

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРУЖИН ІЗ СПЛАВУ NITINOL

*В. В. Козирський, доктор технічних наук, професор,*

*«ALOTEK technology», Польща*

*E-mail: [kozyrskyivv@gmail.com](mailto:kozyrskyivv@gmail.com)*

*В. Я. Бунько, кандидат технічних наук, доцент*

*Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і  
природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»*

*E-mail: [VBunko@gmail.com](mailto:VBunko@gmail.com)*

**Анотація.** У статті розглядається питання щодо дослідження термочутливих елементів на основі матеріалу Nitinol - провід діаметром 1,0 мм, який у вигляді пружин потенційно може використовуватися з відповідними геометричними параметрами в конструкції теплового двигуна системи генерації електричної енергії.

Дослідження дозволяють визначити термомеханічні характеристики пружин із цього сплаву, а саме дослідження впливу величини попередньої деформації таких елементів на генероване зусилля.

Термозагартування проводу із нітінолу проводилося при температурі від 400 до 500 °С протягом 4,5 годин. Дослідження термомеханічних характеристик здійснювалося при нагріванні термочутливого елемента (пружини) у воді від температури 20 °С до 100 °С, вимірювання зусилля виконувались пружинним динамометром. Для досліджень у цій роботі обрано термочутливі елементи – дві пружини із сплаву Nitinol. У роботі зображено модель та загальний вигляд дослідної установки для знаття термомеханічних характеристик пружин.

Побудовано термомеханічні характеристики пружин при різній величині їх деформації. Наведено графіки, які показують, що функціональна залежність максимального генерованого зусилля від величини деформації пружини близька до лінійної. У роботі використаний метод інтерполяції, розраховані відповідні коефіцієнти та побудована функціональна залежність. Отримана залежність дозволяє збільшити межі визначення максимального генерованого зусилля від величини деформації пружини та буде необхідна при моделюванні характеристик теплового двигуна.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що суттєвий вплив на величину генерованого зусилля пружиною із сплаву Nitinol обумовлює величина деформації пружини. При деформації пружини 160 мм і температурі 100 °С генероване зусилля склало 4...4,05 Н, а при деформації 100 мм – 1,75...1,85 Н.

**Ключові слова:** термочутливий елемент, зусилля, генерація електричної енергії, нітінол, сплав з пам'яттю форми

**Актуальність.** Проблема підвищення ефективності енергетичного обладнання вимагає системного розв'язання комплексу актуальних теоретичних та практичних задач. Протягом останніх років сформований інноваційний науковий напрям в енергетиці, в основу якого покладені явища ефектів пам'яті форми і надпружності в функціональних сплавах (ФС). Останні здатні до термомеханічного перетворення, а вироби на їх основі можуть розвивати реактивні зусилля в сотні МПа і при цьому виконувати значні переміщення «вільної» його частини. ФС, перетворюючи три види енергії (електричну, теплову, механічну), виконують у певному діапазоні температур роль робочого тіла та органу одночасно і є найпростішими перетворювачами теплової енергії в механічну [1,8].

Наявність унікальних властивостей обумовлює належність ФС до смарт-матеріалів та високу актуальність їх вивчення і застосування у різних галузях. Оскільки у смарт-сплавах спостерігається об'єднання властивостей, які зазвичай притаманні декільком матеріалам чи пристроям, то першим застосуванням є заміна декількох елементів системи - одним із ФС. Іншими застосуваннями є розробка принципово нових технічних засобів та удосконалення існуючих. Оскільки ФС є провідниками електричного струму і прямими перетворювачами теплової енергії в механічну роботу, вони все більше знаходять застосування в електроенергетиці [1,8].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідженнями елементів з ефектом пам'яті форми займалися науковці Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України [3], а також вчені С.П. Беляєв, С.В. Добаткін, В.Г. Курдюмов, В.А. Ліхачев, Ю.М. Коваль, Л.Ф. Головка, О.В. Бродовий, С.Г. Бунчук, С.М. Вейман, Я. Ван-Хумбек, Д.І. Лі, С.Міязаки, К.Ооцука та інші [4].

Вперше зареєстрував спостереження ефекту пам'яті форми в 1932 р. А. Оландер. На основі металографічних спостережень та зміни електричного опору було відмічено псевдопружну поведінку сплаву Au-Cd. У 1938 р. Гринінжер і Мурадян спостерігали при нагріваннях і охолодженнях появу і зникнення стадії мартенситу при дослідженнях зігнутого бруска зі сплаву Cu-Zn [1].

Основне явище ефекту пам'яті – керованого термоеластичного поводження стадії мартенситу – було широко повідомлене десятиліттям пізніше В.М. Курдюмовим і Л.Г. Хандросом (1949, Київ, Інститут металофізики) та Чангом і Рідом (1951) [1,5].

Однак, використання сплавів з ефектом пам'яті форми в різних галузях діяльності людини відбувається незначними темпами. Як не дивно, але вже не нові ФС [2] (відкриті у 1932 р.) охопили лише незначну частку сфер їх можливого застосування, починаючи від побутових пристроїв і закінчуючи промисловими впровадженнями. Внаслідок цього виникають питання відносно того, чи є ФС насправді настільки функціональними та, з іншого боку, які дослідження необхідні для впровадження так званих функціональних властивостей [1].

У 1962 р. в американській військово-морській лабораторії артилерії ефект пам'яті форми виявлено у сплаві Ni-Ti [7]. Цей сплав було названо Nitinol.

Відкриття явища ефекту пам'яті форми у цьому сплаві обумовило поштовх дослідженням та застосуванням у різних галузях. Найбільш інтенсивний розвиток сплавів, вивчення їх властивостей, розробок технічних пристроїв для галузей електроенергетики, побутової техніки, медицини, комп'ютерної техніки спостерігається, починаючи з 1988 р. [1].

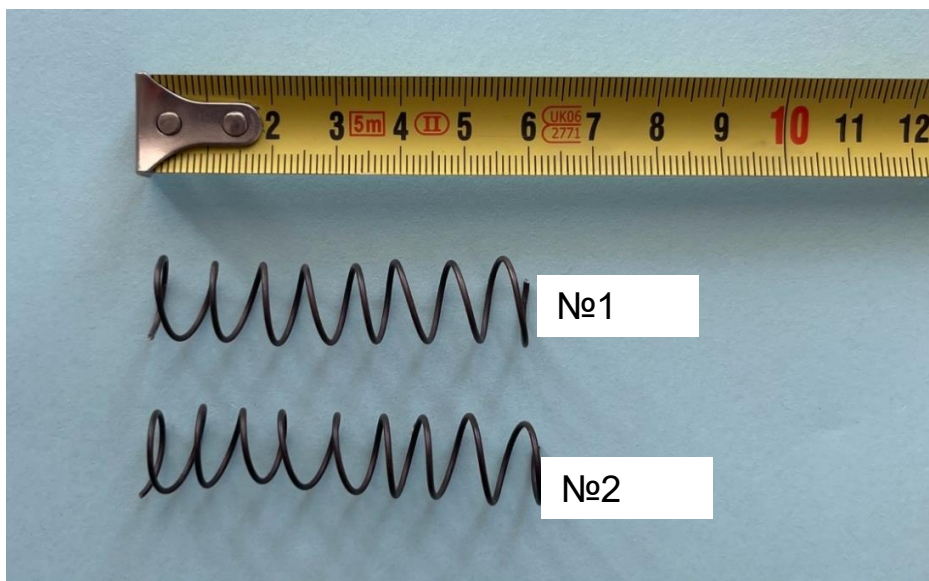
**Мета дослідження** – дослідження та аналіз термомеханічних характеристик термочутливих елементів – пружин із сплаву Nitinol та вплив величини попередньої деформації пружин на генероване зусилля для потенційного застосування в теплових двигунах систем генерації електричної енергії при використанні низькотемпературних вторинних джерел тепла [9].

**Матеріали і методи дослідження.** Розглянемо деякі із прикладів застосування сплавів з пам'яттю форми в електроенергетиці. У США, Японії, Франції і Бельгії розроблені теплові двигуни, які перетворюють низькотемпературну теплову енергію у механічну роботу [8]. Створено більше десяти варіантів виконання цього типу двигунів. Наприклад, фірма «Sharp.Corp.» розробила двигун з робочими петлями із проводу діаметром 0,75 мм [1]. При температурі гарячої води +30 °С, холодної +10 °С частота обертів складала 1000 <sup>1</sup>/хв, механічна потужність – 0,7 Вт, електрична –

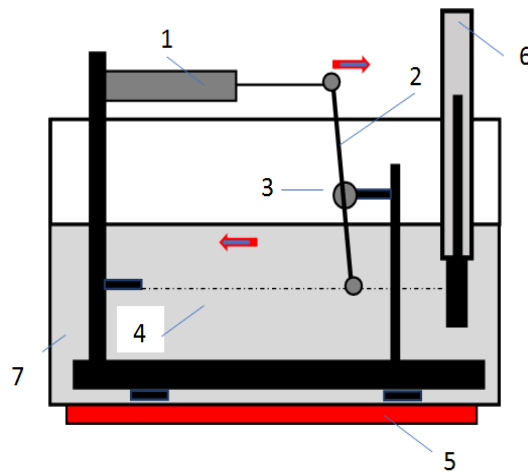
0,35 Вт на кожен грам сплаву Nitinol. У [1] зауважено, що немає принципових труднощів у реалізації двигуна з механічною потужністю 10 кВт та електричною 5 кВт. Такі циклічні теплові машини з робочим тілом зі сплаву з пам'яттю форми отримали назву «мартенситні двигуни» або «мартенситні перетворювачі енергії».

Таким чином, під дією тепла величина генерованої реактивної сили термочутливим елементом із сплаву Nitinol залежить від його маси, або ж об'єму, відповідно - геометричних розмірів. Попередніми дослідженнями [6] встановлено, що максимальне генероване реактивне зусилля також залежить від величини вільного ходу відновлення форми термочутливим елементом – величини примусової механічної деформації до нагрівання.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Відповідно до мети досліджень у цій роботі обрано термочутливі елементи – дві пружини із сплаву Nitinol. Пружини виготовлені із проводу довжиною 280 мм і діаметром 1 мм, діаметр пружин 10 мм, кількість витків – 9. За умовою досліджень обрана величина попередньої деформації (розтягування) пружин до 100, 120, 140 і 160 мм.



**Рис. 1. Взірці пружин із проводу сплаву Nitinol діаметром 1,0 мм**



**Рис. 2. Модель дослідної установки для зняття термомеханічних характеристик термочутливих елементів [10]:**

1 – динамометр; 2 – важіль; 3 – шарнір; 4 – термочутливий елемент; 5 – нагрівач; 6 – термометр; 7 – ванна з водою



**Рис. 3. Загальний вигляд дослідної установки для зняття термомеханічних характеристик пружин [10]**

### **Результати досліджень та їх обговорення.**

На рис. 4 і 5 представлені термомеханічні характеристики пружин 1 і 2 при різній величині їх деформації.

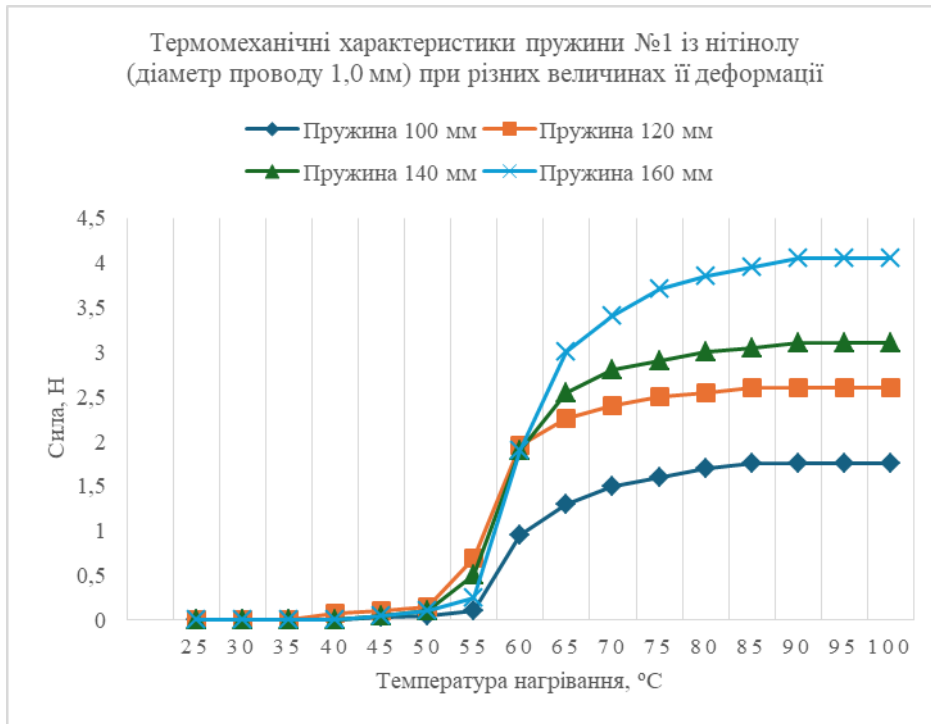


Рис. 4. Термомеханічні характеристики пружини №1 при різних величинах її деформації

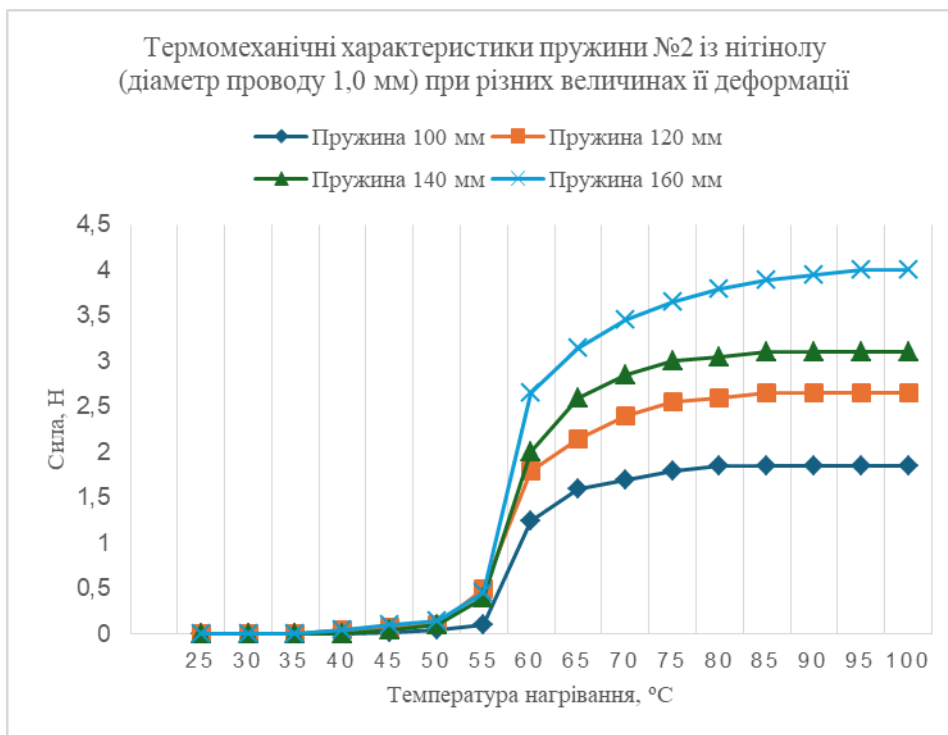
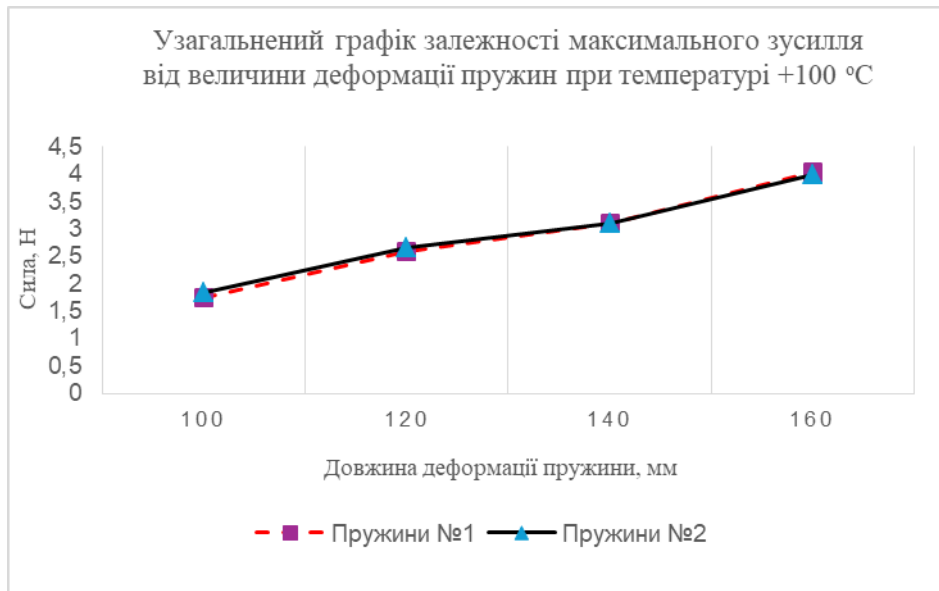


Рис. 5. Термомеханічні характеристики пружини №2 при різних величинах її деформації



**Рис. 6. Узагальнений графік залежності максимального генерованого зусилля від довжини деформації пружини**

Отримані результати проведених експериментальних досліджень дозволяють зробити висновки про закономірності генерації реактивного зусилля пружинами із сплаву Nitinol:

- оскільки пружини виготовлені із однієї партії проводу і термозагартування виконане в однаковому температурно-часовому режимі, отримані характеристики близькі за показниками (відхилення у межах похибки вимірювань  $\delta < 5\%$ );

- сплав Nitinol має температуру початку відновлення форми в інтервалі  $+50...+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура завершення відновлення форми залежить від деформації пружини і лежить в інтервалі від  $+85$  до  $+95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

- із графіків термомеханічних характеристик видно, що суттєвий вплив на генероване зусилля робить величина попередньої деформації пружини 100, 120, 140 і 160 мм. При деформації пружини 160 мм і температурі  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  зусилля складає  $4...4,05\text{ Н}$ , а при деформації 100 мм –  $1,75...1,85\text{ Н}$ , тобто відмінність складає 231%.

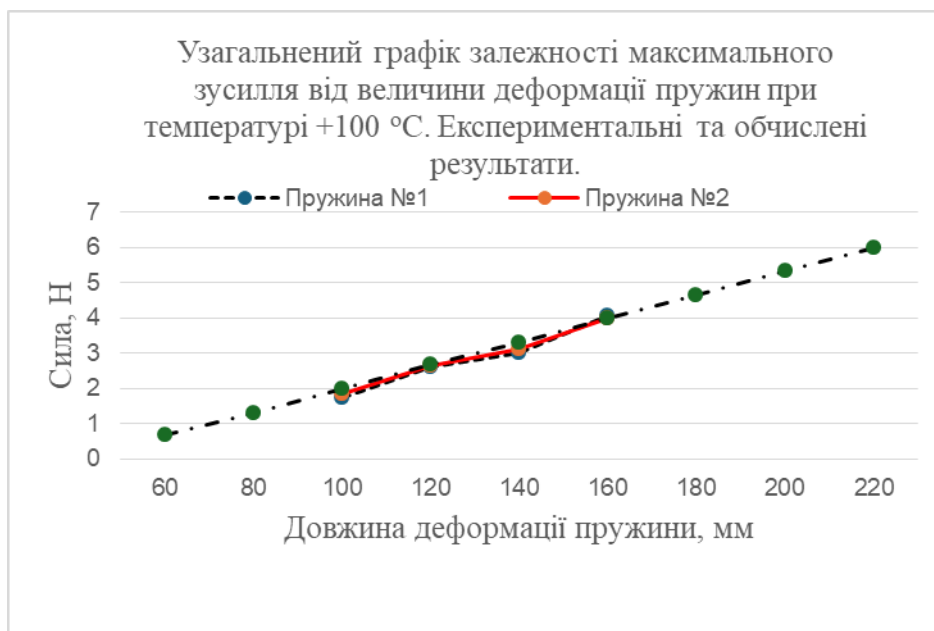
Із графіка (рис. 6) видно, що функціональна залежність максимального генерованого зусилля від величини деформації пружини близька до лінійної. Використовуючи метод інтерполяції, розраховані коефіцієнти і побудована функціональна залежність:

$$F(L) = a \cdot L - b, \quad (1)$$



де  $L$  – довжина деформації (розтягування) пружини, мм; коефіцієнти  $a=0,0332$  Н/мм;  $b=1,312$  Н.

Отримана залежність дозволяє збільшити межі визначення максимального генерованого зусилля від величини деформації пружини та буде необхідна при моделюванні характеристик теплового двигуна. При нагріванні пружина відновлює попередню стиснену форму і генерує зусилля, яке змінюється від  $F_1=5,99$  Н до  $F_2=0,68$  Н. При скороченні (переміщенні вільного кінця) пружина розвиває потужність, яку можна визначити так. Довжина скорочення (зворотної деформації) пружини при нагріванні складає 160 мм (від 220 мм до 60 мм, див. рис. 7). Вимірюваннями встановлено час скорочення пружини 0,2 с при температурі 100 °С. Швидкість скорочення пружини склала – 800 мм/с, або ж 0,8 м/с. Відповідно потужність для даних зразків пружин буде змінюватись при їх скороченні від  $P_1=F_1 \cdot v = 5,99 \cdot 0,8 = 4,79$  Вт до  $P_2=F_2 \cdot v = 0,68 \cdot 0,8 = 0,54$  Вт.



**Рис. 7. Узагальнений графік залежності максимального генерованого зусилля від довжини деформації пружини, експериментальні та розрахункові дані**

При нагріванні пружина відновлює попередню стиснену форму і генерує зусилля, яке змінюється від  $F_1=5,99$  Н до  $F_2=0,68$  Н. При скороченні (переміщенні вільного кінця) пружина розвиває потужність, яку можна визначити так. Довжина скорочення (зворотної деформації) пружини при нагріванні складає 160 мм (від 220 мм до 60 мм, див. рис. 7). Вимірюваннями встановлено час скорочення пружини



0,2 с при температурі 100 °С. Швидкість скорочення пружини складала – 800 мм/с, або ж 0,8 м/с. Відповідно потужність для цих зразків пружин буде змінюватись при їх скороченні від  $P_1 = F_1 \cdot v = 5,99 \cdot 0,8 = 4,79$  Вт до  $P_2 = F_2 \cdot v = 0,68 \cdot 0,8 = 0,54$  Вт.

Визначимо питому потужність, віднесену до 1 грама сплаву Nitinol. Питома маса сплаву складає 6,45 г/см<sup>3</sup>. Об'єм проводу пружини у даних зразках 0,22 см<sup>3</sup>, а його маса – 1,42 г. Таким чином, питома механічна потужність, що розвивають зразки пружин змінюється від 3,37 Вт/г до 0,38 Вт/г. Отримані показники питомої потужності дозволяють наближено прогнозувати витрати сплаву для генерації максимальної потужності, наприклад: 1 кВт – 297 г, 5 кВт – 1483 г, 10 кВт – 2967 г.

### Висновки і перспективи.

1. Експериментальними дослідженнями встановлено, що суттєвий вплив на величину генерованого зусилля пружиною із сплаву Nitinol обумовлює величина деформації пружини. При деформації пружини 160 мм і температурі 100 °С генероване зусилля складало 4...4,05 Н, а при деформації 100 мм – 1,75...1,85 Н.

2. Функціональна залежність максимального генерованого зусилля від величини деформації пружини близька до лінійної. Використовуючи метод інтерполяції, розраховані коефіцієнти і побудована функціональна залежність

$$F(L) = a \cdot L - b,$$

де  $L$  – довжина деформації (розтягування) пружини, мм; коефіцієнти  $a=0,0332$  Н/м;  $b=1,312$  Н. Отримана залежність дозволяє розширити межі визначення максимального генерованого зусилля від величини деформації пружини, та буде необхідна при моделюванні характеристик теплового двигуна.

3. Отримані експериментальні результати дали можливість визначити максимальну та мінімальну потужності, що розвивають зразки пружин при їх нагріванні і скороченні:  $P_1=4,79$  Вт,  $P_2=0,54$  Вт.

4. Визначено максимальну та мінімальну питому потужності, що розвивають зразки пружин із сплаву Nitinol - 3,37 Вт/г, 0,38 Вт/г. Показники питомої потужності дозволяють наближено прогнозувати витрати сплаву для генерації максимальної потужності, наприклад: 1 кВт – 297 г, 5 кВт – 1483 г, 10 кВт – 2967 г.

### Список використаних джерел

1. Функціональні інтерметаліди в електроенергетичних установках. В.В. Козирський, В.В. Каплун, С.М. Волошин. К.: Компринт, 2021. 347 с.: 187 іл.
2. Class Notes: Introduction to Smart Materials and Intelligent Systems, Gregory Washington Ohio State University, OH 43210-1107. P.159.
3. Коваль Ю. М. Сплави з ефектом пам'яті форми – потужний клас функціональних матеріалів. Наука та інновації. 2005. Т.1, № 2. С. 80-95.
4. Балицька Н. О. Особливості торцевого фрезерування сплавів Ni-Ti з ефектом пам'яті форми. Технічна інженерія. 2022. Вип. 2(90). С. 3-12. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-3-12](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-3-12)
5. L.C. Chang, T.A. Read, Trans. AIME. 1951. Vol 191. P. 47.
6. D.E. Hodgson, Using Shape Memory Alloys, Shape Memory Applications, 1988. P. 234.
7. J.D. Harrison, D.E. Hodgson. Shape Memory Effects in Alloys, J. Perkins, Ed.Plenum Press, 1975. P.517.
8. Електротехнічне обладнання на основі функціональних матеріалів. Козирський В.В. Каплун В.В. та ін. К.: НУБіП України, 2014. 409 с.
9. Бунько В.Я., Козирський В.В. Використання елементів з ефектом пам'яті форми для створення систем генерації електроенергії. Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: [Електронний ресурс] : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 9 листопада 2023 р. Держ. біотехнологічний ун-т. Харків, 2023. 249 с. Електронні текстові дані. Режим доступу : <https://biotechuniv.edu.ua/nauka/konferentsiyi/>
10. Бунько В. Я., Козирський В. В. Дослідження елементів з ефектом пам'яті форми та визначення їх термомеханічних характеристик при різних температурах загартування. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. Наукове видання. 2024. № 1 (494). С. 69-73.

### References

1. Kozyrskiy, V.V., Kaplun, V.V., Voloshyn S.M. (2021). Funktsionalni intermetalidy v elektroenerhetychnykh ustanovkakh. [Functional intermetallics in power plants]. Kyiv: Komprynt, 347.
2. Class Notes: Introduction to Smart Materials and Intelligent Systems, Gregory Washington Ohio State University, OH 43210-1107. P.159.
3. 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, 1 (2), 80-95.
4. 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)
5. Chang, L.C., Read, T.A. (1951). Trans. AIME, 191, 47.
6. Hodgson, D.E. (1988). Using Shape Memory Alloys. Shape Memory Applications, 234.

7. Harrison, J.D., Hodgson, D.E. (1975). Shape Memory Effects in Alloys. J. Perkins, Ed. Plenum Press, 517.
8. Kozyrskyi, V.V., Kaplun, V.V. (2014). Elektrotekhnichne obladnannia na osnovi funktsionalnykh materialiv [Electrical equipment based on functional materials]. Kyiv: NUBiP Ukrainy, 409.
9. Bunko, V.Ia., Kozyrskyi, V.V. (2023). Vykorystannia elementiv z efektom pamiaty formy dlia stvorennia system heneratsii elektroenerhii. Elektroenerhetyka, elektromekhanika ta tekhnolohii v APK [Using shape memory elements to create power generation systems. Electric power engineering, electromechanics and technologies in agriculture]. Materialy Mizhnar. nauk.-prakt. konf., 9 lystopada 2023 r. Derzh. biotekhnolohichniy un-t. Kharkiv, 249. Available at: <https://biotechuniv.edu.ua/nauka/konferentsiyi/>
10. Bunko, V. Ya., Kozyrskyi, V. V. (2024). Doslidzhennia elementiv z efektom pamiaty formy ta vyznachennia yikh termomekhanichnykh kharakterystyk pry riznykh temperaturakh zahartuvannia [Study of elements with shape memory effect and determination of their thermomechanical characteristics at different tempering temperatures]. Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admiralа Makarova, 1 (494), 69-73.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THERMO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF NITINOL ALLOY SPRINGS

*V. Kozyrskyi, V. Bunko*

*Abstract. The article deals with the research of heat-sensitive elements based on Nitinol material - a wire with a diameter of 1.0 mm, which in the form of springs can potentially be used with the appropriate geometric parameters in the design of a heat engine of an electric power generation system. Research allows to determine the thermomechanical characteristics of springs from this alloy, namely the study of the influence of the magnitude of the preliminary deformation of such elements on the generated force. Heat hardening of the nitinol wire was carried out at a temperature of 400 to 500 °C for 4.5 hours. The study of thermomechanical characteristics was carried out when heating a thermosensitive element (spring) in water from a temperature of 20 °C to 100 °C, force measurements were performed with a spring dynamometer. Thermosensitive elements - two springs made of Nitinol alloy - were chosen for research in this work. The paper shows the model and general view of the experimental setup for the knowledge of thermomechanical characteristics of springs.*

*The thermomechanical characteristics of the springs at different amounts of their deformation have been constructed. Graphs are presented that show that the functional dependence of the maximum generated force on the amount of spring deformation is close to linear. The interpolation method was used in the work, the corresponding coefficients were calculated and the functional dependence was constructed. The resulting dependence allows you to increase the limits of determining the maximum generated force from the amount of spring deformation and will be necessary when modeling the characteristics of a heat engine.*

*Experimental studies have established that a significant influence on the amount of force generated by a spring made of Nitinol alloy is determined by the amount of spring deformation. At a spring deformation of 160 mm and a temperature of 100 °C, the generated force was 4...4.05 N, and at a deformation of 100 mm - 1.75...1.85 N.*

*Key words: thermosensitive element, force, generation of electrical energy, nitinol, shape memory alloy*