору за натягу дорнування  $i = 1,5$  та  $2,4\%$  (рис. 4a, b) та порівняно їх з результатами розрахунку залишкових напружень МСЕ у пластинах шириною 60 mm із отворами відповідного діаметра

[13] за натягу дорнування  $i = 2$  та 3%. Зображено залежності залишкових напружень в околі отвору для діаметрів 8 mm (рис. 4a, b) та 10, 12 mm (рис. 4c, d) в середній за товщиною ділянці пластини  $Z = t/2$  (рис. 4a, c) та на поверхні пластини  $Z = t$  (рис. 4b, d).

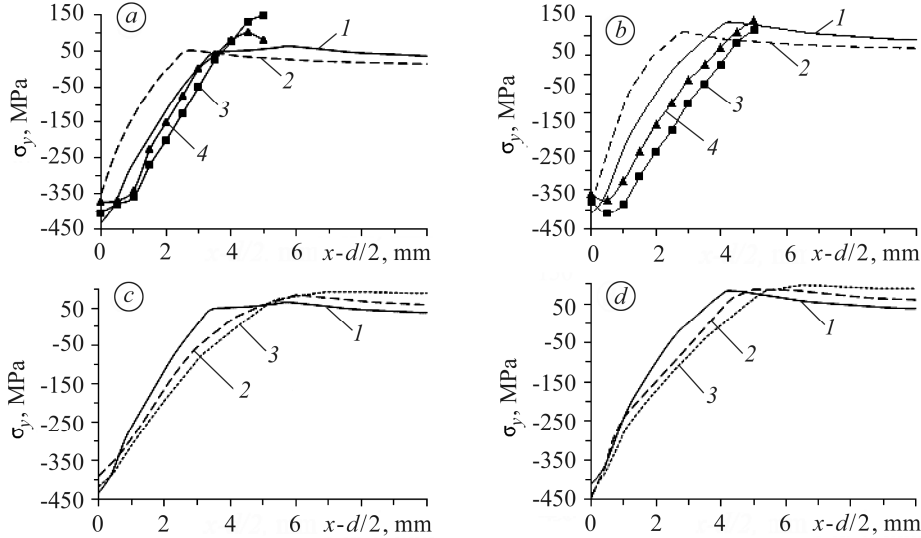


Рис. 4. Розподіл нормальних залишкових напружень вздовж осі  $X$  в околі функціонального отвору діаметром 8 mm (a, b: 1 – 2,4%; 2 – 1,5%; 3 – 3% [13]; 4 – 2% [13]) та 10 mm, 12 mm (c, d) при  $Z = t/2$  (a, c);  $Z = t$  (b, d) за натягу дорнування 2,4% (c, d: для діаметрів 1 – 8 mm; 2 – 10 mm; 3 – 12 mm).

Fig. 4. Distribution of normal residual stresses along  $X$ -axis in the vicinity of a hole with diameter 8 mm (a, b: 1 – 2.4%; 2 – 1.5%; 3 – 3% [13]; 4 – 2% [13]) and 10 mm, 12 mm (c, d) at  $Z = t/2$  (a, c);  $Z = t$  (b, d) with cold expansion degree  $i = 2.4\%$  (c, d: for diameter 1 – 8 mm; 2 – 10 mm; 3 – 12 mm).

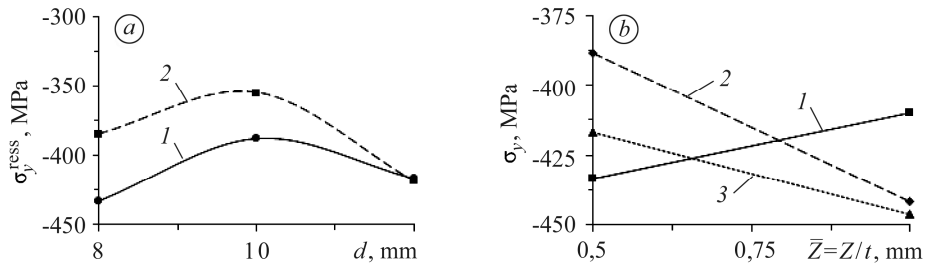


Рис. 5. Залежність максимальних залишкових стискувальних напружень від діаметра отвору при  $Z = t/2$  (a: 1 – 2,4%; 2 – 1,5%) та їх розподіл за товщиною пластини  $\bar{Z} = Z/t$  з отвором діаметром  $d = 8$  (1); 10 (2) та 12 mm (3) за натягу дорнування  $i = 2,4\%$ .

Fig. 5. Dependency of maximum residual compressive stresses on the hole diameter at  $Z = t/2$  (a: 1 – 2.4%; 2 – 1.5%) and its distribution along the thickness of the plate  $\bar{Z} = Z/t$  with  $d = 8$  (1); 10 (2) and 12 mm (3) with cold expansion degree  $i = 2.4\%$ .

Залежність максимальних залишкових стискувальних напружень (на поверхні отвору) від діаметра отвору  $d = 8, 10$  та 12 mm та натягу дорнування  $i = 2,4$  та 1,5% при  $Z = t/2$  показано на рис. 5a. За досліджених натягів дорнування найменші залишкові напруження виникають в околі отвору діаметром 10 mm, а найбільші в околі отворів діаметром 8 і 12 mm. Зі збільшенням діаметра отвору зменшується різниця між залишковими напруженнями на його поверхні в середній за товщиною ділянці пластини за відносного розширення отвору 1,5 і 2,4%. За ді-

метра отвору 12 mm залишкові нормальні напруження (при  $x = d/2$ ) для обох відносних розширень збігаються. Показано (рис. 5b) розподіл залишкових напружень на поверхні отвору ( $x = d/2$ ) за товщиною пластини за натягу дорнування  $i = 2,4\%$ . Максимальні стискувальні напруження в околі отвору діаметром 10 і 12 mm за однакового натягу дорнування виникають на поверхні пластини, а для діаметра 8 mm в її середній ділянці. Вказану інверсію можна пояснити різними співвідношеннями між діаметрами отвору та товщиною пластини.

### ВИСНОВКИ

Методом скінченних елементів змодельовано холодне пластичне деформування отвору в пластині з використанням СПФ як робочого інструменту і побудовано розподіл залишкових напружень в околі отвору для різних діаметрів і натягів дорнування. Дорнування базується на здатності СПФ проявляти односторонній ефект пам'яті форми. Максимальні стискувальні нормальні напруження в околі отвору діаметром 10 і 12 mm за однакового натягу дорнування виникають на поверхні пластини, а для  $\varnothing 8$  mm в її середній ділянці. Вказану інверсію можна пояснити різними співвідношеннями між діаметрами отвору та товщиною пластини. За натягу дорнування  $i = 1,5$  і  $2,4\%$  найменші залишкові стискувальні напруження в середній за товщиною ділянці пластини ( $Z = t/2$ ) виникають на поверхні отвору ( $x = d/2$ ) діаметром 10 mm, а найбільші на поверхні отвору  $\varnothing 8$  і 12 mm. Розподіл залишкових напружень в околі отвору, отриманий для діаметра інструменту  $d = 8$  mm, задовільно узгоджується із отриманими раніше результатами моделювання дорнування отворів МСЕ в алюмінієвих пластинках шириною 60 mm за відносного розширення отвору  $i = 2$  та  $2,4\%$ .

**РЕЗЮМЕ:** Методом конечных элементов (МКЭ) смоделировано холодное пластическое деформирование отверстия в пластине с использованием инструмента из сплава с памятью формы. Для моделирования использовали механические характеристики и температуры старта и финиша прямых и обратных фазовых превращений. В результате моделирования МКЭ в среде ANSYS Workbench получено распределение остаточных напряжений в пластине около функционального отверстия после удаления из него инструмента. Наибольшие нормальные остаточные сжимающие напряжения образуются в средней по толщине части пластины. На расстоянии 2...4 mm от края отверстия остаточные сжимающие напряжения переходят в растягивающие.

**Ключевые слова:** эффект памяти формы, NiTi сплав, фазовые превращения, мартенсит, аустенит, нормальные напряжения, упрочнение отверстий.

**SUMMARY:** Cold expansion of a hole in a plate using a shape memory alloy working tool was simulated by the finite element method (FEM). The tool expands and plastically deforms the material near the hole during heating. The mechanical properties and start and finish temperatures of the forward and reverse phase transformations were used for modelling. According to the obtained results using FEM in the ANSYS Workbench, the residual stress distribution in the plate in the vicinity of functional hole was calculated. The largest residual normal compressive stresses were observed in the middle part of the plate. The residual tensile stress occurred at a distance of 2 to 4 mm from the hole edge.

**Keywords:** shape memory effect, NiTi alloy, phase transformations, martensite, austenite, normal stresses, opening apertures.

1. Giurgiutiu V. and Zagrai A. The use of smart materials technologies in radiation environment and nuclear industry // Proc. SPIE 7<sup>th</sup> Int. Symp. on Smart Struct. and Mater. and 5<sup>th</sup> Int. Symp. on Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aging Infrastructure. – 2000. – **3985**. – P. 855–866.
2. Ming H. W. Industrial applications for shape memory alloys // Proc. Int. Conf. Shape Mem. Superelastic Technologies, Pacific Grove, Calif. – 2000. – **19**. – P. 171–182.
3. Properties and medical applications of shape memory alloys / D. Tarniță, D. Tarniță, N. Bîzdoacă, V. M. Mîndrilă // Room. J. Morphol. Embryol. – 2009. – **50**, № 1. – P. 15–21.
4. Особливості деформування сплаву нітинол після електролітичного наводнювання / В. П. Ясній, Г. М. Никифорчин, О. Т. Цирульник, О. З. Студент // Фіз.-хім. механіка

- матеріалів. – 2018. – **54**, № 4. – С. 124–130.  
(*Specific features of deformation of the nitinol alloy after electrolytic hydrogenation / V. P. Iasnii, H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyryl'nyk, O. Z. Student // Materials Science. – 2019. – 54, № 3. – P. 582–588.*)
5. Ясній В. П., Студент О. З., Ницифорчин Г. М. Вплив наводнювання на характер руйнування сплаву нітинол за розтягу // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2019. – **55**, № 3. – С. 80–85.  
(*Iasnii V. P., Student O. Z., and Nykyforchyn H. M. Influence of hydrogenation on the character of fracture of nitinol alloy in tension // Materials Science. – 2019. – 55, № 3. – P. 386–391.*)
  6. Yasnii V. P., Nykyforchyn H. M., and Student O. Z. Fractographic peculiarities of fatigue fracture of nitinol alloy // *Physicochem. Mech. Mater.* – 2019. – **55**, № 5. – P. 148–154.
  7. Zhang Y., Fitzpatrick M. E., and Edwards L. Analysis of the residual stress around a cold-expanded fastener hole in a finite plate // *Strain.* – 2005. – **41**, № 2. – P. 59–70.
  8. Zhang Y., Fitzpatrick M. E., and Edwards L. Measurement of the residual stresses around a cold expanded hole in an EN8 steel plate using the contour method // *Materials Science Forum. Trans. Tech. Publ.* – 2002. – **404**. – P. 527–534.
  9. Kawdi B. and Shanmukh D. N. Cold hole expansion process for stress analysis and evaluation of fatigue properties // *J. Mech. Civ. Eng.* – 2009. – P. 21–27.
  10. Yasnii P., Glado S., Iasnii V. Lifetime of aircraft alloy plates with cold expanded holes // *Int. J. Fatigue.* – 2017. – **104**. – P. 112–119.
  11. Measurement of residual stresses following overloading of cold expanded holes using the X-ray diffraction technique and finite element method / B. Nadri, L. Edwards, M. Fitzpatrick, and A. Lodini // *J. of Neutron Research.* – 2004. – **12**, № 1–3. – P. 1–11.
  12. Lacarac V., Smith D., and Pavier M. The effect of cold expansion on fatigue crack growth from open holes at room and high temperature // *Int. J. Fatigue.* – 2001. – **23**. – P. 161–170.
  13. Формування залишкових напружень у пластинах з функціональними отворами після дорнування / П. В. Ясній, С. В. Гладь, В. В. Скочиляс, О. І. Семенець // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – **50**, № 6. – С. 95–98.  
(*Formation of residual stresses in plates with functional holes after mandrelling / P. V. Yasnii, S. V. Hlad'o, V. V. Skochylyas, O. I. Semenets // Materials Science. – 2015. – 50, № 6. – P. 877–881.*)
  14. Gopalakrishna H. D., Narasimha Murthy H. N., and Krishna M. Cold expansion of holes and resulting fatigue life enhancement and residual stresses in Al 2024 T3 alloy – An experimental study // *Eng. Fail. Anal.* – 2010. – **17**, № 2. – P. 361–368.
  15. Elajrami M., Melouki H., and Boukhoulda F. B. Effect of double cold expansion on the fatigue life of rivet hole // *Int. J. Mining, Metall. Mech. Eng.* – 2013. – **1**, № 2. – P. 111–113.
  16. Patent USA № 8915114. B23P9/025 B2. Device and tool for cold expansion of fastener holes / T. Yordan, G. Duncheva. – Publ. 12.23.2014.
  17. Pasta S. and Mariotti G. V. Effect of residual stresses and their redistribution on the fatigue crack growth in cold-worked holes // *Int. Conf. CRACK PATHS.* – 2009. – P. 895–902.
  18. Patent USA № 5265456A. B23P9/02. Method of cold working holes using a shape memory alloy tool / Kennedy, James R., Larson. – Publ. 11.30.1993.
  19. Патент України № 132422. МПК В24В 39/00. Інструмент із сплаву з пам'яттю форми для зміцнення отворів в пластинах / П.В. Ясній, О.В. Дивдик, В. П. Ясній. – Опубл. 25.02.2019, Бюл. № 4.
  20. Modeling of latent heat effects on phase transformation in shape memory alloy thin structures / K. M. Armattoo, C. Bouby, M. Naboussi, and T. Ben // *Int. J. of Solids and Struct.* – 2016. – **88–89**. – P. 293–295.
  21. Divringi K. and Ozcan C. Advanced Shape Memory Alloy Material Models for ANSYS [Electronic resource] // *Ozen Eng. Inc.* – **94085**, № 408.
  22. Auricchio F. and Petrini L. Improvements and algorithmical considerations on a recent three-dimensional model describing stress-induced solid phase transformations // *Int. J. Numer. Methods Eng.* – 2002. – **55**, № 11. – P. 1255–1284.
  23. Ясній В. П., Юнга Р. Фазові перетворення та механічні властивості сплаву нітинол з пам'яттю форми // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 3. – С. 107–111.  
(*Iasnii V., Junga R. Phase Transformations and mechanical properties of the nitinol alloy with shape memory // Materials Science. – 2018. – 54, № 3. – P. 406–411.*)

Одержано 13.12.2019