

МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ ПОВЕДІНКИ СПЛАВІВ З ЕФЕКТОМ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ ПРИ РІЗНИХ ТЕРМОСИЛОВИХ ВПЛИВАХ

к.ф.-м.н., снс. А.М. Тітенко¹, к.т.н., доц. Л.Д. Демченко², студент Я.А. Тітенко³

¹ Інститут магнетизму НАН та МОН України

² Національний технічний університет України «КПІ», Інженерно - фізичний факультет, кафедра МТО

³ Національний технічний університет України «КПІ», Факультет електроенерготехніки та автоматики
E-mail: titenko@imag.kiev.ua

В роботі представлені результати системного аналізу деформаційної поведінки сплавів з пам'яттю форми при різних термомеханічних режимах деформування, які можуть виступати в якості самостійних систем управління, завдяки своїм унікальним фізико-механічним властивостям. Запропоновано модель деформаційної поведінки сплавів з пам'яттю форми в змінних циклах навантаження-температура.

Розвиток сучасної техніки потребує значних зусиль інженерно-технічних працівників, спрямований на розробку та впровадження сучасних матеріалів і технологій, для забезпечення покращення їх експлуатаційних характеристик. На зміну конструкційним матеріалам приходять функціональні, які поступово витісняються багатофункціональними. Багатофункціональні матеріали здатні автономно адаптуватися до зміни форми в залежності від зовнішніх умов і внутрішніх факторів в адаптивних конструкціях, системах регулювання і т.п. Зазвичай для забезпечення точного і стійкого керування технічним процесом використовують автоматичні системи управління (АСУ), які потребують автоматизації, енергозалежності і точного регулювання. Альтернативою цьому можуть виступати системи самостійного управління (ССУ), дія яких основана на адаптивних властивостях самих функціональних матеріалів. До таких матеріалів з можливостями ССУ відносяться сплави з пам'яттю форми (СПФ).

В пристроях з ССУ, які потребують значних переміщень робочого елемента, використовують, як правило, конструкції різноманітних пружин. Однак, в деяких випадках, їх використання обмежується через їх нестабільну роботу при циклічних режимах термомеханічних навантажень. В умовах високих тисків і температур, виникає необхідність використовувати занадто масивні пружини, що підвищує інерційність системи та погіршує точність регулювання діапазону робочого тиску, що значно збільшує габарити конструкції з урахуванням відведення від них тепла. На заміну пружинним механізмам приходять термосилові конструкції на основі СПФ, які забезпечують надійне ССУ.

Широко відомі приклади використання СПФ. В аерокосмічній галузі ССУ із СПФ застосовуються в якості виконавчих пристроїв [1]: з'єднувальних та збірних муфт, мартенситних шприцювальних пристроїв, надпружних трансформерів, м'язових мартенситних дублерів з мартенситним приводом і т.д. Перевагою аварійних мартенситних приводів над традиційними дублюючими гідро - і пневмосистемами є те, що робочі елементи пам'яті являють собою твердотільні прямі перетворювачі теплової чи електричної енергії в механічну. При цьому вони не потребують додаткових перетворювачів енергії типу електричних насосів і компресорів, та не вимагають герметизації [2]. В запірній апаратурі СПФ використовують в якості ущільнювачів або регуляторів тиску [3,4]. Застосування таких конструкцій призводить до збільшення зусилля притискання запірної арматури до сидла та надає можливість його багатократного спрацювання, що забезпечує розширення функціональних можливостей і спрощує конструкцію запірної арматури.

Непружні деформації, викликані мартенситними перетвореннями (МП) в СПФ реалізуються за допомогою наступних можливих механізмів [5]: 1) рухом поверхні розділу між мартенситом і матрицею; 2) рухом двійникових границь; 3) деформаційним двійникуванням по різноманітним кристалографічним системам; 4) рухом поверхні розділу

мартенсит - мартенсит; 5) переорієнтацією варіантів мартенситних кристалів в існуючому мартенситі; 6) перетворенням одного мартенситу в інший. Зазвичай 1-3-й механізми деформації діють при низьких напруженнях, а 4-6-й при досить високих напруженнях [5].

До переваг силових приводів із СПФ варто віднести наступні [6]: велику діючу силу; великі відновлювальні деформації; деформування різними видами (розтяг, стискання, згин та кручення); велику питому величину роботи в розрахунок на одиницю маси. Саме через великі величини деформації та питомої роботи на одиницю маси СПФ є найбільш перспективними матеріалами для силових приводів і ССУ в виконавчих пристроях.

Виходячи з вищезазначеного видається переконливим застосування СПФ в пристроях, робота яких пов'язана з ССУ в термосилових механізмах, для чого потрібно проаналізувати та запропонувати оптимальні характеристики термдеформаційної поведінки цих сплавів, надаючи рекомендації по їх функціональній циклічній роботоспроможності.

Метою даної роботи є розробка моделі деформаційної поведінки сплавів з пам'яттю форми в змінних циклах навантаження-температура та встановлення принципів їх функціонування як основних активних виконавчих елементів в запірній і виконавчій апаратурі.

В даній роботі запропоновано модельну діаграму деформування СПФ при змінних термосилових режимах випробовування, яка представлена на рис.1. Основними кривими процесу виступають криві 1 (позначені точками 0-6) та 2 (4-7), по яких по кривій 1 протікають пружні деформації вихідної фази за певної температури, а по кривій 2 розвантаження індукованої мартенситної фази. При навантаженні в т. 1 відбувається відхилення від прямої 1, що відображається горизонтальним плато, яке пов'язане з структурною перебудовою матеріалу вихідної фази, після чого вже в т. 3 пружно деформується саме мартенситна фаза з меншими пружними константами. Навантаження до т. 1 супроводжується розвантаженням по цій самій кривій 1, а після розвантаження по кривій 2 відбувається повне відновлення деформації 4-5 за рахунок зворотного фазового перетворення, про що свідчить ще одне плато з меншим напруженням. Основними вимогами до кривих 1 та 2 є те, що вони мають бути безгістерезисними. В разі підвищення робочої температури процесу згідно рівняння Клаузеуса-Клайперона діаграма деформування лінійно зміщується в сторону більш високих напружень σ :

$$d\sigma/dT = \rho \Delta H^{P \rightarrow M} / T_0(\sigma) \varepsilon^{P \rightarrow M} = \rho \Delta S^{P \rightarrow M} / \varepsilon^{P \rightarrow M} \quad (1)$$

де T_0 – температура рівноваги між аустенітною і мартенситною фазами, $\Delta H^{P \rightarrow M}$ – скрита теплота перетворення и $\Delta S^{P \rightarrow M}$ – ентропія перетворення (при T_0), $\varepsilon^{P \rightarrow M}$ – деформація перетворення, ρ – густина матеріалу.

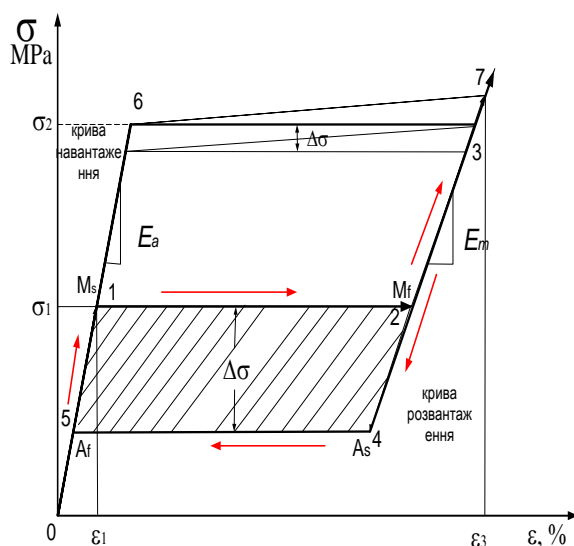


Рис. 1. Діаграма деформування СПФ при різних термосилових впливах

При більш високій температурі та напруженні $\sigma_1'(T_1) > \sigma_1(T_1)$ індукування мартенситу відбувається вище кривої 0-1-2-3-4-5-0 з меншим механічним гістерезисом. При цьому загальна деформація $\varepsilon_{\text{заг.}}$ складається з пружної $\varepsilon_{\text{пр.}}$ та деформації фазового перетворення $\varepsilon^{\text{ф.п.}}$: $\varepsilon_{\text{заг.}} = \varepsilon_{\text{пр.}} + \varepsilon^{\text{ф.п.}}$, а оскільки аустенітна фаза має більш високі пружні константи, то $\varepsilon^{\text{ф.п.}}_{\text{пр.}} > \varepsilon^{\text{ф.п.}}_{\text{зв.}}$.

Так, наприклад, в сплавах TiNi зміна зворотної деформації з ростом температури випробовувань при стисканні може бути обумовлена різницею ефективних модулів пружності аустеніту E_a і мартенситу E_m [7]. Якщо зміна лінійних розмірів тіла пов'язана не лише з деформацією ґратки, але й з пружним подовженням/стисненням через різницю пружних модулів між аустенітом E_a та мартенситом E_m , то з'явиться додатковий вклад, який пов'язаний з різницею E_a та E_m [7]:

$$\varepsilon_{\text{звор.}} = \varepsilon_0 + \left[\frac{1}{E_m} - \frac{1}{E_a} \right] |\sigma|, \quad (2)$$

де ε_0 – теоретичний ресурс деформації ґратки; σ – напруження утворення мартенситу.

В монокристалах NiFeGa [8] при деформації стисненням значення ефективного пружного модуля аустеніту E_a стає меншим, ніж модуля мартенситу E_m , що призводить до зменшення зворотної деформації $\varepsilon^{\text{ф.п.}}_{\text{зв.}}$ при дослідженні надпружності. З ростом температури модуль пружності аустеніту E_a збільшується приблизно в 2 рази в інтервалі температур від 300 до 350 K, а різниця модулів сильно скорочується. Проте, разом з тим в 3,5 рази зростає критичне напруження індукування мартенситу. Відповідно до (2), при підвищенні температури випробовувань та зовнішніх напружень значення $\varepsilon^{\text{ф.п.}}_{\text{зв.}}$ через різницю ефективних пружних модулів $E_a < E_m$ зменшується, що призводить до більш низьких значень $\varepsilon^{\text{ф.п.}}_{\text{зв.}}$ при розвитку надпружності, в порівнянні з ефектом пам'яті форми [8].

В різних моделях визначення загальної деформації є надто складною описовою задачею, де як правило, враховують велику кількість різних параметрів процесу, наприклад, у феноменологічному опису деформації без параметра порядку в моделі Баумгарта [9]:

$$\varepsilon(\sigma, T) = \varepsilon_0 - C_1(T - T_0) + \sigma \left[\frac{1}{E_0} - C_2(T - T_0) \right] \quad (3)$$

де $E(T_0)$ – модуль Юнга при початковій температурі, C_1 , C_2 – експериментальні значення констант.

Зменшення механічного гістерезису $\Delta\sigma$ (різниця між значеннями на середині кривих 1-2 та 4-5 в нашому випадку) із збільшенням температури випробовування відмічено в багатьох роботах, наприклад [8, 10-11], що є основною закономірністю деформаційної поведінки СПФ. Для монокристалів NiFeGa величина механічного гістерезису мала, слабо залежить від температури і складає $\Delta\sigma \sim 16$ МПа, а під навантаженням супроводжується дефектоутворенням.

Механічний гістерезис МП ($\Delta\sigma$) тісно пов'язаний з функціональними властивостями СПФ [12]. В статті [13] вивчали вплив кристалічних дефектів на $\Delta\sigma$. Фізичний механізм цього впливу пояснюється наступним чином: МП призводить до генерації та просторової перебудови кристалічних дефектів з реконфігурацією дефектної підсистеми, що в кінцевому результаті зводиться до появи залежного від часу внутрішнього напруження. В свою чергу, внутрішні напруження, які виникають при прямому і зворотному МП відрізняються, ширина петлі гістерезису $\Delta\sigma$ приблизно пропорційна різниці цих напружень. До того ж моделювання пояснює різке звуження петлі напруження - деформація при підвищеній температурі [14].

Визначимо питому механічну енергію матеріалу (рис.1), що дорівнює площі фігури, яка обмежена кривими в координатах напруження-деформація. Робота, затрачена на деформування по шляху кривій 5-1-2, оцінюється величиною: $W_2 = (\sigma_{12} - \sigma_{54}) \varepsilon_{\text{пр.}}^{\text{мар.}} / 2 + \sigma_{12} \varepsilon^{\text{ф.п.}}_{\text{пр.}}$, а на шляху 2-4-5: $W_1 = (\sigma_{12} - \sigma_{54}) \varepsilon_{\text{пр.}}^{\text{зв.}} / 2 + \sigma_{45} \varepsilon_{\text{ф.п.}}^{\text{мар.}}$. Корисна робота, що здійснюється за повний цикл деформування, визначається площею заштрихованої фігури у вигляді: $A_{\text{кор.}} = W_2 - W_1$, або з геометричних параметрів:

$$A_{\text{кор.}} = \frac{1}{2} (\sigma_{12} - \sigma_{54}) \varepsilon_{\text{пр.}}^{\text{мар.}} + \frac{1}{2} (\sigma_{12} - \sigma_{54}) \varepsilon_{\text{пр.}}^{\text{аус.}} + (\sigma_{12} - \sigma_{54}) (\varepsilon^{\text{ф.п.}}_{\text{зв.}} - \varepsilon_{\text{пр.}}^{\text{аус.}}).$$

Запропонована нами модельна діаграми деформування СПФ при різних термосилових впливах цілком збігається з ідеальною діаграмою деформування в циклі Карно для робочого тіла мартенситного двигуна [15].

Варто відмітити, що при різкому навантаженні (жорсткий режим) можливе деяке відхилення від прямолінійного плато і процес навантаження протікає з деяким коефіцієнтом зміцнення, що пов'язане з високою швидкістю деформації матеріалу (крива 0-6-7). Це зумовлено температурними змінами матеріалу, що пов'язані з теплотою перетворення (ΔH), оскільки в ході прямого перетворення температура зростає, а в ході зворотного – зменшується. Максимальне зміна температури визначається із співвідношення: $\delta T = \Delta H / c$, де c – питома теплоємність мартенситу для прямого або матриці при зворотному МП і може сягати $\sim 12^\circ\text{C}$ [5], а $\Delta\sigma$ на $1,9 \text{ кг/мм}^2$ (20 МПа). Найбільш затребуваними для широкого практичного застосування стають сплави Cu-Zn-Al з покращеними характеристиками непружних ефектів у порівнянні із сплавами Ni-Ti, а діапазон перетворення в Cu-Zn-Al ($0\div 150^\circ\text{C}$) знаходиться в температурному інтервалі використання Ni-Ti ($50\div 110^\circ\text{C}$) [2,14,16].

ВИСНОВКИ

В результаті обґрунтування непружних характеристик СПФ запропонована модель деформування СПФ при різних термосилових впливах. Відмічені технічні аспекти, які не сприяють, або погіршують роботу СПФ, усунення яких призведе до збільшення працездатності з більшим коефіцієнтом корисної дії. Покращення робочих характеристик СПФ безпосередньо пов'язане з технологією їх отримання та додатковими обробками, що призводить до збільшення їх собівартості. Максимальна корисна робота по деформуванню СПФ реалізується розтягом, який в більший мірі сприяє індукуванню мартенситної зворотної фази.

ЛІТЕРАТУРА

1. D. J. Hartl, D. C. Lagoudas Aerospace applications of shape memory alloys // *P I Mech Eng G-J Aer.* – 2007. – № 221 (G4). – P. 535-552.
2. К. Уорден Новые интеллектуальные материалы и конструкции. Свойства и применение
3. Чаевский М.И., Бледнова Ж.М., Будревич Д.Г. Способ соединения деталей, имеющих цилиндрическую поверхность сопряжения. Пат. №2001135004 (РФ), В23Р11/02, F16B4/00, 2003.
4. Тітенко А.М., Данилевич О.Г., Гурін В.Г. Запобіжний клапан прямої дії на основі матеріалу з ефектом пам'яті форми.// Патент на корисну модель 103952, 12.01.2016, бюл. № 1
5. J. Perkins, *Shape memory effects in alloys* (New York: Plenum Press: 1975).
6. Stoessel, D. A 1990 Adv. Mat. & Processes, Oct. 1990, 33.
7. Liu Y. and Yang H. // *Mater. Sci. Eng.* – 1999. – V. A260. – P. 240–245.
8. Е.Е. Тимофеева, Е.Ю. Панченко, Ю.И. Чумляков, А.И. Тагильцев Закономерности межмартенситных термоупругих превращений в [012]-монокристаллах ферромагнитных сплавов NiFeGa при деформации сжатием // *Изв. вузов. Физика.* Т. 57, № 9 2014, с.105-113
9. Baumgart F., Jorde J., Reiss H.-G. Memory-Legierungen - Eigenschaften, phanomenologische Theorie und Anwendungen // *Techn. Mitt. Krupp. Forshe.* 1076. **B.34.** H.1. s.1-16
10. Yu. I. Chumlyakov, I. V. Kireeva, E. Yu. Panchenko SHAPE MEMORY EFFECT AND SUPERELASTICITY IN Ti-Ni AND Fe-Ni-Co-Ti SINGLE CRYSTALS *Russian Physics Journal*, Vol. 46, No. 8, 2003, 811-823
11. Dadda J., Maier H.J. , Karaman I. , and Chumlyakov Y . // *Int. J. Mater. Res.* – 2010. – V. 101.– No. 12. – P. 1503–1513.
12. Anna Kosogor, Victor A. L'vov, Volodymyr A. Chernenko Hysteretic and anhysteretic tensile stress-strain behavior of Ni-Fe(Co)-Ga single crystal: Experiment and theory *Acta Materialia* 66 (2014) 79–85
13. Anna Kosogor, Nicolas J. Matsishin & Victor A. L'vov Modelling of hysteresis loops taken during the stress- and temperature-induced martensitic transformations *Phase Transitions*, 2013 Vol. 86, No. 8, 796–810
14. K. Otsuka and X. Ren, Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloy, *Prog. Mater. Sci.* 50 (2005), pp. 511–678.
15. Беляев С.П., Ермолаев В.А., Лихачев и др. Преобразование энергии в цикле Карно при мартенситном превращении // *Изв. вузов. Физика.* 1989. Вып. 2. С.91-94
16. Bolcich, J. C., Rapacioli R. Energy conversion using pseudoelastic CuZnAl alloys – a prototype heat engine. *J. phys. (fr.) ICOMAT-82*, 1982, **43** (12), 831-832.