

УДК 621.3

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.1\(494\).9](https://doi.org/10.15589/znp2024.1(494).9)

RESEARCH OF ELEMENTS WITH SHAPE MEMORY EFFECT AND DETERMINATION OF THEIR THERMO-MECHANICAL CHARACTERISTICS AT DIFFERENT HARDENING TEMPERATURES

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ З ЕФЕКТОМ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ РІЗНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ЗАГАРТУВАННЯ

Vasyl Ya. Bunko¹

VBunko@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9403-8135

Volodymyr V. Kozyrskyi²

kozyrskyiv@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6780-9750

В. Я. Бунько¹,

канд. техн. наук, доцент

В. В. Козирський²,

докт. техн. наук, професор

¹*Separated subdivision of the National University of Bioresources and Natural Use of Ukraine
“Berezhanskyi Agrotechnical Institute”, Berezhany*

²*ALOTEK technology company, Poland*

¹*Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України
«Бережанський агротехнічний інститут», м. Бережани*

²*Компанія «ALOTEK technology», Польща*

Abstract. The creation of the latest materials with predetermined properties is an important task, without which the development of the modern economy is impossible. An important issue today is the creation of so-called smart materials (or smart, intelligent materials), which have one or more functional physical and mechanical characteristics that can change significantly under the influence of external factors, for example, such as pressure, temperature, electrical or magnetic field, etc. The class of such materials includes shape memory alloys (SMAs), which have already found wide industrial application. One of the most important industries where shape memory alloys are widely used are aviation and space engineering, medicine and power engineering.

The paper presents the results of experimental studies of the thermomechanical characteristics of springs made of an alloy with shape memory – titanium nickelide. The obtained characteristics provide an understanding of the relationship between the geometric parameters of the springs, the mass and the properties of the alloy for the further development of electrical equipment.

Purpose. The purpose of this work is to study the thermomechanical characteristics of shape memory elements made of Ni-Ti alloy (nickel-titanium or nitinol), which can potentially be used in electric power generation systems.

Method. The research uses general methods of theoretical analysis based on the regularities of the influence of physical (electrothermal, thermomechanical) properties of functional alloys based on nitinol (Ni-Ti), obtained in the process of experimental research on specialized stands.

Results. As a result of experimental studies, the main analysis factor is:

- dependence of the force generating a thermosensitive element made of nitinol on its heating temperature;
- the dependence of the mechanical characteristics of thermosensitive elements based on nitinol (springs made of a wire with a diameter of 0,6 mm) on the heat hardening temperature.

Scientific novelty. The scientific novelty of the conducted research consists in establishing the relationships and regularities of the generation of a certain amount of force by a thermosensitive element made of a shape memory alloy (nitinol) with the subsequent establishment of the possibility of using the phenomenon of «shape memory in alloys» in power generation systems based on low-temperature sources thermal energy.

Practical importance. The creation of means that use low-temperature (secondary) sources of thermal energy for the generation of electricity is an urgent problem that deserves attention and development. Thermosensitive alloys with shape memory open up the possibility of creating heat engines and, accordingly, technical systems for power generation.

Key words: nitinol; shape memory alloy elements; electric energy generation; thermomechanical characteristics; source of low-temperature thermal energy (secondary heat).

Анотація. Створення новітніх матеріалів з наперед заданими властивостями є важливою задачею, без якої неможливий розвиток сучасної економіки. Важливим питанням на сьогоднішній день є створення так званих smart-матеріалів (або розумних, інтелектуальних матеріалів), які володіють однією або декількома функціональними фізико-механічними характеристиками, що можуть суттєво змінюватися під впливом зовнішніх факторів, наприклад, таких як тиск, температура, електричне або магнітне поля, тощо. До класу таких матеріалів відносяться сплави з пам'яттю форми (СПФ, або SMA), які вже знайшли широке промислове застосування. Одними з найбільш важливих галузей, де сплави з пам'яттю форми широко використовують є авіаційна та космічна техніка, медицина та електроенергетика.

У роботі представлено результати експериментальних досліджень термомеханічних характеристик пружин із сплаву з пам'яттю форми – нікеліду титану. Отримані характеристики дають розуміння зв'язків геометричних параметрів пружин, маси і властивостей сплаву для подальшої розробки електротехнічних засобів.

Мета. Метою даної роботи являється дослідження термомеханічних характеристик елементів з пам'яттю форми із сплаву Ni-Ti (нікель-титан або нітінол), які потенційно можуть бути використані в системах генерації електричної енергії.

Методика. При дослідженнях використовуються загальні методи теоретичного аналізу на основі закономірностей впливу фізичних (електротеплових, термомеханічних) властивостей функціональних сплавів на основі нітінолу (Ni-Ti), отриманих у процесі експериментальних досліджень на спеціалізованих стендах.

Результати. У результаті проведених експериментальних досліджень основним фактором аналізу є:

- залежність сили, що генерує термочутливий елемент із нітінолу від температури його нагрівання;
- залежність механічних характеристик термочутливих елементів на основі нітінолу (пружини із проводу діаметром 0,6 мм) від температури термозагартування.

Наукова новизна. Наукова новизна проведених досліджень полягає у встановленні взаємозв'язків та закономірностей генерування певної величини зусилля термочутливим елементом із сплаву з пам'яттю форми (нітінол) з подальшим встановленням можливості використання явища «пам'яті форми у сплавах» у системах генерації електроенергії на базі низькотемпературних джерел теплової енергії.

Практична значимість. Створення засобів, що використовують низькотемпературні (вторинні) джерела теплової енергії для генерації електроенергії є актуальною проблемою, що заслуговує уваги і розвитку. Термочутливі сплави з пам'яттю форми відкривають можливість створення теплових двигунів і, відповідно, технічних систем генерації електроенергії.

Ключові слова: нітінолу; елементи із сплаву з пам'яттю форми; генерація електричної енергії; термомеханічна характеристика; джерело низькотемпературної теплової енергії (вторинне тепло).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Найбільш поширений матеріал з пам'яттю форми являється нітінол, який характеризується пластичністю, міцністю, корозійною стійкістю та біосумісністю. Завданням даного дослідження являється дослідження сплаву нітінол (Ni-Ti) в температурному середовищі для визначення та побудови термомеханічних характеристик.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Дослідженнями елементів з пам'яттю форми займалися науковці Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України [2, с.82], а також вчені С.П.Беляєв, С.В.Добаткін, В.Г.Курдюмов, В.А.Ліхачев, Ю.М. Коваль, Л.Ф. Головкин, О.В. Бродовий, С.Г. Бунчук, С.М. Вейман, Я. Ван-Хумбек, Д.І. Лі, С. Міязакі, К. Ооцука, Ларін В.К. та інші [7, с. 3].

У 60-х роках ХХ століття в практичних розробках матеріалознавців і конструкторів почали використовуватися нові функціональні матеріали з незвичайними фізико-механічними властивостями (пам'яттю форми, надпружністю, високою демпфуючою здатністю та ін.) [2, с. 82].

Фізична основа прояву матеріалами таких властивостей пов'язана з відкриттям видатними

українськими вченими в 50-х роках минулого століття (академіком Г. В. Курдюмовим і професором Л. Г. Хандросом) нового ефекту – ефекту Курдюмова, зв'язаного з явищем термopужної рівноваги фаз при перетвореннях мартенситного типу [2, с. 82].

У 1962 р. ефект пам'яті форми було виявлено у сплаві Ni-Ti, який отримав назву Nitinol. Найбільш інтенсивний розвиток таких сплавів, вивчення їх властивостей, розробок технічних пристроїв для авіаційної та космічної техніки, електроенергетики, побутової та комп'ютерної техніки, медицини спостерігається починаючи з 1988 року [2, с. 82].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Постановка даної проблематики полягає у дослідженні елементів з ефектом пам'яті форми на основі нітінолу при використанні проводу діаметром 0,6 мм та визначенні їх термомеханічних характеристик під дією низькотемпературного середовища. Такі елементи можуть бути використані для системи генерації електричної енергії за прикладом теплового двигуна Гінеля [1, с. 2–4; 3, с. 40–41; 4, с. 234–235].

Мета дослідження. Метою даної роботи являється дослідження термомеханічних характеристик

елементів з ефектом пам'яті форми на основі сплаву Ni-Ti (нікель-титан або нітінол) діаметром 0,6 мм, які потенційно можуть бути використані для систем генерації електричної енергії при застосуванні низькотемпературного вторинного тепла.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методами дослідження являється визначення закономірностей впливу фізичних (електротеплових, термомеханічних) властивостей функціональних сплавів на основі нітінолу (Ni-Ti) з явищем пам'яті форми для системи генерації електричної енергії при використанні низькотемпературного вторинного джерела тепла. Об'єкт дослідження – елемент на основі Ni-Ti з ефектом пам'яті форми, виготовлений у вигляді пружини із проводу діаметром 0,6 мм. Предмет дослідження – побудова термомеханічних характеристик елементів на основі Ni-Ti та визначення зусилля даних елементів, які виникають при впливі температурного середовища.

Основний матеріал. Сплави з ефектом пам'яті форми (СПФ) відносяться до тієї групи металічних матеріалів, які мають властивість спонтанно відновлювати при нагріванні початкову форму, яку вони мали до примусової деформації. Здійснюється цей процес за рахунок явища прямого перетворення теплової енергії у механічну роботу [4, с. 234–235].

До сьогодення для ефекти пам'яті форми та надпружності виявлено у широкому загалі подвійних та потрійних сплавів, наприклад: Ti-Ni, Fe-Ni, Au-Cd, Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, Cu-Al-Mn та ін. [3, с. 40–41; 5, с. 126–127]. Однак використання знаходять тільки ті сплави, які можуть генерувати при нагріванні суттєві механічні напруги – це сплави Ti-Ni та мідної основи Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni та Cu-Al-Mn [3, с. 40–41].

Унікальні властивості даних сплавів – активуватись при змінах температури нагрівання у межах від -150 до $+200^{\circ}\text{C}$, одночасно виконувати функції датчика температури і виконавчого механізму, який здатен здійснювати корисну роботу, створює позитивні умови для розробки різноманітних електротехнічних засобів. Такими засобами можуть бути, автоматичні вимикачі з універсальним розчіплювачем, запобіжники з підсиленням струмообмежуючим ефектом, стабілізатори контактного тиску у розбірних електричних контактах, термоіндикатори перегрівання окремих елементів в електроустановках та ін. [6, с. 45–46]. Одним із перспективних напрямів використання властивостей СПФ являється створення систем генерації електричної енергії, які використовують низькотемпературні джерела теплової енергії (джерела вторинного тепла – водойми охолодження води на теплових і атомних електростанціях, викиди теплового повітря і газу на виробництвах та ін.).

Важливим етапом для інсталяції нормованих характеристик пам'яті форми у виробках із сплавів

з пам'яттю форми, наприклад нікеліду титану, є дотримання умов термозагартування – температура $+450^{\circ}\text{C}$ і час витримки виробу 4...5 годин. У дослідженнях був використаний виріб – пружина із проводу нікеліду титану діаметром 0,6 мм (рис. 1 та 2).

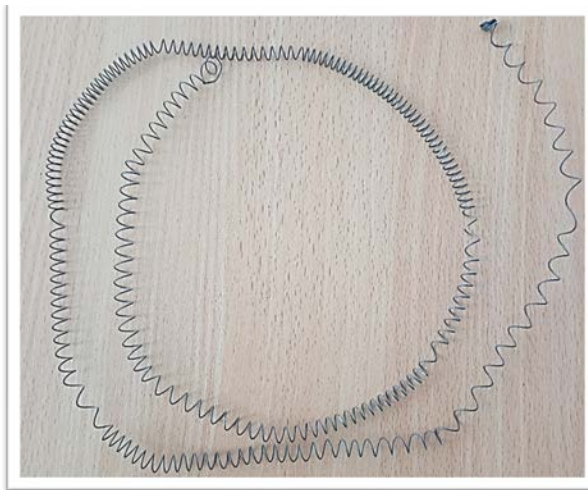


Рис. 1. Вигляд пружини після термообробки і примусової деформації в охолодженому стані ($+25^{\circ}\text{C}$)



Рис. 2. Загальний вигляд пружини після занурення в теплу воду ($+60^{\circ}\text{C}$)

Дослідження термомеханічних характеристик термозагартованих пружин проводились на випробувальному стенді рис. 3 і 4.

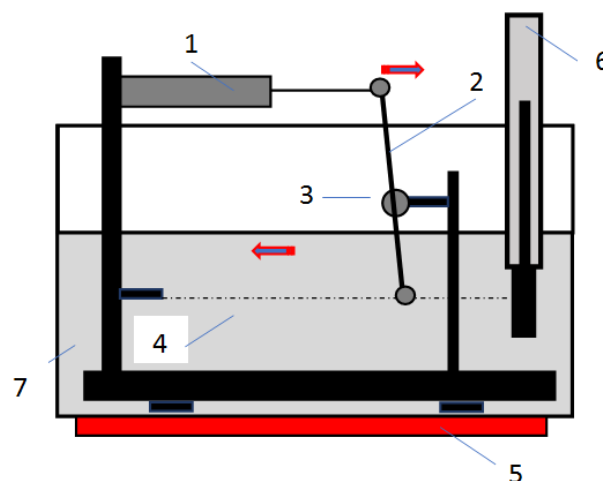


Рис. 3. Модель дослідної установки для зняття термомеханічних характеристик термочутливих елементів: 1 – динамометр; 2 – важіль; 3 – шарнір; 4 – термочутливий елемент; 5 – нагрівач; 6 – термометр; 7 – ванна з водою

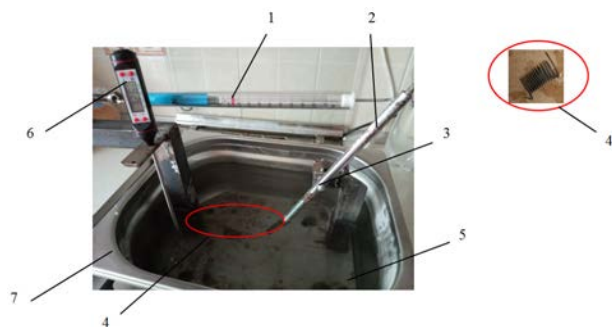


Рис. 4. Дослідна установка для зняття термомеханічних характеристик термочутливих елементів із сплавів з пам'яттю форми: 1 – динамометр; 2 – важіль; 3 – шарнір; 4 – термочутливий елемент; 5 – нагрівач; 6 – термометр; 7 – ванна з водою

У таблиці 1 представлені результати експериментальних досліджень термомеханічних характеристик термочутливих елементів (пружин) на основі нітінолу (Ni-Ti) із проводу діаметром 0,6 мм при різних температурах термозагартування (час витримки 5 годин).

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дослідження показали, що при різних температурах термозагартування нітінолу, термочутливий елемент із одного і того ж відрізка проводу має різні термомеханічні характеристики – дещо різна температура початку відновлення форми пружин при нагріванні (1–30°C, 2 і 3–35°C) і різне максимальне зусилля, що генерується термочутливим елементом при одній і тій же температурі нагрівання (при 100°C, 1–1,73 Н, 2–1,45 Н і 3–0,8 Н).

Необхідно, також, відмітити, що зусилля, що генерує термочутливий елемент при нагрівання залежить від форми виробу, маси сплаву у виробі (у даному випадку досліджень – від діаметру проводу пружини). Параметри зусилля, що отримані у процесі досліджень термомеханічних характеристик пружин із проводу діаметром 0,6 мм – 80...173 грам вказують на можливість створення обертового руху для приводу генератора електричної енергії. При відповідних геометричних параметрах термочутливих елементів і їх характеристик можливим стає створення

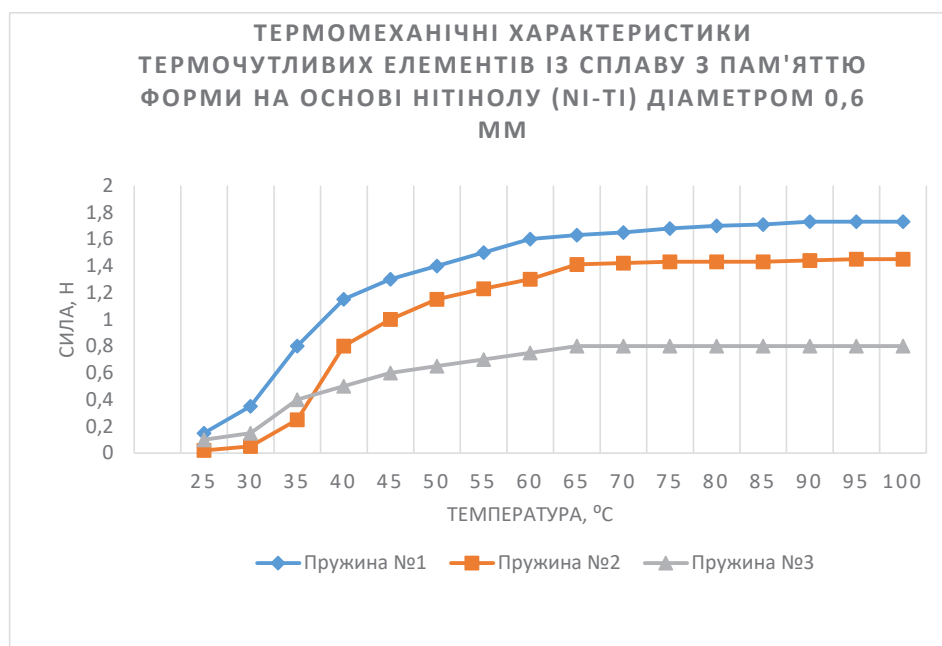


Рис. 5. Термомеханічні характеристики термочутливих елементів (пружин) із проводу діаметром 0,6 мм на основі нітінолу при різних температурах термозагартування (1 – 300°C, 2 – 350°C, 3 – 450°C)

Таблиця 1. Результати дослідження термомеханічних характеристик пружин із сплаву нітінолу (провід діаметром 0,6 мм)

Температура, °C	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Зусилля, пружина № 1, Н	0,15	0,35	0,8	1,15	1,3	1,4	1,5	1,6	1,63	1,65	1,68	1,7	1,71	1,73	1,73	1,73
Зусилля, пружина № 2, Н	0,02	0,05	0,25	0,8	1,0	1,15	1,23	1,3	1,41	1,42	1,43	1,43	1,43	1,44	1,45	1,45
Зусилля, пружина № 3, Н	0,1	0,15	0,4	0,5	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

установок для генерації електроенергії з використанням джерел низькотемпературної теплової енергії (наприклад, водойм атомних і теплових електростанцій з температурою води +35°C).

ВИСНОВКИ

1. Дослідження термочутливих елементів з пам'яттю форми на основі нітінолу (Ni-Ti) підтвердили залежність параметрів термомеханічних

характеристик від умов термозагартування (температури і часу витримки), що обумовлює необхідність враховувати цю залежність при розробці виконавчих механізмів із даного матеріалу.

2. Результати експериментальних досліджень вказують на необхідність дотримання температури і часу витримки при загартуванні виробів із сплаву з пам'яттю форми з метою отримання програмованих параметрів термомеханічних характеристик.

REFERENCES

- [1] Sposib heneruvannia i nakopychennia elektroenerhii z dyvhuonom Hinelia [The method of generation and storage of electricity with the Ginel engine]. Pat. na KM 135470 Ukraina : MPK F03G 4/02, F03G 7/06. № a 2017 07308; zaiavl. 11.07.2017; opubl. 10.07.2019. Biul. №13. [in Ukrainian].
- [2] Koval, Yu. M. (2005). Splavy z efektom pamiaty formy – potuzhnyi klas funktsionalnykh materialiv [Shape memory alloys are a powerful class of functional materials]. *Nauka ta innovatsii*. T.1, № 2. pp. 80-95. [in Ukrainian].
- [3] Kozyrskiy, V. V., Nikiforov, A. P., Petrenko, A. V., & Parubov, A. N. (2019). Nakopychuvach elektroenerhii na osnovi teplovykh protsesiv iz mozhlyvosti utylizatsii tepla [An electricity accumulator based on thermal processes with the possibility of heat utilization]. *Zbirnyk materialiv V Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii prysviachenoї pamiaty profesora Viktora Mykhailovycha Synkova «Problemy ta perspektivy rozvytku enerhetyky, elektrotekhnolohii ta avtomatyky v APK» PREAP-2019, 19 hrudnia 2019 roku*, NUBiP Ukrainy, m. Kyiv. pp. 40-41. [in Ukrainian].
- [4] Filiashkin, M. K. (2019). *Mikroelektromekhanichni systemy [Microelectromechanical systems]*. Kyiv: NAU. 276 p. [in Ukrainian].
- [5] Bunko, V. Ia., Kozyrskiy, V. V. (2023). Zastosuvannia «intelektualnykh» materialiv na osnovi pamiaty formy [Application of «intelligent» materials based on shape memory]. *Problemy suchasnoi enerhetyky i avtomatyky v systemi pryrodokorystuvannia (teoriia, praktyka, istoriia, osvita): Materialy nauk.-tehn. konf., m. Kyiv 19 zhovtnia 2023 roku*. pp. 126-127. [in Ukrainian].
- [6] Kozyrskiy, V. V., Kaplun, V. V., & Voloshyn S. M. (2021). *Funktsionalni intermetalidy v elektroenerhetychnykh ustanovkakh [Functional intermetallics in power plants]*. Kyiv: «Komprynt». 347 p. [in Ukrainian].
- [7] Balytska, N. O. (2022). Osoblyvosti tortsevoho frezeruvannia splaviv Ni-Ti z efektom pamiaty formy [Features of face milling of Ni-Ti alloys with shape memory effect]. *Tekhnichna inzheneriia*, (2(90), 3-12. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-3-12](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-3-12) [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Спосіб генерування і накопичення електроенергії з двигуном Гінеля : пат. на KM 135470 Україна : МПК F03G 4/02, F03G 7/06. № а 2017 07308 ; заявл. 11.07.2017 ; опубл. 10.07.2019. Бюл. №13. 4 с.
- [2] Коваль, Ю. М. (2005). Сплави з ефектом пам'яті форми – потужний клас функціональних матеріалів. *Наука та інновації*. Т.1, № 2. С. 80–95.
- [3] Козирський, В. В., Нікіфоров, А. П., Петренко, А. В., Парубов, А. Н. (2019). Накопичувач електроенергії на основі теплових процесів із можливістю утилізації тепла. *Збірник матеріалів V Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої пам'яті професора Віктора Михайловича Синькова «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» ПРЕАП-2019, 19 грудня 2019 року, НУБіП України, м. Київ*. С. 40–41.
- [4] Філяшкін, М. К. (2019). Мікроелектромеханічні системи: навч. посіб. Київ: НАУ. 276 с.
- [5] Бунько, В. Я., Козирський, В. В. (2023). Застосування «інтелектуальних» матеріалів на основі пам'яті форми. *Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): Матеріали наук.-техн. конф., м. Київ 19 жовтня 2023 року*. С. 126–127.
- [6] Козирський, В. В., Каплун, В. В., Волошин, С. М. (2021). Функціональні інтерметаліди в електроенергетичних установках. Київ: Компринт. 347 с.
- [7] Балицька, Н. О. (2022). Особливості торцевого фрезерування сплавів Ni-Ti з ефектом пам'яті форми. *Технічна інженерія*, (2(90), 3–12. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-3-12](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-3-12)

© Бунько В. Я., Козирський В. В.

Дата надходження статті до редакції: 07.02.2024

Дата затвердження статті до друку: 20.02.2024