

УДК 539.3

О.В. Дивдик, Н.С.Луцик

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТУ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

O.V. Dyvdyk, N. S. Lutsyk

MODELING SHAPE MEMORY ALLOYS OF FINITE ELEMENT METHOD

Сплав з пам'яттю форми (СПФ) – це металевий сплав, який «запам'ятовує» свою початкову форму. Після циклів навантаження і розвантаження СПФ може відновити свою (недеформівну) форму через теплові цикли. Ефект пам'яті форми базується на 3-D термомеханічній моделі для фазових перетворень, представлених в [1-3]. Ефект пам'яті форми проявляється в сплавах, що характеризуються двома фазовими перетвореннями, а саме вихідної мартенситної фази, де є температури M_s і M_f , що відповідають початку і закінченню мартенситного перетворення при низькій температурі і аустенітній фазі з температурами початку A_s і закінчення A_f фазового перетворення при високій температурі. Без навантаження при низькій температурі мартенсит перебуває у фазі двійникування, що після застосування механічного навантаження переходить у фазу переорієнтації і змінює свою макроскопічну структуру.

Характеристики механічних властивостей СПФ нікель-титанового сплаву Ni-Ti (Ni-55,8%, Ti-44,2%), які отримані експериментально подані у таблиці табл. 1 [4] та характеристики фази аустеніту для ефекту пам'яті форми (табл. 1) [5].

Таблиця 1. Фізико-механічні та характеристики ефекту пам'яті форми

Фізичні-механічні характеристики	
Модуль пружності аустеніту E_A	52700 МПа
Коефіцієнт Пуассона	0,36
Густина матеріалу	6,45 г/см ³
Характеристики ефекту пам'яті форми	
Матеріальний параметр, пов'язаний із зміцненням	500 МПа
Температура прямого фазового перетворення M_f	23°C
Температура зворотного фазового перетворення A_f	120 МПа
Межа пружності матеріалу	120 МПа
Параметр температурного масштабування	8,3 МПа/С
Максимальна деформація трансформації	0,07 мм/мм
Модуль пружності мартенситу E_M	45000 МПа

Моделювання Ni-Ti сплаву виконано методом скінчених елементів за допомогою прикладного програмного пакету Ansys Workbench [5]. Змодельований ефект пам'яті форми циліндричного зразка з нікель-титанового сплаву діаметром $d=1,5$ мм і довжиною $L=30$ мм під дією прикладеної сили. Зразок був жорстко закріплений в точці В з прикладеним навантаженням в точці А вздовж осі Х (рис. 1). Проведена дискретизація зразку скінченим елементом Solid186 (рис. 2). Загальна кількість скінчених елементів становить - 2276, вузлів – 459, розмір одного скінченого елемента становить – 0,6 мм.



Рисунок 1. Прикладена сила А і закріплення В



Рисунок 2. Скінченноелементна 3-D модель

Весь етап моделювання задавався в 2 кроки і 50 підкроками в одному кроці. Перший крок - прикладання сили до зразка $F = 9$ Н в точці А по осі Х в холодному стані при температурі 23°C . Другий крок – нагрівання зразка до температури 100°C з розвантаженням до 0°C . В результаті вигину зразка силою на 1 кроці отримана максимальна деформація зразка $0,0743$ мм/мм (рис. 3). Після нагрівання зразка на 2 кроці відбулось його відновлення до початкової недеформованої форми (рис. 4).

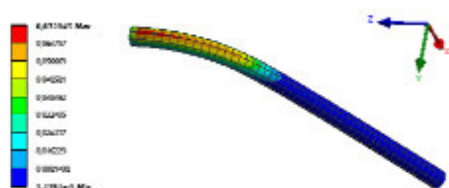


Рисунок 3. Деформована 3-D модель
 $T = 23^{\circ}\text{C}$, $F = 9$ Н

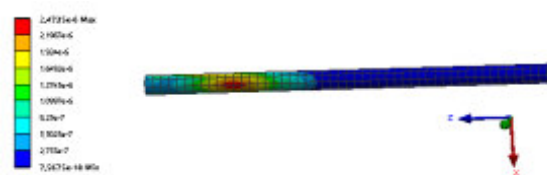


Рисунок 4. 3-D модель після зворотного фазового перетворення
 $T = 100^{\circ}\text{C}$, $F = 0$ Н

Отримані значення напружень від деформацій при нагріванні показані на рисунку 5. Залежність зміни деформації при нагріванні температурою $T = 100^{\circ}\text{C}$ показана на рисунку 6.

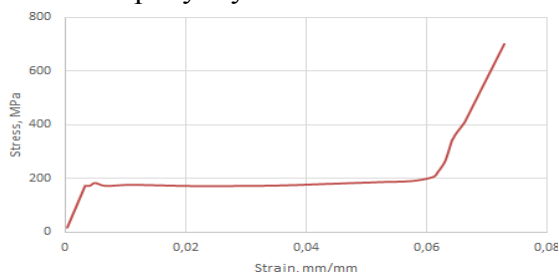


Рисунок 5. Залежність напруження від деформацій при 23°C

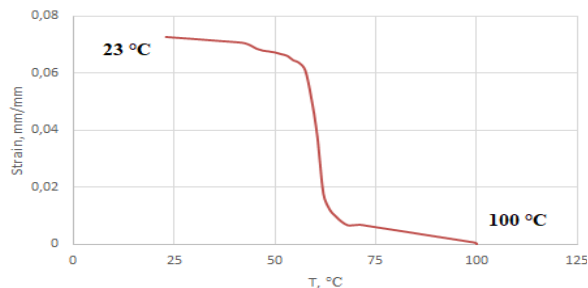


Рисунок 6. Залежність деформацій від температури при нагріванні

Література

1. Souza, A. C., E. N. Mamiya, N. Zouain. "Three-Dimensional Model for Solids Undergoing Stress-Induced Phase Transformations." *European Journal of Mechanics-A/Solids*. 17, 1998, pp. 789-806.
2. Auricchio, F., R. L. Taylor, J. Lubliner. "Shape-Memory Alloys: Macromodeling and Numerical Simulations of the Superelastic Behavior." *Computational Methods in Applied Mechanical Engineering*. 146, 1 1997, pp. 281-312.
3. Auricchio, F., L. Petrini. "Improvements and Algorithmical Considerations on a Recent Three-Dimensional Model Describing Stress-Induced Solid Phase Transformations." *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 55, 2005, pp. 1255-1284.
4. В. Ясній, Р. Юнга. Фазові перетворення та механічні властивості сплаву нітинол з пам'яттю форми // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. — 2018. №3. — С. 107–111.
5. ANSYS, 2013, SAS IP, Inc., Ansys Help System, Mechanical APDL.