

**ЗАСТОСУВАННЯ СПЛАВІВ ІЗ ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ
У БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ**

**EMPLOYMENT OF SHAPE MEMORY ALLOYS
IN BUILDING STRUCTURES**

Биків Н.З., аспірант, **Ясній В.П.,** д.т.н. доцент, завідувач кафедри будівельної механіки (Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль)

Bykiv N.Z., postgraduate, **Iasnii V.P.,** D. Sc., Associate Professor, Head of the Department of Structural Mechanics (Ternopil Ivan Puluji National Technical University, Ternopil)

Сплави з пам'яттю форми (СПФ) – це один із новітніх типів матеріалів, що є наступним етапом розвитку інтелектуальних. Вони здатні витримувати значні деформації (6-8%) та повертатися до своїх початкових станів. Основними властивостями цих сплавів є ефект пам'яті форми та ефект надпружності. Сплави пам'яті форми ефективно застосовуються у будівництві для підвищення стійкості конструкції та для розсіювання енергії зовнішніх чинників, будучи безпосередньо використаними у конструкції чи у приладах розсіювання енергії. СПФ використовують у формі дротин, стержнів, пружин, пластин та інших. Вивчення поведінки сплавів пам'яті форми у різних типах конструкцій за різних умов експлуатації продовжується.

Shape memory alloys (SMAs) – are one of the newest types of materials, which is the next stage in the development of intellectual one. Shape memory alloys, after application and removal of a load, are able to recover significant deformations (6-8%) and return to their predetermined shape. The main properties of these alloys are the shape memory effect and the pseudoelastic effect. Such properties give memory alloys a promising position among damping design solutions for passive, semi-active and active control methods. Shape memory alloys are effectively used in civil engineering to increase the stability of the structure and to dissipate energy from external exciters, compared to the classic design of plastic hinges.

The use of rods made of shape memory alloys in beams effectively restores the shape after bending deformations (up to 27%), closes cracks (up to 14% of crack width), absorbs residual stresses (up to 4%) and energy (up to 50%). When used in large bridges, shape memory alloys effectively dampen the amplitudes of free fluctuations (63%) and torsion (18%), and fluctuations (58%) and torsions (17%) caused by a moving body.

Shape memory alloys are also used in energy dissipation devices. Form memory alloys are used as wires, rods, springs, plates and more. Wires are a simple and effective way to use shape memory alloys in energy dissipation devices. To simplify calculations

and create predictable behavior in structures, a prototype has been developed that causes the tensile element of the memory to form exclusively tensile stresses. The possibility of pre-tensioning the shape memory alloy in such devices eliminates functional fatigue and the possibility of residual deformations.

The study of the behavior of shape memory alloys in different types of structures under different operating conditions continues.

Ключові слова: сплави з пам'яттю форми, ефект псевдопружності, підсилення, залізобетонні конструкції, розсіювання енергії, коливання.

Keywords: shape memory alloys, pseudoelasticity, reinforced concrete structures, strengthening, energy dissipation, fluctuation.

Вступ. Традиційні будівельні матеріали вже пройшли випробування часом і здобули визнання серед інженерів та архітекторів. Проте, для вирішення проблем сьогодення і створення технологічних конструкцій та споруд необхідно використовувати функціональні матеріали, одними з яких є сплави із пам'яттю форми (СПФ). Ці матеріали застосовують у різних галузях: літакобудуванні [1–3], космічній, машинобудівній [4–6], робототехніці [7–9], біоінженерії [10] та інших [11]. У будівництві та цивільній інженерії даний сплав є відносно новим. При розрахунку будівельних споруд з урахуванням епізодичного навантаження [12] збільшуються витрати матеріалів і собівартість конструкції. Застосування нових матеріалів, у тому числі й СПФ, може мати визначальну роль у вирішенні даної проблематики.

Серед СПФ комерційні сплави на основі NiTi демонструють одні з найвищих показників відновлення деформацій за дії ефектів пам'яті форми та надпружності, стійкість до корозії, біосумісність і достатні втомні характеристики. Застосування дротів і стержнів круглого сечення – це просте та ефективне рішення, що спрощує розрахунки завдяки рівномірним і передбачуваним напруженим станам. Виготовлення СПФ із круглим сеченням значно полегшує та збільшує обсяги виробництва, завдяки чому здешевлюється собівартість виготовлення.

Варто врахувати, що в усіх СПФ, у тому числі сплавах на базі нікелю (Ni), циклічне навантаження призводить до зменшення петлі гістерезису та накопичення залишкових деформацій. Діаметр і довжина теж впливають на ефективність роботи стержнів із СПФ. Відомо, що ефект надпружності у СПФ працює, коли зовнішня температура вища за температуру завершення аустенітної фази перетворень. Зниження зовнішньої температури зменшує площу петлі гістерезису. Так, тонкі дротини діаметром 0,5 мм залишаються у мартенситній фазі і не відновлюються до аустенітної, коли зовнішні температури опускаються нижче 273 К. Проте, дротини діаметром 2,36 мм зберігали ефект надпружності до 240 К [13].

При роботі стержнів СПФ за одновісного розтягу-стиску довжина впливає на фактичне значення відновлення деформацій. Так СПФ, які відновлюють 6% деформацій, довжиною в 1 м відновить 6 см видовження. Цей же сплав довжиною 10 м відновить 60 см.

Слід врахувати також особливість використання дротин і стержнів малого діаметра, оскільки вони можуть ефективно застосовуватися тільки за розтягу.

Приклади застосування СПФ у конструкціях. Розглядаючи СПФ як допоміжну арматуру у залізобетонних балках [14], з'явилась потреба розуміти, як поводить ся надпружний елемент у різних типах бетону [15,16]. У роботі [16] досліджували вісім балок, дві з яких підсилені прутками із NiTi сплаву. Двопролітні вільнооперті балки (рис.1) піддавали циклічному навантаженню. Довжини СПФ становили 200 мм, 250 мм та 320 мм (табл.1).

Для виготовлення залізобетонних балок використано два класи бетону із міцностями: $f_{ctest} = 37,5$ МПа (BN1-S, BN1-Nm, BN2-S, BN2-Nm, табл.1) та $f_{ctest} = 53,8$ МПа (BH1-S, BH1-Nm, BH2-S, BH2-Nm, табл.1). Виявлено, що кращі показники надпружності були в балках із бетону міцністю $f_{ctest} = 37,5$ МПа. Збільшивши відсоток армування балки, навантаження, при якому бетон починав розтріскуватися, змінилося наступним чином: з 19,4 кН до 12,8 кН – для балок із бетону міцністю $f_{ctest} = 37,5$ МПа та з 38,9 кН до 37,5 кН – для балок із бетону міцністю $f_{ctest} = 53,8$ МПа за звичайного армування; з 15,4 кН до 12,7 кН – для балок із бетону міцністю $f_{ctest} = 37,5$ МПа та з 12,1 до 15,4 кН – для балок із бетону міцністю $f_{ctest} = 37,5$ МПа при використанні СПФ.

У балках із вищим відсотком армуванням та стержнями із СПФ (BN2-Nm та BH2-Nm, табл.1) ефективність закриття тріщин зростає до 12,5% (BN2-Nm, табл.1) та до 14,3% (BH2-Nm, табл.1). У балок із меншим відсотком армування та стержнями із СПФ (BN1-Nm та BH1-Nm, табл.1), ефективність закриття тріщин складала 5% (BN1-Nm, табл.1) та 12,5% (BH1-Nm, табл.1). Зафіксовано більшу граничну деформацію балки із СПФ. Цей ефект більший у балках із бетону міцністю $f_{ctest} = 37,5$ МПа. Також, застосування СПФ у балках збільшує ефективність розсіювання енергії на понад 50%, сповільнює процес втрати жорсткості до руйнування та покращує деформівність.

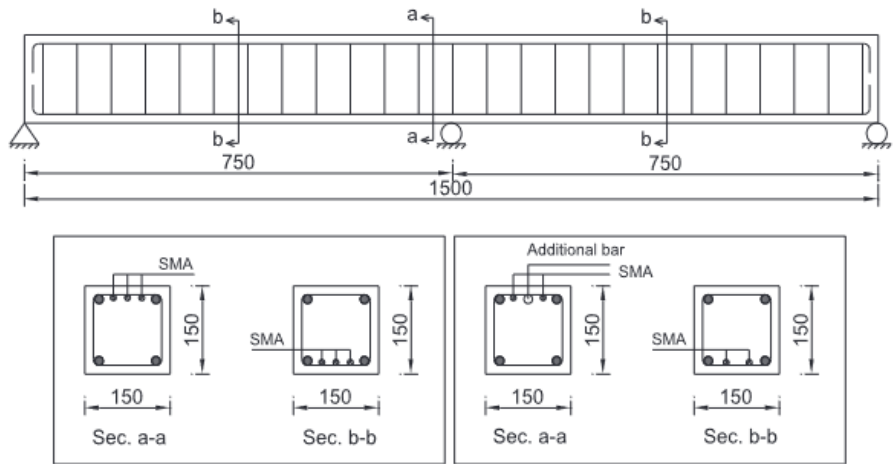


Рис. 1. Конструктивна схема досліджуваних балок [16]

Таблиця 1

Типи досліджуваних балок [16]

Group	Beam type	Section a-a			Section b-b	
		Steel bar	Additional steel bar	SMA strand	Steel bar	SMA strand
1	BN1-S	4Ø8	None	None	4Ø8	None
	BN1-Nm	4Ø8	None	3strand ₇ (L = 200)	4Ø8	3strand ₇ (L = 250)
	BH1-S	4Ø10	None	None	4Ø10	None
	BH1-Nm	4Ø10	None	3strand ₇ (L = 200)	4Ø10	3strand ₇ (L = 250)
2	BN2-S	4Ø10	1Ø8(L = 500)	None	4Ø10	None
	BN2-Nm	4Ø10	1Ø8(L = 500)	2strand ₇ (L = 250)	4Ø10	2strand ₇ (L = 320)
	BH2-S	4Ø12	1Ø10(L = 630)	None	4Ø12	None
	BH2-Nm	4Ø12	1Ø10(L = 630)	2strand ₇ (L = 250)	4Ø12	2strand ₇ (L = 320)

Основним із напрямків підсилення залізобетонних конструкцій надпружними сплавами є застосування їх у великогабаритних мостах [17].

Альтернативним застосуванням СПФ у мостових конструкціях є зовнішня надбудова для гасіння поперечних крутних коливань, що спричинені зовнішніми вібраціями [18]. До розробленої моделі мосту з органічного скла, представленої на рис. 2, кріпилися попередньо натягнуті (до 3,5%) стержні з нітинолу.

Досліджували поведінку мосту за дії вільних коливань, вільних крутних коливань (рис.3), вібраційних і крутних коливань, що спричинені рухомим тілом із сталою швидкістю (рис.4).

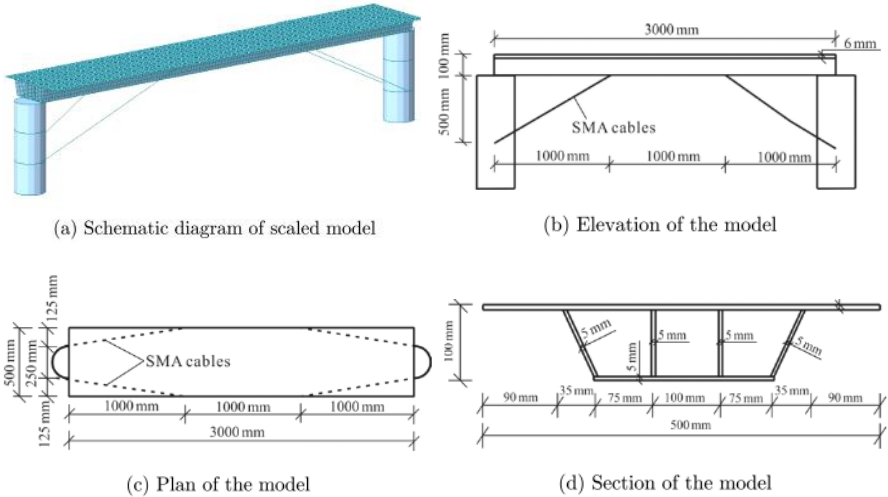


Рис. 2. Схема натурної моделі мосту [18]

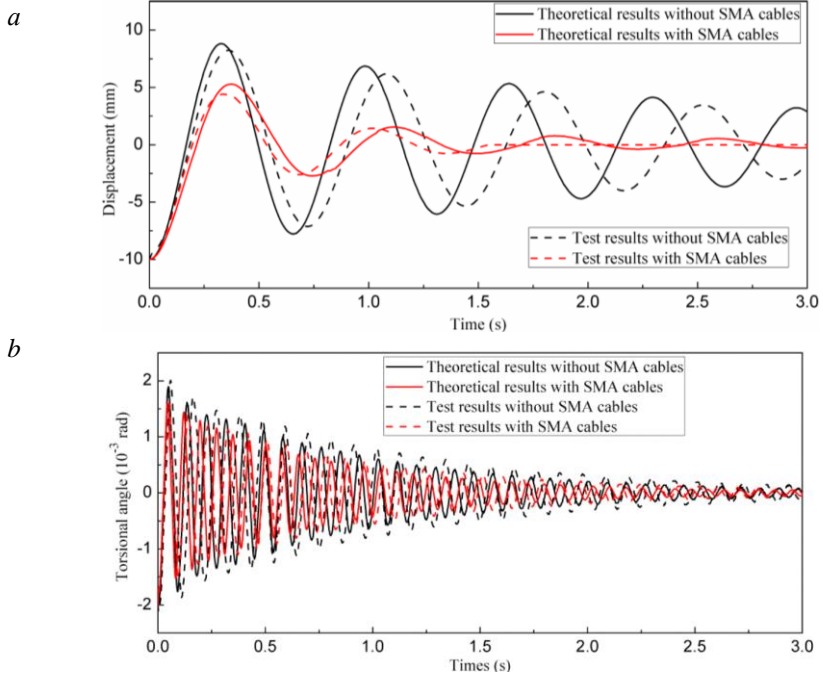


Рис. 3. Діаграми прогинів (а) та кручення (б) за вільного коливання [18]

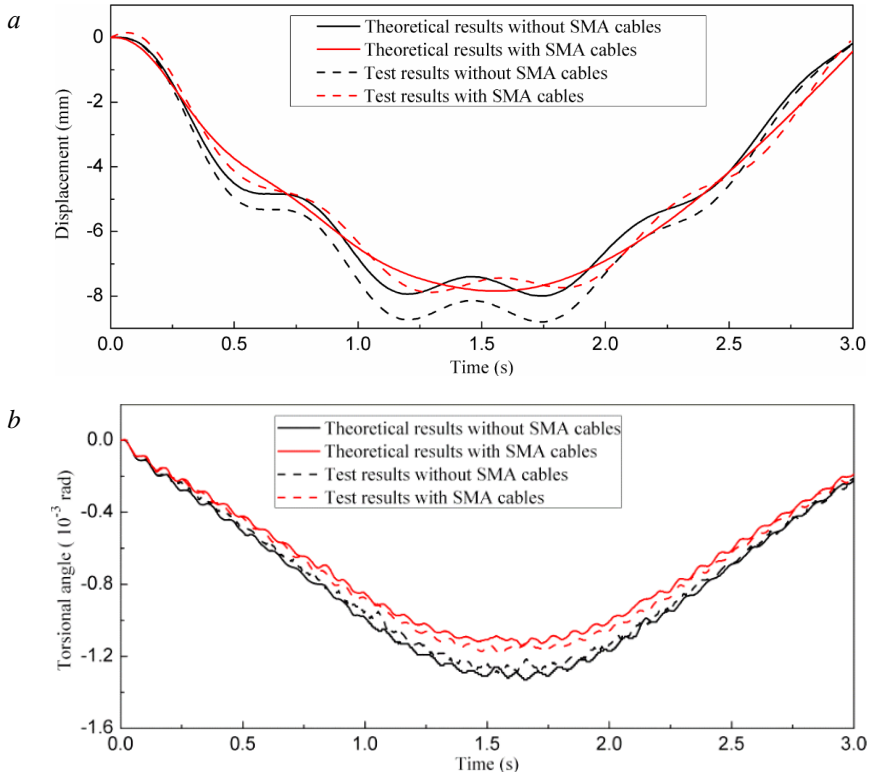


Рис. 4. Діаграми прогинів (а) та кручення (b), спричинені рухомим тілом із сталою швидкістю [18]

За результатами досліджень виявлено, що для прогнозування поведінки мостів із СПФ під дією вільних коливань та вільних коливань, спричинених рухомим тілом, відповідно, можна використовувати рівняння (1) та (2):

$$\rho A \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + c \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} + \delta(x - x_0) [k_{SMA} y(x,t) + c_{SMA} \frac{\partial y(x,t)}{\partial t}] = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \rho A \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + c \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} + \delta(x - x_0) \\ & \times [k_{SMA} y(x,t) + c_{SMA} \frac{\partial y(x,t)}{\partial t}] = \delta(x - vt) mg \end{aligned} \quad (2)$$

Застосування СПФ призвело до зменшення амплітуди вільних коливань на 63% та амплітуди кручення на 18% (рис.3). Амплітуди

кручення та вібраційних коливань, що спричинені рухомих тілом із сталю швидкістю зменшилися на 17% та 58%, відповідно (рис. 4) [18].

Також, розглядається доцільність використання СПФ як пластичних шарнірів, у тому числі в мостових опорах (рис. 5).

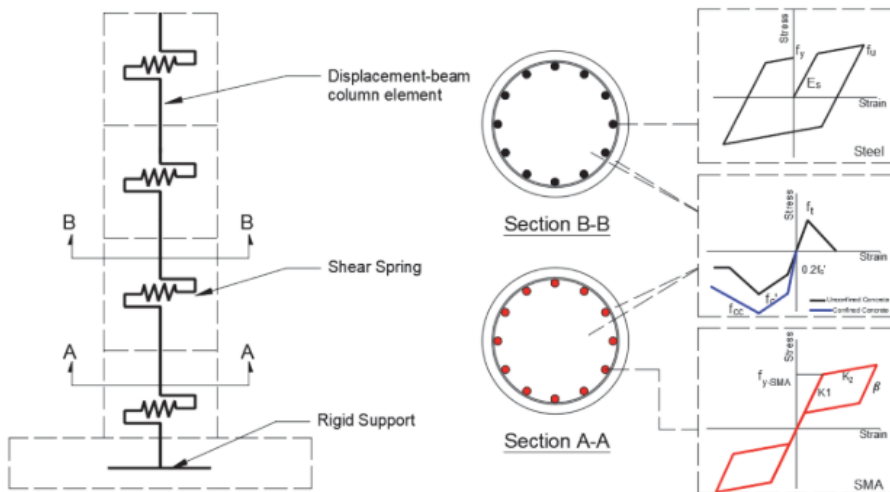


Рис. 5. Розрахункова модель опори мосту з пластичним шарніром зі СПФ [19]

Для визначення величини зміщення мостової конструкції із пластичним шарніром зі сплаву пам'яті форми, запропоновано використовувати формули (3) та (4):

$$\Delta_y = \frac{0.9\epsilon_{SMA}H^2}{3D} \text{ при } P/A_g f'_c > 0.05 \quad (3)$$

$$\Delta_y = \frac{0.7\epsilon_{SMA}H^2}{3D} \text{ при } P/A_g f'_c < 0.05 \quad (4)$$

де ϵ_{SMA} – відносне видовження за фазового перетворення; D – діаметр опори; H – висота опори; $P/A_g f'_c$ – коефіцієнт осьового навантаження; P – прикладене осьове навантаження, A_g – площа перерізу, f'_c – міцність бетону на стиск [19].

Варто зазначити, що впливом зовнішньої температури безпосередньо при застосуванні СПФ у конструкціях знехтували.

Сплави пам'яті форми також ефективно використовують при розробці приладів розсіювання енергії. Одним із таких приладів є прототип пасивного розсіювання енергії [20] створений із використанням двох дротин із надпружного NiTi сплаву, як основного компоненту.

Пристрій подібний до самоцентруючого приладу запроєктований Dolce та іншими у праці [21]. Ключовою відмінністю приладу є спеціальна конструкція, в якій дротини СПФ завжди сприйматимуть розтягуючі зусилля, навіть якщо прилад піддається стиску (рис. 6). Також, при розробці прототипу, закладена можливість попереднього натягу дротин із Нітинолу.

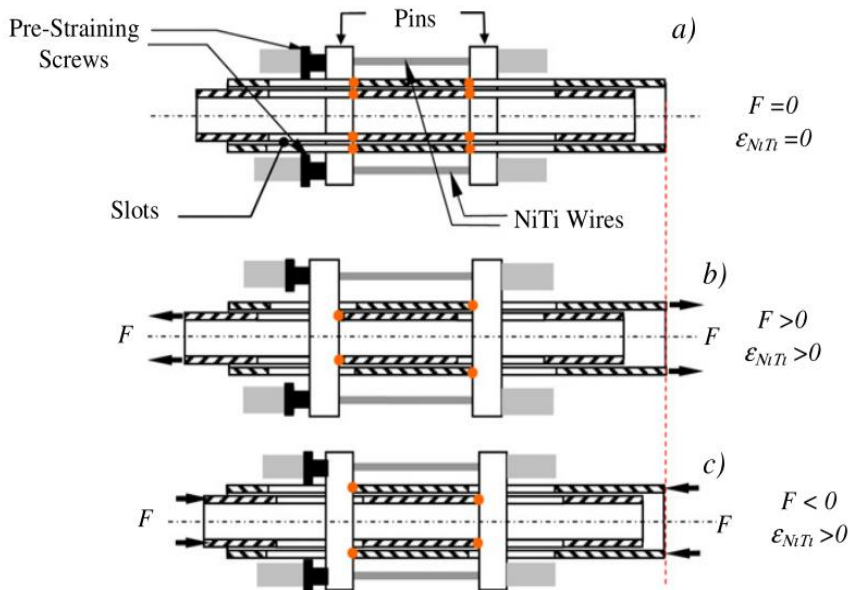


Рис. 6. Схематичне зображення принципу дії СПФ-приладу [20]

Враховуючи попереднє напруження, діаграма деформування дротини та залежність зусилля від переміщення пристрою представлені на рис. 7.

За циклічного навантаження в СПФ з'являється залишкова деформація до 2%, яку можна нівелювати, задавши необхідне попереднє напруження дротин.

Прототип, що розглядається у даній статті [20], був розроблений для номінальної довжини дроту з NiTi СПФ (вміст Ni 50,8%) довжиною 80 мм. Автор зазначає, що така довжина дозволяє нівелювати невеликі початкові різниці довжини завдяки попередньому натягу. Оскільки температура завершення аустенітної фази трансформації $A_f = -10$ °C, очікувалось, що пристрій працюватиме в стандартних умовах навколишнього середовища. Тому випробування проводили при кімнатній температурі 22°C на сервогідравлічній випробувальній машині.

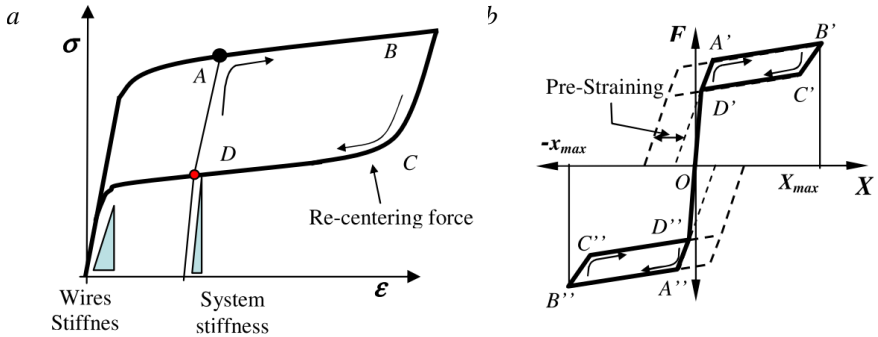


Рис. 7. Графіки напружено-деформованого стану дротини із Нітинолу (а) та приладу гасіння коливань (b) [20]

Було проведено два типи випробувань: зі звичайно закріпленими дротинами СПФ та із попередньо натягнутими дротинами в 2%. Ці прилади піддали 50-ти циклам розтягу-стиску зі швидкістю переміщення 1 мм/хв., але завдяки конструкції приладу, дротини піддавалися 100 циклам навантаження розтягом. На рисунку 8 представлено залежності зусилля від переміщення звичайно закріплених дротин (рис.8.a) і з натягом у 2% (рис.8.b). Амплітуди переміщення визначали з умов повного аустенітно-мартенситного перетворення NiTi сплаву. Це можна оцінити за невеликим збільшенням навантаження, яке спостерігається в кінці плато аустенітно-мартенситного перетворення (рис.8). Таким чином, амплітуди переміщень становили 6,75 мм для умов звичайного закріплення та 5 мм – для 2%-го попереднього натягу.

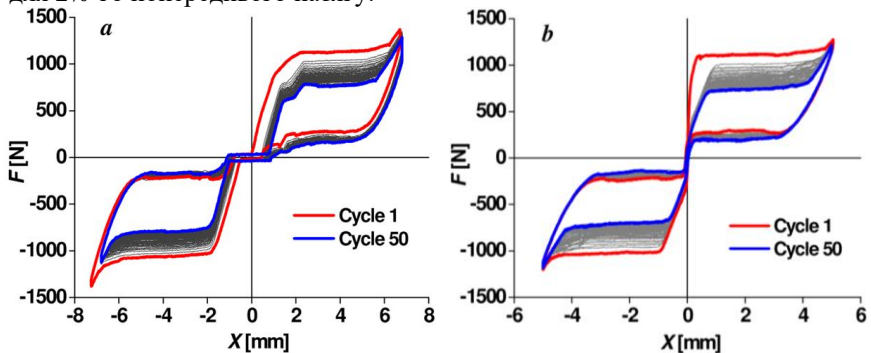


Рис. 8. Діаграми 50 циклів роботи приладів (100 циклів для дротин) із легким натягом (а) та 2% натягом (b) [20]

Функціональні властивості даного СПФ стабілізуються після 100 циклів навантаження, упродовж яких відбувається зменшення значень напружень аустенітно-мартенситного перетворення, що призводить до зменшення площі петлі гістерезису, а отже, кількості розсіюваної енергії.

References

1. Zhang Q. et al. Development and experimental verification of an adaptive structure for phased antenna array using SMA bunch // *Eng Struct.* Elsevier Ltd, 2020. Vol. 225. P. 111293.
2. Ajaj R.M. et al. Recent developments in the aeroelasticity of morphing aircraft // *Prog Aerosp Sci.* Elsevier Ltd, 2021. Vol. 120. P. 100682.
3. Pecora R. et al. SMA for aeronautics // *Shape Memory Alloy Engineering.* Elsevier, 2021. P. 527–559.
4. Leary M. et al. Design of shape memory alloy actuators for direct power by an automotive battery // *Mater Des.* Elsevier, 2013. Vol. 43. P. 460–466.
5. Zadafiya K. et al. Recent trends in non-traditional machining of shape memory alloys (SMAs): A review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology.* Elsevier Ltd, 2021. Vol. 32. P. 217–227.
6. Riccio A. et al. Shape memory alloys (SMA) for automotive applications and challenges // *Shape Memory Alloy Engineering.* Elsevier, 2021. P. 785–808.
7. Mao S. et al. Gait study and pattern generation of a starfish-like soft robot with flexible rays actuated by SMAs // *J Bionic Eng. Science Press*, 2014. Vol. 11, № 3. P. 400–411.
8. Hadi A. et al. Developing a novel SMA-actuated robotic module // *Sensors Actuators, A Phys.* Elsevier, 2010. Vol. 162, № 1. P. 72–81.
9. Mansour N.A. et al. Compliant closed-chain rolling robot using modular unidirectional SMA actuators // *Sensors Actuators, A Phys.* Elsevier B.V., 2020. Vol. 310. P. 112024.
10. Peng C. et al. Bio-inspired Design Methodology of Sensor-actuator-structure Integrated System for Artificial Muscle Using SMA // *Procedia CIRP.* Elsevier B.V., 2017. Vol. 65. P. 299–303.
11. Yasnii P.V. Dempfuiuchy i prystrii dlia transportuvania dovhomirnykh konstrukt sii / P.V. Yasnii, V.P. Iasnii. Patent na korysnu model №116582 Ukraïna, MPK F16F 7/12. Zaiavka № u2016 12829; zaiavl. 16.12.2016; opubl. 25.05.2017, Biul. № 10
12. DBN V.1.2-2:2006 Navantazhenia ta vplyvy. Normy proektuvania: ДБН В.1.2-2:2006. Ukraine, 2006.
13. Torra V., Casciati S., Vece M. Shape Memory Alloys Wires: From Small to Medium Diameter // *Adv Sci Technol.* 2016. Vol. 101. P. 79–88.
14. Bykiv N.Z., Yasnii P.V., Iasnii V.P. Modeling of mechanical behavior of

reinforced concrete beam reinforced by the shape memory alloy insertion using finite elements method // *Сучасні Технології Та Методи Розрахунків У Будівництві*. 2020. Vol. 3, № 13. P. 24–34.

15. Gholampour A., Ozbakkaloglu T. Understanding the compressive behavior of shape memory alloy (SMA)-confined normal- and high-strength concrete // *Compos Struct*. Elsevier Ltd, 2018. Vol. 202. P. 943–953.

16. Azadpour F., Maghsoudi A.A. Experimental and analytical investigation of continuous RC beams strengthened by SMA strands under cyclic loading // *Constr Build Mater*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 239. P. 117730.

17. Jung D., Wilcoski J., Andrawes B. Bidirectional shake table testing of RC columns retrofitted and repaired with shape memory alloy spirals // *Eng Struct*. Elsevier Ltd, 2018. Vol. 160. P. 171–185.

18. Ai-Rong L. et al. A Method of Reinforcement and Vibration Reduction of Girder Bridges Using Shape Memory Alloy Cables // *Int J Struct Stab Dyn*. 2017. Vol. 17, № 7. P. 6–23.

19. Abraik E., Al O. Examining the yielding displacement of concrete bridge piers equipped with shape memory alloy rebars Examining the yielding displacement of concrete bridge piers equipped with shape memory alloy rebars Emad Abraik.

20. Soul H., Yawny A. Self-centering and damping capabilities of a tension-compression device equipped with superelastic NiTi wires // *Smart Mater Struct*. 2015. Vol. 24, № 7. P. 075005.

21. Dolce M., Cardone D., Marnetto R. SMA recentering devices for seismic isolation of civil structures // *Smart Struct Mater 2001 Smart Syst Bridg Struct Highw*. 2001. Vol. 4330, № May. P. 238–249.

Список використаної літератури

1. Zhang Q. et al. Development and experimental verification of an adaptive structure for phased antenna array using SMA bunch // *Eng Struct*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 225. P. 111293.

2. Ajaj R.M. et al. Recent developments in the aeroelasticity of morphing aircraft // *Prog Aerosp Sci*. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 120. P. 100682.

3. Pecora R. et al. SMA for aeronautics // *Shape Memory Alloy Engineering*. Elsevier, 2021. P. 527–559.

4. Leary M. et al. Design of shape memory alloy actuators for direct power by an automotive battery // *Mater Des*. Elsevier, 2013. Vol. 43. P. 460–466.

5. Zadafiya K. et al. Recent trends in non-traditional machining of shape memory alloys (SMAs): A review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 32. P. 217–227.

6. Riccio A. et al. Shape memory alloys (SMA) for automotive applications and challenges // *Shape Memory Alloy Engineering*. Elsevier, 2021. P. 785–808.

7. Mao S. et al. Gait study and pattern generation of a starfish-like soft robot with flexible rays actuated by SMAs // *J Bionic Eng. Science Press*, 2014. Vol. 11, № 3. P.

400–411.

8. Hadi A. et al. Developing a novel SMA-actuated robotic module // *Sensors Actuators, A Phys. Elsevier*, 2010. Vol. 162, № 1. P. 72–81.

9. Mansour N.A. et al. Compliant closed-chain rolling robot using modular unidirectional SMA actuators // *Sensors Actuators, A Phys. Elsevier B.V.*, 2020. Vol. 310. P. 112024.

10. Peng C. et al. Bio-inspired Design Methodology of Sensor-actuator-structure Integrated System for Artificial Muscle Using SMA // *Procedia CIRP. Elsevier B.V.*, 2017. Vol. 65. P. 299–303.

11. Ясній П.В. Демпфуючий пристрій для транспортування довгомірних конструкцій / П.В. Ясній, В.П. Ясній. Патент на корисну модель №116582 Україна, МПК F16F 7/12. Заявка № u2016 12829; заявл. 16.12.2016; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10

12. DBN V.1.2-2:2006 Navantazhenia ta vplyvy. Normy proektuvania: ДБН В.1.2-2:2006. Ukraine, 2006.

13. Torra V., Casciati S., Vece M. Shape Memory Alloys Wires: From Small to Medium Diameter // *Adv Sci Technol*. 2016. Vol. 101. P. 79–88.

14. Bykiv N.Z., Yasniy P.V., Iasniy V.P. Modeling of mechanical behavior of reinforced concrete beam reinforced by the shape memory alloy insertion using finite elements method // *Сучасні Технології Та Методи Розрахунків У Будівництві*. 2020. Vol. 3, № 13. P. 24–34.

15. Gholampour A., Ozbakkaloglu T. Understanding the compressive behavior of shape memory alloy (SMA)-confined normal- and high-strength concrete // *Compos Struct. Elsevier Ltd*, 2018. Vol. 202. P. 943–953.

16. Azadpour F., Maghsoudi A.A. Experimental and analytical investigation of continuous RC beams strengthened by SMA strands under cyclic loading // *Constr Build Mater. Elsevier Ltd*, 2020. Vol. 239. P. 117730.

17. Jung D., Wilcoski J., Andrawes B. Bidirectional shake table testing of RC columns retrofitted and repaired with shape memory alloy spirals // *Eng Struct. Elsevier Ltd*, 2018. Vol. 160. P. 171–185.

18. Ai-Rong L. et al. A Method of Reinforcement and Vibration Reduction of Girder Bridges Using Shape Memory Alloy Cables // *Int J Struct Stab Dyn*. 2017. Vol. 17, № 7. P. 6–23.

19. Abraik E., Al O. Examining the yielding displacement of concrete bridge piers equipped with shape memory alloy rebars Examining the yielding displacement of concrete bridge piers equipped with shape memory alloy rebars Emad Abraik.

20. Soul H., Yawny A. Self-centering and damping capabilities of a tension-compression device equipped with superelastic NiTi wires // *Smart Mater Struct*. 2015. Vol. 24, № 7. P. 075005.

21. Dolce M., Cardone D., Marnetto R. SMA recentering devices for seismic isolation of civil structures // *Smart Struct Mater 2001 Smart Syst Bridg Struct Highw*. 2001. Vol. 4330, № May. P. 238–249.