

11. Litvin I.N. (1999), Paired Comparisons in Science, Social Science, Economics and Health. *Inaugural and Emeritus Addresses*. University of Port Elizabeth. pp. 1–36.

12. Totsenko V.H., Tsyhanok V.V. and Kachanov P.T. (2002), "Pidtrymka pryiniattia rishennia shchodo vyboru metodu oderzhannia kardynalnykh ekspertnykh otsinok" [Decision-making support regarding the choice of the method of obtaining

cardinal expert assessments], *Systemni doslidzhennia ta informatsiini tekhnologii*, Kyiv. № 4. С. 52-53. [in Ukrainian]

13. Korolov V.M., Kryvtsun V.I. and Aheiev O.V. (2023), "Chastkova metodyka porivnialnoho otsiniuvannia parametriv komplektiv rozminuvannia" [Partial method of comparative evaluation of demining kit parameters]. *Collection of Scientific Works of the Military Institute of Taras Shevchenko Kyiv National University*, Kyiv, № 79. pp. 26-34. [in Ukrainian]

PARTIAL METHODOLOGY FOR DETERMINING RELATIVE PERSONAL INDICATORS CHARACTERISTICS OF DEMINE SETS

V. Korolov, O. Ageev

Based on the analysis of existing approaches to the modeling of demining processes, the use of reconnaissance kits and demining of the area, in order to determine the variant of the kit, it is necessary not only to compare their parameters, but also to determine the relative personal indicators of the characteristics of these kits. To determine them, the method of expert evaluations, namely ranking, was used. Determining the significance of relative personal indicators of the characteristics of mine clearance kits can cause some problems, which largely depends on the individual skills and experience of the expert. The lack of standardized metrics, in relation to generally accepted standards for reconnaissance and demining kits, can make it difficult to compare indicators between different experts. The lack of a clear methodology can lead to ambiguity and unpredictability in the assessment.

The article presents a partial method of relative values of personal indicators of the characteristics of demining kits using the method of expert evaluations. The proposed partial method allows you to determine the coefficients of relative personal indicators of the characteristics of demining kits. Based on the theoretical provisions presented in the study, a methodology for processing the results of the expert survey is proposed. At the end, the numerical values of the coefficients of relative personal indicators for a typical demining kit were obtained and the direction of further research was formulated.

Keywords: explosive object; improvised explosive device; target tension sensor; sweeping; sets of reconnaissance and demining of the area; coefficients, personal indicators; expert survey.

УДК: 623.4

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.29.2023.37-43>

А.Г. Шандрівський, В.Д. Смичок, С.В. Королько

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

Article history: Received 24 September 2023; Revised 27 September 2023; Accepted 30 September 2023

ПРОБЛЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ ОЗБРОЄННЯ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

Матеріали з ефектом пам'яті форми використовуються в різних областях, включаючи військову техніку, для створення засобів з автономними або вдосконаленими властивостями. Особливо він може бути корисним у елементах конструкцій, які здатні до самовідновлення після деформацій або пошкоджень в результаті вибуху, ударів чи інших навантажень, що виникають при проведенні військових операцій. Сплави з пам'яттю форми (СПФ) – це матеріали, які мають здатність запам'ятовувати та відновлювати накопичену деформацію за певних умов. Це робить їх особливо корисними при проєктуванні та створенні частин різноманітних пристроїв.

В статті розглянуто питання врахування зміщення характеристичних температур під впливом зовнішнього навантаження сплавів з пам'яттю форми (СПФ) в термінах синтезної теорії незворотної деформації та запропоновано нелінійну формулу для знаходження характеристичних температур металів з пам'яттю під час навантаження. Отримане співвідношення використане для знаходження частки нової фази і для швидкості утворення нової фази як функції від величини зовнішнього навантаження, швидкості навантаження, абсолютної температури, швидкості зміни температури і характеристичних температур в термінах ефективної температури. Отримані співвідношення плануються застосувати до розрахунку складного температурно-силового впливу на рухомі елементи маніпуляторів, актуаторів і сенсорів, які виготовлені із СПФ і мають застосування в озброєнні військової техніки.

Ключові слова: характеристичні температури фазового переходу, сплави з пам'яттю форми, синтезна теорія незворотної деформації, фазова деформація, ефективна температура.

Постановка проблеми

Математичне моделювання деформаційної поведінки матеріалів є важливою складовою при розробці різноманітної військової техніки. Воно дозволяє аналізувати поведінку матеріалів та структур під час деформацій та навантажень, що виникають в матеріалах під впливом зовнішніх чинників. Це може стосуватися різних аспектів, таких як лінійні переміщення, статичні та динамічні навантаження, удари, вибухи, термічні впливи та інші фактори, які можуть вплинути на структурну цілісність елементів військової техніки.

Сплави з пам'яттю форми (СПФ) – це матеріали, які мають здатність запам'ятовувати та відновлювати накопичену деформацію за певних умов. Це робить їх особливо корисними у робототехніці, де вони можуть бути використані для створення різноманітних рухомих елементів, сенсорів, актуаторів та інших складових систем та пристроїв.

Сплави з пам'яттю форми з'явилися зовсім недавно. Це сплави в основному з титану, нікелю та домішками деяких легуючих елементів. За минулі десятиліття вони знайшли широке застосування в різних галузях науки і техніки. Це аерокосмічна, машинобудівна та електротехнічна галузь, приладобудування, світлотехніка, а також розробка нових типів зразків озброєння і військової техніки. До таких матеріалів відносять типового представника – нітінол.

Слід зазначити, що в останні роки вченими розроблені принципово нові типи матеріалів, що поєднують в собі функції давача і виконавчого механізму (реакція на вплив). Це так звані смарт – розумні матеріали "smart_and_intelligence materials".

Одним з основних застосувань СПФ в робототехніці є створення рухомих елементів та складових сенсорів і актуаторів. Наприклад, їх можна використовувати для створення сегментів роботів, які потребують гнучкості та рухливості. СПФ можуть бути використані для створення маніпуляторів, які дозволяють йому легко рухатись і виконувати завдання у різних середовищах. Одним з найбільш важливих властивостей СПФ є їх здатність до збереження форми при деформації. Це робить їх корисними для створення сенсорів, які можуть реагувати на різницю у формі об'єкта. СПФ можуть бути використані для створення сенсорів тиску та температури. Ці сенсори можуть бути використані для розробки роботів, які можуть розпізнавати об'єкти та розрізняти їх за формою та температурою середовища чи власною температурою матеріалу. Актуатори – це компоненти, які перетворюють електричний, механічний, оптичний або інший вид енергії на рух. Причому усі ці матеріали здатні за певних умов запам'ятовувати та відновлювати накопичену деформацію. Це досягається завдяки особливостям їх мікроструктури, складу сплаву та термопластичному ефекту. Коли СПФ піддається

термічному впливу в певній температурній зоні, де він може переходити між двома активними станами: аустенітним (вищої температури) та мартенситним (нижчої температури), то при наявному зовнішньому навантаженні відбувається ріст фазової деформації, а із ступенем навантаження температура початку і завершення появи деформації змінюється. Кожен з цих станів має власну кристалічну структуру та характеристики, що визначаються його хімічним складом. Пам'ять форми (ПФ) в металах існує завдяки наявності в таких матеріалах термопружного мартенситного перетворення. Таке перетворення може ініціюватись зміною температури, а також впливом зовнішніх чинників – деформації та навантаження матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сплави з пам'яттю форми мають здатність запам'ятовувати форму і після деформування зовнішнім навантаженням повертатися до початкової форми із зміною температури. Це забезпечується за рахунок термоеластичних і термопластичних ефектів, які виникають у сплавах під час їх взаємодії з навколишнім середовищем. В багатьох роботах [2, 3, 7] проведено дослідження та проаналізовано вплив зовнішнього навантаження на характеристичні температури в СПФ сплавах. Так, при певних температурах в СПФ спостерігається ефект надпружності, величина деформації при якій зростає в рази і є набагато більшою, ніж звичайна пружна деформація.

Саме тому однією із основних характеристик сплавів з пам'яттю форми є температури фазового переходу, які визначаються за допомогою диференційної скануючої калориметрії. Ці температури вказують на температурні точки, при яких сплав перетворюється з однієї кристалічної фази в іншу. Для термопружного мартенситного перетворення існує рівновага фаз і при зміні температури одночасно можуть існувати як високотемпературна (аустенітна), так і низько-температурна (мартенситна) фаза, що забезпечує здатність сплаву до пам'яті форми. Наявність двох фаз обумовлює визначення відразу декількох особливих точок на температурній діаграмі, які відповідають початку появи одної з фаз і завершення повного перетворення матеріалу з одної фази в іншу. Показником кількості однієї з фаз є кількість мартенситу, який утворився в сплаві. Саме від цього параметра залежить величина фазової деформації [4].

До особливостей мартенситного перетворення відноситься складність визначення температури рівноваги фаз, що використовується для визначення ентропії перетворення на основі калориметричних даних. Експерименти, проведені в роботах [3, 5] дозволяють встановити, що при вимірюваннях температурної залежності різні властивості сплавів з ЕПФ відповідають різним деформаціям. Одним з параметрів, який

можна встановити під час проведення вимірювань – це наприклад, зміна електричного опору матеріалу, яка в свою чергу залежить від будови кристалічної ґратки і визначає нам характеристичні температури перетворення [1-4], де: A_s , A_f , M_s , M_f – температури початку і завершення аустенітного і мартенситного перетворення відповідно. В роботі [5] запропонована нелінійна формула для вирахування зміщення характеристичних температур при наявності зовнішнього навантаження.

Вплив зовнішніх чинників, зокрема, зовнішнього навантаження, призводить до того, що характеристичні температури початку і завершення фазового перетворення зміщуються за лінійним законом, і такий вплив відповідає модифікованому рівнянню Клаузіуса-Клапейрона, яке спостерігаємо в роботах [6, 7]. Це рівняння має наступний вигляд:

$$\frac{d\sigma}{dT} = -\frac{\rho\Delta S}{\Delta\varepsilon}, \quad (1)$$

де $d\sigma/dT$ – нахил кривої зовнішнього навантаження до температури, ρ – густина матеріалу, ΔS – різниця між ентропією аустенітної і мартенситної фаз, $\Delta\varepsilon$ – деформація повного фазового переходу [8, 9].

В роботі [10, с. 9984, (4)], рівняння Клаузіуса-Клапейрона записано через ентальпію перетворення, а саме

$$\frac{d\sigma}{dT} = -\frac{\Delta H}{T_0\varepsilon}, \quad (2)$$

де ΔH і ε – ентальпія і відносна деформація фазового перетворення, T_0 – температура термодинамічної рівноваги фаз. Враховуючи останні формули, можна ефективно дослідити залежності деформаційного стану СПФ матеріалу від навантаження та опору його кристалічної ґратки.

Метою статті є розроблення математичних положень встановлення ефекту пам'яті форми для визначення деформаційної поведінки матеріалів від кількості мартенситної фази і їх температурної залежності від прикладеного навантаження, яке може бути використано в синтезній теорії незворотної деформації.

Виклад основного матеріалу

При конструюванні військової техніки із використанням матеріалів з ефектом пам'яті форми важливо враховувати різні аспекти, а саме:

1) вибір матеріалу (хімічний склад, попередньо наведені структурні зміни, що впливають на величину зворотної деформації тощо);

2) умови експлуатації (термосиловий вплив, максимальні деформації);

3) геометрію виробу (розміри виробу з ПФ до і після повернення форми);

4) умови активації ЕПФ (змінюючи температуру, змінюючи напруження чи іншими зовнішніми впливами);

5) проведення тестування елементів з ПФ в реальних умовах або наближених до них, щоб переконатися, що вони працюють, як очікувалося;

б) перевірка інтегрованості елементів з ефектом пам'яті форми в конструкцію сенсорів та актуаторів для виконання захисних чи додаткових функцій механізмів військової техніки в різних умовах.

Застосування ефекту пам'яті форми в матеріалах СПФ може забезпечити значний ефект створення нових принципів контролю та регулювання у зразках військової техніки, нові можливості для автономного відновлення після пошкоджень або адаптація до змінних умов. Однак важливо враховувати всі аспекти від проектування таких матеріалів до їх тестування для забезпечення надійності і ефективності таких систем.

З інженерної точки зору найбільш цікавими характеристиками надпружного матеріалу є рівень напруження прямого і зворотного перетворення та максимальна відновлювана здатність до деформації і температурна залежність реакції. Тому для створення хорошої моделі необхідно добре передбачити ці три характеристики.

Через складність, пов'язану з мартенситним перетворенням (залежність від напруження, температури, навантаження та мікроструктури), конститутивну поведінку СПФ важко передбачити.

Синтезна теорія незворотної деформації є підходом до вивчення деформацій матеріалів, який зосереджується на описі поведінки матеріалу під час пластичної деформації. Побудована модель базується на синтезі положень, які впливають із концепції ковзання (відповідність площин простору напружень визначеним системам ковзання) і теорії плинності із сингулярною поверхнею навантаження. В рамках цієї моделі формулюються співвідношення для вивчення процесу навантаження у тривимірному підпросторі та змінюючи цих параметрів в залежності від часу та умов зовнішнього впливу. Оскільки фазова деформація однозначно залежить від кількості утвореного мартенситу або аустеніту і в більшості випадків відбувається шляхом зсуву, то це дозволяє розглядати деформацію в просторі напружень як вектор, який рухає (зміщає) площини досліджуваних параметрів А.О. Ілюшина [11]. Для довільного процесу деформування в точці деформованого тіла вектора напружень буде відповідати відповідний вектор деформацій.

Для опису деформаційної поведінки матеріалів використовується дворівневий підхід. На першому мікрорівні розглядаються напруження і деформація, які зорієнтовані в локальному базисі, а далі проводиться усереднення мікродеформацій на другий – вищий рівень.

Мікродеформації матеріалу СПФ є функціями напруження та температури і на основі параметрів моделі можуть бути встановлені впливи інших факторів на деформаційну поведінку матеріалу. Для дослідження матеріалів з СПФ при математичному моделюванні слід враховувати величину попередньо накопиченої деформації, кількість циклів термоцикування через зону фазового переходу, наявність пластичної деформації тощо. В цій роботі розглянуто лише величину

зовнішнього навантаження і введено обмеження, що матеріал не має наведеної попередньої деформації, як в матеріалах з багатократним ефектом пам'яті форми.

В роботі [10] проведені дослідження впливу зовнішнього навантаження на характеристичні температури термопружного мартенситного перетворення матеріалу Cu-Al-Ni з пам'яттю форми і показано, що, використовуючи формулу (2), не вдається отримати лінійний характер такого впливу, оскільки (2) дає лише нелінійну залежність.

Пропонується замість (2) використовувати іншу формулу, а саме

$$\frac{d\sigma}{dT} = -\frac{q}{TD}, \quad (3)$$

де q – теплота фазового перетворення [МДж/м³], T – температура в точці перетворення, D – дисторсія перетворення.

В синтезній теорії пластичності і повзучості [11] для опису деформаційної поведінки металів, в тому числі металів з пам'яттю форми [12] використовують ефективну температуру T^* . Використовуючи термінологію синтезної теорії незворотної деформації, можна вважати, що ефективні температури переходу залишаються незмінними для певного матеріалу під час навантаження, а зміна температури переходу від навантаження та інших впливів буде визначатись функціональним зв'язком з різними параметрами. Для врахування зовнішнього навантаження вираз з (3) для ефективної температури набуває вигляду:

$$T^* = T \exp\left(-\frac{D}{q} \tau\right), \quad (4)$$

де τ – напруження, при якому здійснюється кристалографічний зсув на величину дисторсії перетворення D .

Розклавши експоненту в ряд Тейлора і залишивши перших два члени розкладу, отримуємо вираз

$$T^* = T - T \frac{D\tau}{q}. \quad (5)$$

В синтезній теорії для визначення деформаційної поведінки матеріалів використовуються абсолютні значення температури, зовнішнього навантаження, величини деформації, а також прирости зміни цих характеристик. Після диференціювання формули (5) по часу отримуємо формулу для швидкості зміни ефективної температури в локальному об'ємі V_0 , де відбувається фазова деформація шляхом кристалографічного зсуву в локальній системі координат ортогональних векторів \vec{l} , \vec{m} , \vec{n} , а саме

$$\dot{T}^* = \dot{T} - \frac{\dot{T}}{q} D_{ik} \tau_{ik} - \frac{T}{q} D_{ik} \dot{\tau}_{ik}, \quad (6)$$

де D_{ik} – компоненти дисторсії перетворення, а τ_{ik} – локальні напруження у даному локальному базисі.

Встановив зміну ефективної температури з формули (6), вдається встановити кількість фази в локальному об'ємі в термінах синтезної теорії незворотної

деформації, враховуючи величини локальних напружень, швидкості зміни напружень, температури і швидкості зміни температури.

Вираз для швидкості появи кількості мартенситної фази при прямому мартенситному перетворенні в рамках ефективної температури T^* має вигляд:

$$\dot{\Phi}^* = -\frac{\dot{T}^*}{M_s - M_f}. \quad (7)$$

Формула (5) визначає зміну характеристичної температури внаслідок прикладеного зовнішнього навантаження.

Температуру початку мартенситного перетворення M_s без навантаження можна визначити різними експериментальними методами, а саме: 1) за допомогою оптичної мікроскопії; 2) на основі даних зміни ентальпії та ентропії перетворення; 3) за допомогою вимірювання електричного опору.

Якщо ж матеріал навантажити, то температура початку фазового перетворення M_s зміниться і таку температуру, згідно з формулою (5), можна визначити за виразом

$$M_s(\sigma) = M_s(0) \cdot \left(\frac{q}{q - D\sigma}\right). \quad (8)$$

Аналогічно можна отримати також і інші характеристичні температури.

Проведені розрахунки з використанням формул (2), (4) і (8) для температури початку мартенситного перетворення M_s для досліджуваного сплаву Cu-Al-Ni (Cu – 82,3%, Al – 13,2%, Ni – 4,5%, де $M_s = 406\text{K}$, середня густина $\rho = 8,13\text{ г/см}^3$, теплота $q = 85,365\text{ МДж/м}^3$, $D = 8.38\%$) наведені на рис. 1. На цьому ж рисунку наведений результат експерименту, який отриманий в роботі [10]. Як видно з рис. 1, при збільшенні навантаження збільшується розбіжність між прямою, яку отримують з формули (2), та експериментом. Отримане співвідношення (5) і її наслідок для температури початку мартенситного перетворення (8) краще описує точки експерименту.

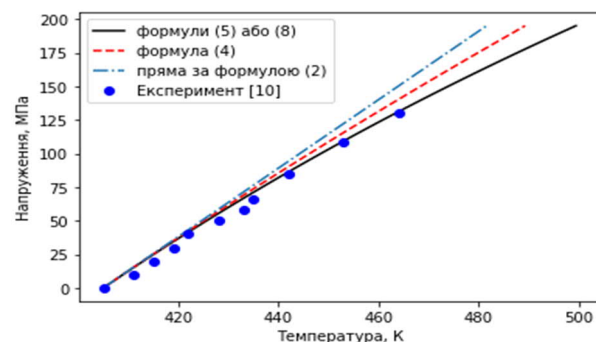


Рис. 1. Залежність характеристичної температури початку фазового перетворення M_s від прикладеного зовнішнього навантаження

Необхідно зауважити, що до формул (3) - (6), (8) входить теплота реакції q . Цей параметр доволі важко визначити точно з експерименту, оскільки він залежить від температури і від прикладеного зовнішнього навантаження. Врахування впливу температури і зовнішнього навантаження на теплоту реакції q в синтезній теорії незворотної деформації може враховуватись іншими параметрами математичної моделі деформаційної поведінки матеріалів з термопружним мартенситним перетворенням.

Аналіз формули (6) показує, що ця формула може бути застосована для математичного опису складних видів напружено-деформованого стану, коли одночасно може відбуватись зміна навантаження і зміна температури. Перерозподіл температур по зразку дозволить враховувати більш складну поведінку при різномунітних схемах температурно-силових впливів на матеріали з ПФ. На основі теоретичних положень та запропонованих досліджень СПФ матеріалів планується проводити дослідження та визначати параметри пам'яті форми СПФ матеріалів за допомогою наступної установки, яка наведена на рис. 2.



Рис. 2. Зображення установки для дослідження характеристик температур та електричного опору решітки матеріалу СПФ в залежності від зовнішнього навантаження

На рис. 2 зображена установка, яка складається з розтягувального механізму, сплаву СПФ у вигляді натягнутої металевої нитки, індикатора переміщення та додаткових вимірювальних пристроїв для визначення температури та опору сплаву.

Висновки

1. В роботі запропонована нелінійна залежність (5) для знаходження ефективної температури в рамках синтезної теорії незворотної деформації для матеріалів з термопружним мартенситним перетворенням.

2. За допомогою встановленої залежності для ефективної температури (5) наведена формула для

знаходження температури фазового переходу при дії зовнішнього навантаження (8).

3. Отримані співвідношення справедливі у синтезній теорії незворотної деформації в межах, коли навантаження не перевищують величину пластичної деформації як мартенситної, так і аустенітної фаз. Співвідношення фаз дійсні лише в околі температурного діапазону фазового переходу.

4. Отримані в даній роботі нелінійні співвідношення дозволяють розвинути синтезну теорію незворотної деформації на випадок термопружного мартенситного перетворення, що дає можливість знаходити величину фазової деформації при складних температурно-силових впливах на різноманітні елементи з пам'яттю форми озброєння військової техніки з наперед заданою точністю.

5. Розроблено універсальну установку для дослідження параметрів поведінки СПФ сплавів в залежності від часу навантаження, прикладеного зусилля та температурних залежностей, опору СПФ матеріалу та деформації.

Список літератури

1. Ortin J., Planes A. Thermodynamics of thermoelastic martensitic transformations. *Acta Metall*, 1989. 37. N5. pp. 1433-1441. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0001616089901752> DOI:10.13140/RG.2.1.4683.7847 (дата звернення 27.09.2023).

2. Deng Y., Ansell G.S. Investigation of thermoelastic martensitic transformation in a Cu-Zn-Al alloy. *Acta Metall*, 1990. 38. N1. pp. 69-76. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0956715190901354> DOI: /10.1016/0956-7151(90)90135-4 [(дата звернення 27.09.2023).

3. Deng Y., Ansell G.S. Boundary friction for thermoelastic martensitic transformation. *Acta Metall*, 1991. 39. N8. 1995-1999. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/095671519190168Z> DOI: [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(91\)90168-Z](https://doi.org/10.1016/0956-7151(91)90168-Z) (дата звернення 27.09.2023).

4. Koval Yu.N., Likhachev A.A. On the alternative possibilities of LGD-Theory application for description of martensitic transformation. *Proc. of the "ICOMAT'86"*, Japan Inst. of Metals, Tokio, 1986. pp. 61-66. URL: <https://www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/174157606.pdf> (дата звернення 27.09.2023).

5. Шандрівський А. Вплив зовнішнього навантаження на характеристичні температури матеріалу з пам'яттю форми. *Збірник НУ"ЛП"*, 2002, С.120-121. URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/c0008466-b670-47f8-9429-403de663e15e/content> (дата звернення 27.09.2023).

6. K. Otsuka and K. Shimizu. Pseudoelasticity and shape memory effects in alloys. *International Metals Reviews*, 1986. № 31(1). pp. 93-114, ISSN 0308-4590. doi: 10.1179/imtr.1986.31.1.93. URL: <http://www.maneyonline.com/doi/abs/10.1179/imtr.1986.31.1.93>. (дата звернення 27.09.2023).

7. T. W. Duerig and K. Bhattacharya. The measurement and interpretation of transformation temperatures in nitinol.

ASM International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, SMST 2017, 2017-May(4): 204–205, 2017. ISSN 2199-3858. doi: 10.1007/s40830-017-0133-0. (дата звернення 27.09.2023).

8. Y. Liu, A. Mahmud, F. Kursawe, and T. Nam. Effect of pseudoelastic cycling on the Clausius – Clapeyron relation for stress-induced martensitic transformation in NiTi. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008. № 449. pp. 82–87. doi: 10.1016/j.jallcom.2006.02.080. (дата звернення 27.09.2023).

9. Y. Liu and H. Yang. Strain dependence of the Clausius–Clapeyron relation for thermoelastic martensitic transformations in NiTi. *Smart Materials and Structures*, 16 (1): S22–S27, 2007. ISSN 0964-1726. doi: 10.1088/0964-1726/16/1/S03. URL <http://stacks.iop.org/0964-1726/16/i=1/a=S03>. (дата звернення 27.09.2023).

10. High-temperature shape memory alloys based on the Cu-Al-Ni system: design and thermomechanical characterization. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020. № 9 (5). pp. 9972–9984. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785420315003> DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.07.002 (дата звернення 27.09.2023).

11. Русинко А.К. Аналітична залежність швидкості усталеної повзучості металів від попередньої пластичної деформації. *Проблеми прочності*, 2000. № 2. С. 91-102.

12. Русинко К.М., Шандрівський А.Г. Фазова деформація наводнених полікристалічних тіл. *Проблеми прочності*, 1999. № 1. С. 53-59.

References

1. Ortin J. and Planes A. (1989), Thermodynamics of thermoelastic martensitic transformations. *Acta Metall*, 37, N5, pp. 1433-1441. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0001616089901752> DOI:10.13140/RG.2.1.4683.7847 (Accessed: 27 September 2023) [in Russian].

2. Deng Y. and Ansell G.S. (1990), Investigation of thermoelastic martensitic transformation in a Cu-Zn-Al alloy. *Acta Metall*, 38, N 1, pp/ 69-76. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0956715190901354> DOI: /10.1016/0956-7151(90)90135-4 (Accessed: 27 September 2023).

3. Deng Y. and Ansell G.S. (1991), Boundary friction for thermoelastic martensitic transformation. *Acta Metall*, 39, N 8, pp. 1995-1999. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/095671519190168Z> DOI: [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(91\)90168-Z](https://doi.org/10.1016/0956-7151(91)90168-Z) (Accessed: 27 September 2023).

4. Koval Yu.N. and Likhachev A.A. (1986), On the alternative possibilities of LGD-Theory application for description of martensitic transformation. *Proc. of the "ICOMAT'86", Japan*

Inst. of Metals, Tokio. pp. 61-66. URL: <https://www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/174157606.pdf> (Accessed: 27 September 2023).

5. Shandrivskyy A. (2002), "Vplyv zovnishnoho navantazhennya na kharakterystychni temperatury materialu z pamyattyu formy" [The influence of external load on the characteristic temperatures of a material with shape memory] *Zbirnyk NU"LP"*, pp. 120-121. URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/c0008466-b670-47f8-9429-403de663e15e/content> (Accessed: 27 September 2023) [in Ukrainian].

6. K. Otsuka and K. Shimizu. (1986), Pseudoelasticity and shape memory effects in alloys. *International Metals Reviews*, 31(1). pp. 93–114,. ISSN 0308-4590. doi: 10.1179/imtr.1986.31.1.93. URL <http://www.maneyonline.com/doi/abs/10.1179/imtr.1986.31.1.93> (Accessed: 27 September 2023).

7. T. W. Duerig and K. Bhattacharya (2017), The measurement and interpretation of transformation temperatures in nitinol. *ASM International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, SMST 2017, 2017-May(4):204–205*,. ISSN 2199-3858. DOI: 10.1007/s40830-017-0133-0 (Accessed: 27 September 2023).

8. Y. Liu, A. Mahmud, F. Kursawe and T. Nam (2008), Effect of pseudoelastic cycling on the Clausius – Clapeyron relation for stress-induced martensitic transformation in NiTi. *Journal of Alloys and Compounds*, № 449. pp. 82–87. DOI: 10.1016/j.jallcom.2006.02.080 (Accessed: 27 September 2023).

9. Y. Liu and H. Yang. (2007), Strain dependence of the Clausius–Clapeyron relation for thermoelastic martensitic transformations in NiTi. *Smart Materials and Structures*, 16(1):S22–S27. ISSN 0964-1726. DOI: 10.1088/0964-1726/16/1/S03. URL <http://stacks.iop.org/0964-1726/16/i=1/a=S03> (Accessed: 27 September 2023).

10. (2020), High-temperature shape memory alloys based on the Cu-Al-Ni system: design and thermomechanical characterization. *Journal of Materials Research and Technology*. № 9(5). pp. 9972–9984. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785420315003> DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.07.002 (Accessed: 27 September 2023).

11. Rusynko A.K. (2000), "Analitichna zalezhnist shvydkosti ustalenoji povzuchosti metaliv vid poperednoyi plastychnoyi deformatsiyi" [Analytical dependence of the rate of steady creep of metals on the previous plastic deformation], *Strength Problems*, № 2, pp. 91-102. [in Ukrainian]

12. Rusynko K.M. and Shandrivskyy A.H. (1999), "Fazova deformatsiya navodnennykh polikrystalichnykh til" [Phase deformation of hydrogenated polycrystalline bodies]. *Strength Problems*, № 1, pp.53-59. [in Ukrainian]

PROBLEMS OF MODELING ELEMENTS WITH SHAPE MEMORY ALLOYS OF MILITARY EQUIPMENT

A. Shandrivdkyy, V.Smychok, S. Korolko

Shape memory alloys (SMAs) are used in various fields, including military equipment, to create means with autonomous or improved properties. It can be especially useful in structural elements that are capable of self-healing after deformations or damage as a result of explosions, impacts or other loads that occur during military operations.

SMAs are materials that have the ability to remember and restore the accumulated deformation under certain conditions. This makes them particularly useful in robotics, where they can be used to create moving parts, sensors, actuators and other components.

One of the main applications of SMA in robotics is the creation of moving elements. For example, they can be used to create bendable segments in jobs that require flexibility and mobility. SMAs can be used to create manipulators that allow a robot to easily move and perform tasks in different environments. One of the most important properties of SMAs is their ability to retain their shape during deformation. This makes them useful for building sensors that can detect differences in the shape of an object. SMAs can be used to create pressure sensors that respond to a change in shape under the influence of external pressure. These sensors can be used to develop robots that can recognize objects and distinguish them by shape. SMA can also be used to create actuators. Actuators are components that convert electrical, mechanical, or other types of energy into motion. SMA are materials that have the ability to remember and restore the accumulated deformation under certain conditions. This is achieved due to the peculiarities of their microstructure and thermoelastic effect. When SMA is subjected to thermal influence in the temperature zone where it can transition between two states: austenitic (higher temperature) and martensitic (lower temperature), under an existing external load, the phase strain increases, and with the degree of load, the temperature of the beginning and end of the emerging of straine changes. Each of these states has its own crystal structure and characteristics determined by its chemical composition. The article considers the issue of taking into account the shift of characteristic temperatures under the influence of an external load of SMA in terms of the synthetic theory of irreversible deformation and proposes a non-linear formula for finding the characteristic temperatures of metals with memory during loading. The obtained ratio was used to find the proportion of the new phase and the rate of formation of the new phase as a function of the magnitude of the external load, the rate of loading, the absolute temperature, the rate of temperature change and the characteristic temperatures in terms of the effective temperature.

Keywords: *characteristic temperatures of the phase transition, shape memory alloys, synthetic theory of irreversible deformation, phase deformation, effective temperature.*
