

ОСНОВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА МОДУЛЬ ПРУЖНОСТІ АУСТЕНИТУ СПЛАВІВ ІЗ ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ

В даній роботі досліджено вплив асиметрії циклу навантаження на модуль пружності аустеніту псевдопружного NiTi сплаву з пам'яттю форми і його взаємозв'язок із залишковою деформацією. Зі збільшенням розмаху напружень від 509 МПа до 748 МПа оборотна деформація у першому циклі зростає з 3,7% до 7,7%. Встановлено, що за однакового ефективного модуля пружності NiTi сплаву залишкова деформація при асиметрії циклу навантаження 0,5 приблизно удвічі перевищує значення залишкової деформації при віднульовому циклі навантаження.

Ключові слова: псевдопружний NiTi сплав, асиметрія циклу навантаження, модуль пружності.

V. IASNII

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

MAIN REGULARITIES OF INFLUENCE OF CYCLIC LOADING PARAMETERS ON THE MODULE OF ELASTICITY AUSTENITE OF SHAPE MEMORY ALLOYS

In this paper, there were investigated the regularities of the influence of the amplitude and stress ratio on the effective Young's modulus of a pseudoelastic shape memory NiTi alloy and its relationship with other functional properties. Cylindrical specimens with a diameter of 4 mm and gage length of 12.5 mm, machined from rod that was 8 mm in diameter, were tested on servohydraulic testing machine STM-100 under uniaxial cyclic loading at temperature 0°C at stress ratio 0 and 0.5. Tests were carried out under displacement-controlled mode at stress ratio 0 and at stress ratio 0.5 under stress-controlled mode. With the increase in the loading cycles, the residual strain grows. An increase in the stress range from 509 to 605 MPa increases the residual strain that leads to the degradation of pseudoelasticity. However, with the further increase in the initial stress range to 740 MPa, the dependence of residual deformation on the number of loading cycles shifts below the same dependence for initial stress range 605 MPa. The indicated inversion from the general law could be due to the fact that the strain range at 740 MPa in the first cycle is 8.7% that exceeds the maximum strain under which the pseudoelastic effect is still visible. With an increase of the stress range from 509 MPa to 748 MPa, the reversible strain increases from 3.7% to 7.7% in the first cycle. Regardless of the stress range, for each stress ratio there were separate dependences of the effective Young's modulus of NiTi alloy on the residual strain. With both stress ratios, there was observed a decrease in the current effective elasticity modulus with an increase of the residual strain. The increase of the stress ratio from 0 to 0.5 leads to the significant shift to the right. In particular, the residual strain at stress ratio equals to 0.5 is around two times larger the value of residual strain at stress ratio equals to 0 at the same effective elasticity modulus.

Keywords: pseudoelastic NiTi alloy, stress ratio, module of elasticity.

Вступ

Сплави з пам'яттю форми (СПФ) є функціональними матеріалами, які характеризуються ефектом пам'яті форми і надпружністю. В основі цих ефектів лежить явище зворотного мартенситного перетворення.

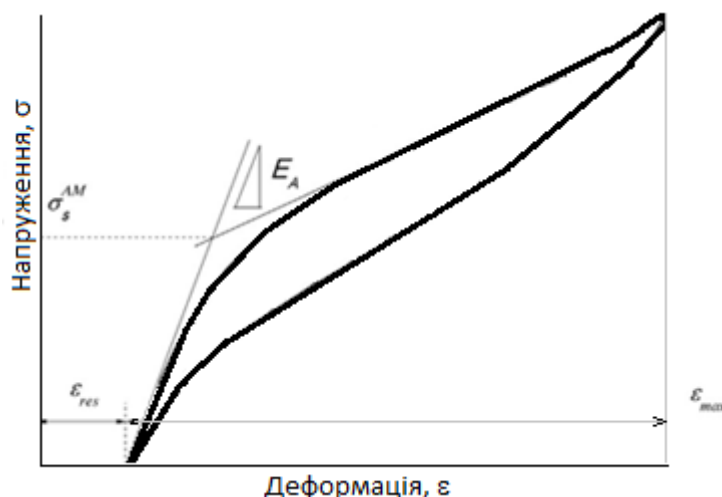


Рис. 1. Діаграма деформування псевдопружного сплаву при навантаженні і розвантаженні

Завдяки цим властивостям та їх біосумісності вони широко застосовуються в медицині, біоінженерії, аерокосмічній, машинобудівній, будівельній та інших галузях [1–3]. Для псевдопружних СПФ, крім механічної втоми, необхідно також знати як змінюються функціональні властивості під дією циклічного навантаження, зокрема це відновлювана та залишкова деформація, дисипована енергія, модуль пружності аустеніту, коефіцієнт демпфування. На рис. 1 представлено схематично діаграму деформування псевдопружного сплаву при навантаженні і розвантаженні, яка характеризується напруженням початку σ^{Ms} і завершення σ^{Mf} аустенітно-мартенситної трансформації; початку σ^{As} і завершення σ^{Af} мартенситно-аустенітної трансформації; модулем пружності аустеніту E_A і мартенситу E_M ; залишковою ε_{res} , оборотною ε_{rec} і пружною деформаціями ε_e [4].

Відомо, що пружно-пластичне деформування матеріалу супроводжується ростом та об'єднанням

розсіяних по об'єму тіла мікротріщин та пор, що призводить до зниження фізико-механічних властивостей матеріалу, виникнення макротріщини та викликає подальше руйнування конструкції. Вплив цього явища на поведінку матеріалу описують через параметр пошкоджуваності, який враховує зміну площі поперечного перерізу за рахунок мікродефектів [5].

Оскільки безпосереднє визначення ефективної площі поперечного перерізу є складним, було запропоновано визначати рівень пошкодження матеріалу за допомогою зміни величини його чутливих характеристик. Розсіяне пошкодження матеріалу під час експлуатації, зокрема втомне, може бути описане через зміну модуля пружності першого роду. Так, авторами було запропоновано ввести параметр пошкодження як відношення модулів пружності при розвантаженні до їх початкового значення [5–7].

Важливою характеристикою матеріалу є модуль пружності аустеніту. Під дією циклічного навантаження початковий модуль пружності збільшується внаслідок збільшення поряд із аустенітом об'єму стабілізованого мартенситу. Композитний матеріал, який складається із аустеніту і стабілізованого мартенситу характеризується так званім ефективним модулем пружності, значення якого буде знаходитися в межах між модулем пружності аустеніту і модулем пружності мартенситу $E_A < E_{ef} < E_M$. Вплив циклічного навантаження та амплітуди деформації на модуль пружності аустеніту зазначається в працях [8], [9], [10]. Зокрема, при збільшенні максимальних дотичних напружень при повністю реверсному крученні порожнинного валу з NiTi сплаву з 50.8 at% Ni, модуль пружності аустеніту, за сумірних значень кількості циклів навантаження зменшується [8]. Подібну закономірність впливу розмаху напруження ($\Delta\sigma = 257, 315, 405$ і 450 МПа) за однобісного розтягу на січний модуль пружності E_A отримано для нітинолу композиції 55,88% Ni при температурі випробувань 22°C ($A_f = 21,4^\circ\text{C}$) [10]. Варіація механічних властивостей, зокрема і модуля пружності аустеніту нітинолу, визначених на різних зразках пояснюється відмінностями текстури, температури трансформації, і виділеннями (преципітатом), що може бути результатом незначних змін у хімічному складі і / чи технології термообробки [11]. Важливим з точки зору побудови і обґрунтування критеріїв втомного руйнування сплавів з пам'яттю форми є виявлення взаємозв'язку між функціональними властивостями сплаву при циклічному навантаженні, зокрема із залишковою деформацією. Зазначається [12], що залишкова деформація псевдопружного сплаву з пам'яттю форми складається із пластичної деформації (~79%), яка має дислокаційну природу і реверсивну деформацію (~21%), пов'язану із залишковим мартенситом.

Метою даної роботи є дослідити вплив асиметрії циклу навантаження на модуль пружності аустеніту псевдопружного NiTi сплаву з пам'яттю форми і його взаємозв'язок із залишковою деформацією.

Методика експериментального дослідження і матеріал

Вплив асиметрії циклу навантаження на втомну довговічність Ni_{55,8}Ti_{44,2} сплаву досліджували на циліндричних зразки, вирізані зі стрижня діаметром 8 мм. Циліндричні зразки діаметром 4 мм і довжиною робочої ділянки 12.5 мм випробовували за однобісного циклічного навантаження при температурі 0°C і коефіцієнті асиметрії циклу навантаження $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0$ і $R = 0,5$ на сервогідравлічній випробувальній машині СТМ-100 [13] з автоматизованою системою управління та збору даних (тут σ_{\min} і σ_{\max} – мінімальні та максимальні напруження). Форма циклу синусоїдальна, частота навантаження – 0,5 Гц.

Досліджували вплив максимального напруження і асиметрії циклу навантаження на модуль пружності аустеніту псевдопружного Ni_{55,8}Ti_{44,2} сплаву з пам'яттю форми при температурах 0°C , яка перевищувала температуру завершення аустенітного перетворення ($A_f = -38,7^\circ\text{C}$).

Характеристики механічних властивостей сплаву при 0°C : напруження початку аустенітно-мартенситного перетворення $\sigma_s^{AM} = 447$ МПа, межа міцності $\sigma_{UTS} = 869$ МПа [13, 14].

Результати та їх обговорення

На рис. 2 надано залежність залишкової (а) та оборотної деформації (б) NiTi сплаву від кількості циклів навантаження. Зі збільшенням кількості циклів навантаження залишкова деформація зростає. Збільшення початкового розмаху напружень від 509 МПа до 605 МПа збільшує залишкову деформацію. Проте подальше збільшення початкового розмаху напружень до 748 МПа зменшує залишкову деформацію за однакової кількості циклів навантаження. Вказана інверсія із загального закону обумовлена тим, що при $\Delta\sigma_1 = 748$ МПа в першому циклі, максимальна деформація дорівнює 8,7%, що перевищує максимальне значення деформації, при якій все ще проявляється ефект надпружності. Зі збільшенням коефіцієнта асиметрії циклу R від 0 до 0,5 залишкова деформація значно збільшується в першому та наступних циклах навіть за менших значень розмаху напружень.

Зі збільшенням розмаху напружень від 509 МПа до 748 МПа оборотна деформація у першому циклі зростає з 3,7% до 7,7%. Оборотна деформація значно менша при $R = 0,5$ (часткове розвантаження), ніж при випробуваннях з повним розвантаженням ($R = 0$), хоча ця різниця зменшується зі збільшенням кількості циклів навантаження. Слід зазначити, що різниця між оборотною деформацією за різних значень розмаху напружень також зменшується зі збільшенням кількості циклів навантаження.

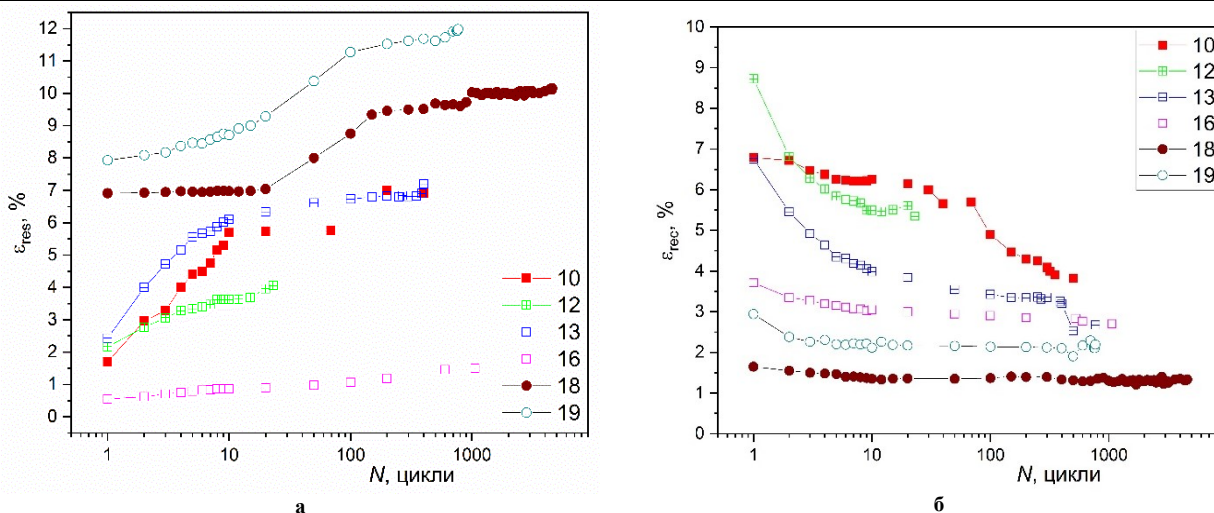


Рис. 2. Залежності залишкової деформації – а та оборотної деформації – б від кількості циклів до руйнування NiTi сплаву $\Delta\sigma_1 = 509$ МПа (16), 530 МПа (13), 605 МПа (10), 748 МПа (12) при $R = 0$, $\Delta\sigma = 243$ МПа (18), 305 МПа (19) при $R = 0,5$

На рис. 3 подано залежність поточного ефективного модуля пружності нітинолу при 0°C від залишкової деформації для різних значень розмаху напружень при коефіцієнті асиметрії $R_\sigma = 0$ і $0,5$. Загалом спостерігається тенденція до зменшення ефективного модуля пружності псевдопружного NiTi сплаву зі збільшенням залишкової деформації.

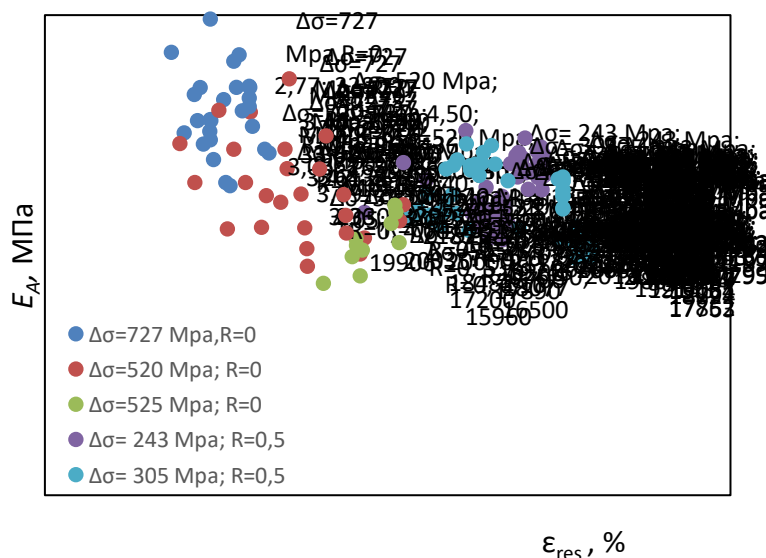


Рис. 3. Залежність ефективного модуля пружності псевдопружного нітинолу при температурі 0°C від залишкової деформації при $R_\sigma = 0$ і $0,5$ та різних значення розмаху напруження

Вище вказані дані (рис. 3) згруповані на рис. 4 окремо для кожної асиметрії циклу навантаження. Незалежно від розмаху напруження, з урахуванням певного розкиду, для кожної асиметрії циклу ($R_\sigma = 0$ і $0,5$) існують окремі залежності ефективного модуля пружності від залишкової деформації (рис. 4). За обох асиметрій циклу навантаження із збільшенням залишкової деформації ефективний модуль Юнга NiTi сплаву зменшується. Збільшення коефіцієнту асиметрії циклу навантаження від 0 до 0,5 призводить до значного зміщення вправо кривої $E_A - lg \epsilon_{res}$. Зокрема, за однакового ефективного модуля пружності NiTi сплаву залишкова деформація при $R_\sigma = 0,5$ приблизно удвічі перевищує значення ϵ_{res} при віднульовому циклі навантаження.

На основі аналізу табличних даних, отриманих в роботі [4] побудовані графічні залежності ефективного модуля пружності псевдопружного NiTi сплаву з пам'яттю форми (50,8% Ni – 49,2% Ti) від залишкової деформації (рис. 5) і від оборотної деформації (рис. 6). На ділянці стабілізації при випробуванні в умовах контрольованої максимальної деформації, зі збільшенням залишкової деформації, ефективний модуль пружності, зменшується (рис. 5). Подібна закономірність зміни ефективного модуля пружності зазначеного NiTi сплаву на ділянці стабілізації спостерігається також при збільшенні оборотної деформації (рис. 6).

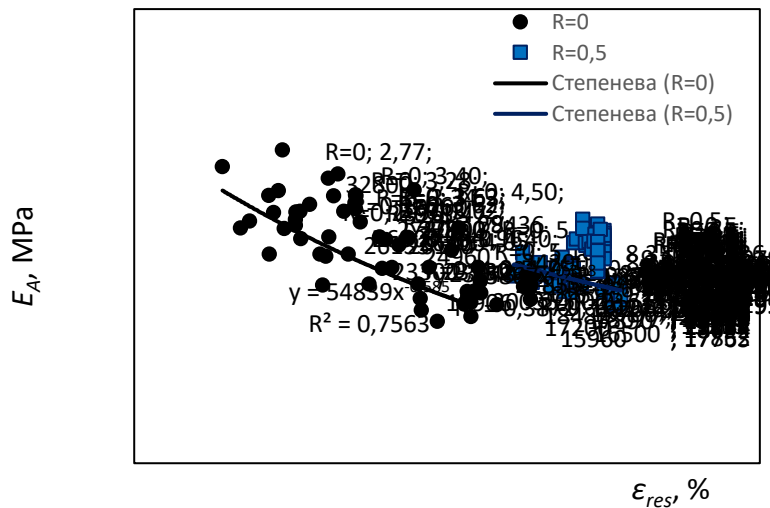


Рис. 4. Залежність модуля пружності аустеніту псевдопружного нітінолу при температурі 0°C від залишкової деформації при $R_{\sigma} = 0$ і 0,5. Експеримент і апроксимація

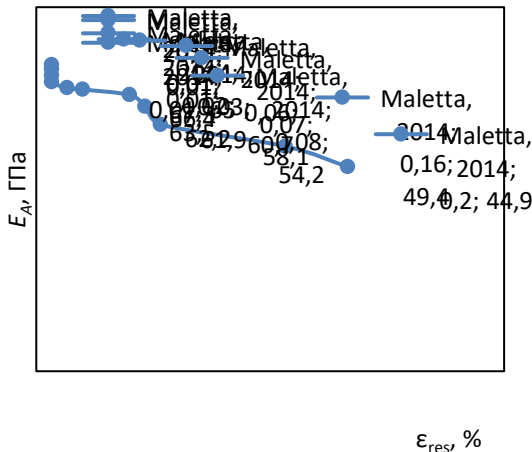


Рис. 5. Залежність ефективного модуля пружності аустеніту від залишкової деформації. За даними [4]

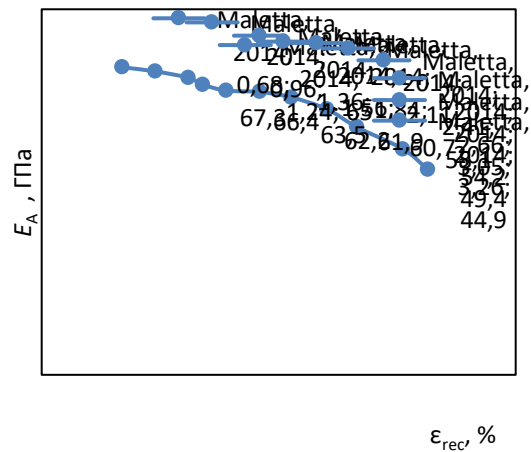


Рис. 6. Залежність ефективного модуля пружності аустеніту від оборотної деформації. За даними [4]

Відомі критерії втомного руйнування основані на питома енергія пружної деформації, яка визначається за формулою

$$W_e = \frac{\sigma_{max}^2}{2E_A}$$

Правомірність застосування вищезазначеного критерію дискутується в роботах [11]. Протиріччя виникає з огляду на те, що за однакового значення максимального напруження σ_{max} та різної асиметрії циклу навантаження розрахункові значення питомої енергії пружної деформації псевдопружного сплаву будуть співпадати, хоча втомна довговічність буде значно відрізнятися. Залежності ефективного модуля пружності від залишкової деформації при різній асиметрії циклу навантаження (рис. 3) пояснює вказане протиріччя. Втомне пошкодження, оцінюване через параметр питомої енергії пружної деформації, з урахуванням впливу асиметрії циклу навантаження на ефективний модуль пружності буде відрізнятися за різних значень R .

Висновки

1. Виявлено основні закономірності впливу амплітуди і асиметрії циклу навантаження на ефективний модуль Юнга псевдопружного NiTi сплаву з пам'яттю форми та його взаємозв'язок з іншими функціональними властивостями.
2. Незалежно від розмаху напруження, для кожної асиметрії циклу навантаження ($R_{\sigma} = 0$ і 0,5) існують окремі залежності ефективного модуля Юнга NiTi сплаву від залишкової деформації. При обох коефіцієнтах асиметрії циклу спостерігається зменшення поточного ефективного модуля пружності зі збільшенням залишкової деформації.
3. Збільшення коефіцієнту асиметрії циклу навантаження від 0 до 0,5 призводить до значного зміщення вправо кривої $E_A - lg \epsilon_{res}$. Зокрема, за однакового ефективного модуля пружності NiTi сплаву залишкова деформація при $R_{\sigma} = 0,5$ приблизно удвічі перевищує значення ϵ_{res} при віднульовому циклі навантаження.

Література

1. Yasniy P. et al. Calculation of constructive parameters of SMA damper. *Sci. J. TNTU*. 2017. Vol. 88, № 4. P. 7–15.
2. Nematollahi M. et al. Application of NiTi in Assistive and Rehabilitation Devices: A Review. *Bioengineering. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2019. Vol. 6, № 2. P. 37.
3. Mohd Jani J. et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Mater. Des. Elsevier Ltd*, 2014. Vol. 56. P. 1078–1113.
4. Maletta C. et al. Fatigue properties of a pseudoelastic NiTi alloy: Strain ratcheting and hysteresis under cyclic tensile loading. *Int. J. Fatigue. Elsevier*, 2014. Vol. 66. P. 78–85.
5. Kachanov L.M. *Introduction to Continuum Damage Mechanics*. Bruukline USA.: Kluwer academic publishers. Printed in the Netherlands, 1986. 135 p.
6. Pironi A., Bonora N. Modeling ductile damage under fully reversed cycling. *Comput. Mater. Sci. Elsevier*, 2003. Vol. 26, № January. P. 129–141.
7. Khan S. et al. Low cycle fatigue damage mechanism of the lightweight alloy Al2024. *Int. J. Fatigue. Elsevier*, 2012. Vol. 38. P. 92–99.
8. Predki W., Klönne M., Knopik A. Cyclic torsional loading of pseudoelastic NiTi shape memory alloys: Damping and fatigue failure. *Mater. Sci. Eng. A*. 2006. Vol. 417, № 1–2. P. 182–189.
9. Phillips F., Wheeler R.W., Lagoudas D.C. Damage evolution during actuation fatigue in shape memory alloys. *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites XII*; ed. Naguib H.E. SPIE, 2018. Vol. 10596. P. 5.
10. Nayan N. et al. Unnotched fatigue behavior of an austenitic Ni-Ti shape memory alloy. *Mater. Sci. Eng. A*. 2008. Vol. A 497. P. 333–340.
11. Mahtabi M.J., Stone T.W., Shamsaei N. Load sequence effects and variable amplitude fatigue of superelastic NiTi. *Int. J. Mech. Sci.* 2018. Vol. 148. P. 307–315.
12. Hua P. et al. Cyclic phase transformation behavior of nanocrystalline NiTi at microscale. *Acta Mater.* 2020. Vol. 185. P. 507–517.
13. Iasnii V. et al. Experimental study of pseudoelastic NiTi alloy under cyclic loading. *Sci. J. TNTU*. 2018. Vol. 92, № 4. P. 7–12.
14. Ясній В., Юнга Р. Фазові перетворення та механічні властивості сплаву нітинол з пам'яттю форми / В. Ясній, Р. Юнга // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2018. – Vol. 54, № 3. – P. 107–111.

References

1. Yasniy P. et al. Calculation of constructive parameters of SMA damper. *Sci. J. TNTU*. 2017. Vol. 88, № 4. P. 7–15.
2. Nematollahi M. et al. Application of NiTi in Assistive and Rehabilitation Devices: A Review. *Bioengineering. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2019. Vol. 6, № 2. P. 37.
3. Mohd Jani J. et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Mater. Des. Elsevier Ltd*, 2014. Vol. 56. P. 1078–1113.
4. Maletta C. et al. Fatigue properties of a pseudoelastic NiTi alloy: Strain ratcheting and hysteresis under cyclic tensile loading. *Int. J. Fatigue. Elsevier*, 2014. Vol. 66. P. 78–85.
5. Kachanov L.M. *Introduction to Continuum Damage Mechanics*. Bruukline USA.: Kluwer academic publishers. Printed in the Netherlands, 1986. 135 p.
6. Pironi A., Bonora N. Modeling ductile damage under fully reversed cycling. *Comput. Mater. Sci. Elsevier*, 2003. Vol. 26, № January. P. 129–141.
7. Khan S. et al. Low cycle fatigue damage mechanism of the lightweight alloy Al2024. *Int. J. Fatigue. Elsevier*, 2012. Vol. 38. P. 92–99.
8. Predki W., Klönne M., Knopik A. Cyclic torsional loading of pseudoelastic NiTi shape memory alloys: Damping and fatigue failure. *Mater. Sci. Eng. A*. 2006. Vol. 417, № 1–2. P. 182–189.
9. Phillips F., Wheeler R.W., Lagoudas D.C. Damage evolution during actuation fatigue in shape memory alloys. *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites XII*; ed. Naguib H.E. SPIE, 2018. Vol. 10596. P. 5.
10. Nayan N. et al. Unnotched fatigue behavior of an austenitic Ni-Ti shape memory alloy. *Mater. Sci. Eng. A*. 2008. Vol. A 497. P. 333–340.
11. Mahtabi M.J., Stone T.W., Shamsaei N. Load sequence effects and variable amplitude fatigue of superelastic NiTi. *Int. J. Mech. Sci.* 2018. Vol. 148. P. 307–315.
12. Hua P. et al. Cyclic phase transformation behavior of nanocrystalline NiTi at microscale. *Acta Mater.* 2020. Vol. 185. P. 507–517.
13. Iasnii V. et al. Experimental study of pseudoelastic NiTi alloy under cyclic loading. *Sci. J. TNTU*. 2018. Vol. 92, № 4. P. 7–12.
14. Yasniy V., Yunha R. Fazovi peretvorennia ta mekhanichni vlastyosti splavu nitynol z pamiattiu formy / V. Yasniy, R. Yuhna // *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*. – 2018. – Vol. 54, № 3. – P. 107–111.

Надійшла / Paper received : 09.11.2020

Надрукована/Printed :27.11.2020