

ЧИСЕЛЬНЕ МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХОЛОДНОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ОТВОРІВ ІЗ СПЛАВУ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ

О. В. Дивдик, П.В. Ясній

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Abstract. In this paper, the results of modeling of the cold expansion holes using a shape memory alloy tool are presented. The aluminum plate 40x40 mm with central hole 8 mm diameter and shape memory alloy cylindrical tool with 8,24 mm in diameter behavior were modeled using the Ansys Workbench. Distributions of normal residual stresses on the surface and inside the plate were studied.

Вступ. Функціональні матеріали використовуються в різних галузях техніки для вирішення широкого спектру завдань, завдяки їх унікальним функціональним властивостям, до яких належать і сплави з пам'яттю форми (СПФ). При цьому поведінка конструкції із СПФ залежать не тільки від температури, але і від виду напруженого-деформованого стану. Поведінка сплавів з пам'яттю форми обумовлена їх здатністю до реверсивної дифузійної фазової трансформації, відомої як мартенситне перетворення. СПФ, які характеризуються ефектом надпружності знайшли різноманітне застосування завдяки добрим демпфуючим властивостям та здатності після нагріву відновлювати початкову форму після деформації 6 - 10%.

Джерелом унікальної поведінки матеріалів СПФ є багатофазна кристалічна структура. Фази сплаву СПФ нікелю та титану відповідають їх кристалічній структурі. Аустенітна фаза - це кубічна кристалічна решітка, яка структурно жорстка і проявляється при більш високій температурі. Фаза мартенситу - це фаза, яка проявляється при більш низьких температурах і не менш жорстка ніж аустеніт (рис. 1). Мартенсит існує у двох фазах: фазі двійникування (1) і фазі переорієнтації (2) (рис. 2). СПФ можуть відтворювати односторонній і двосторонній ефект пам'яті форми. При односторонньому перетворенні після попереднього деформування при нагріванні мартенсит повертається в недеформований стан, а при двосторонньому сплав «пам'ятає» дві фази: аустенітну та мартенситну за різних температур [1].

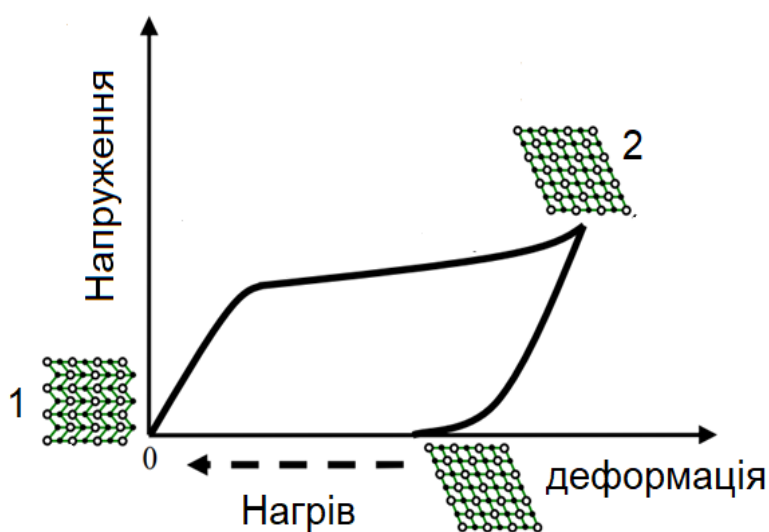


Рисунок 1. Мікроструктурні перетворення у мартенситній фазі:
1 – двійниковий мартенсит при деформації в холодному стані; 2 – переорієнтація мартенситу при розвантаженні

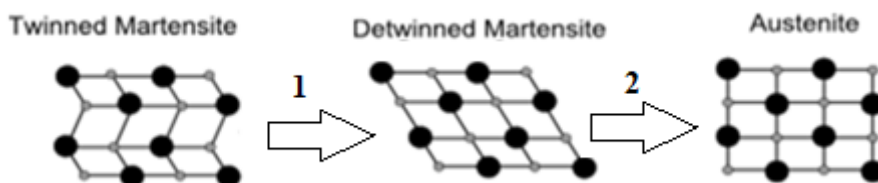


Рисунок 2. Кристалографічна сітка при односторонньому ефекту пам'яті форми:
1 – деформування; 2 – нагрівання

Вміст Ni істотно впливає на температури фазових перетворень T_{as} , T_{af} та T_{ms} , T_{mf} (рис. 3) [2].

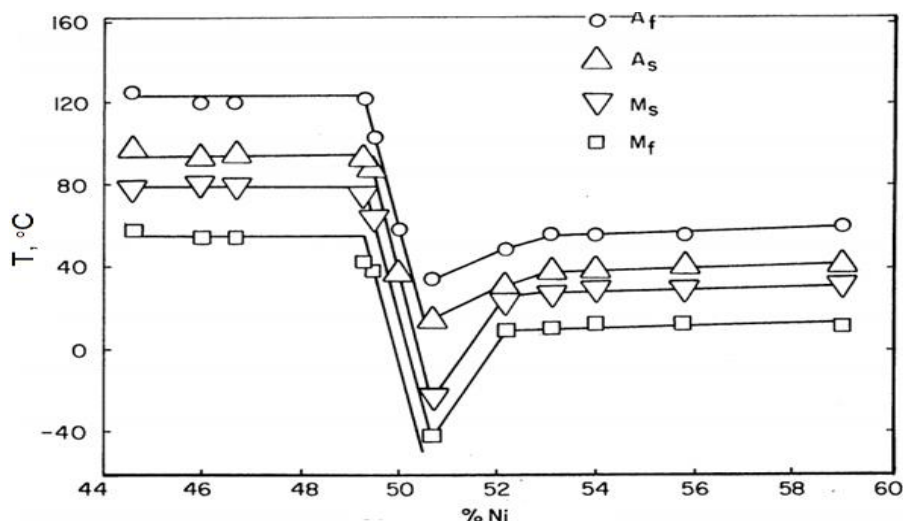


Рисунок 3. Вплив вмісту Ni в сплаві на температури прямих і зворотних фазових перетворень [2]

Методика досліджень. Методом скінчених елементів (СЕ) моделювали холодне пластичне деформування отворів інструментом із сплаву з пам'яттю форми за процедурою запропонованою авторами і детально описаною у праці [3]. Моделювання виконували в середовищі ANSYS Workbench [4-6]. Вхідними параметрами були пружні властивості (коефіцієнт Пуассона), модуль пружності, а також дійсні діаграми деформування. Дискретизовані геометричні 3-D моделі: пластини та робочого інструменту подано на рисунку 4а і 4б. Довжина робочого інструменту становить 12 мм, діаметр - 8,24 мм.

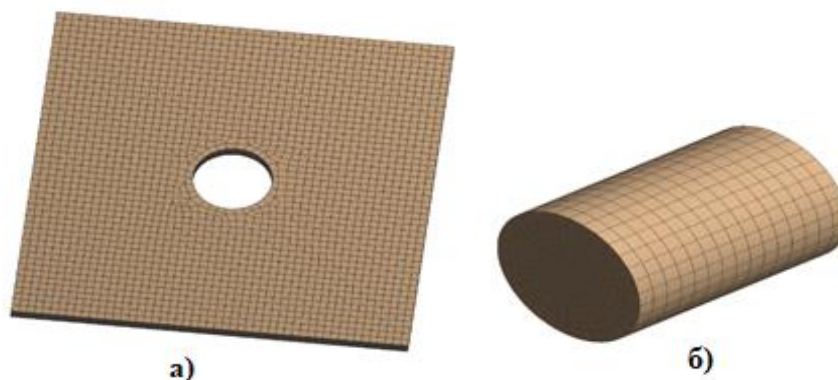


Рисунок 4. Дискретизована геометрична модель:
а) пластини б) робочого інструменту

Розглядали квадратну пластину зі сторонами 40 x 40 мм, товщиною $t = 6$ мм з отвором діаметром $d = 8$ мм із алюмінієвого сплаву Д16чТ. Діаграма деформування

сплаву Д16чТ за одновісного розтягу подана на рисунку 5. Фізико-механічні характеристики у таблиці 1. Механічні властивості за деформування розтягом сплаву Д16чТ при 20 °С: границя текучості $\sigma_{0,2} = 280$ МПа, границя міцності $\sigma_B = 430$ МПа.

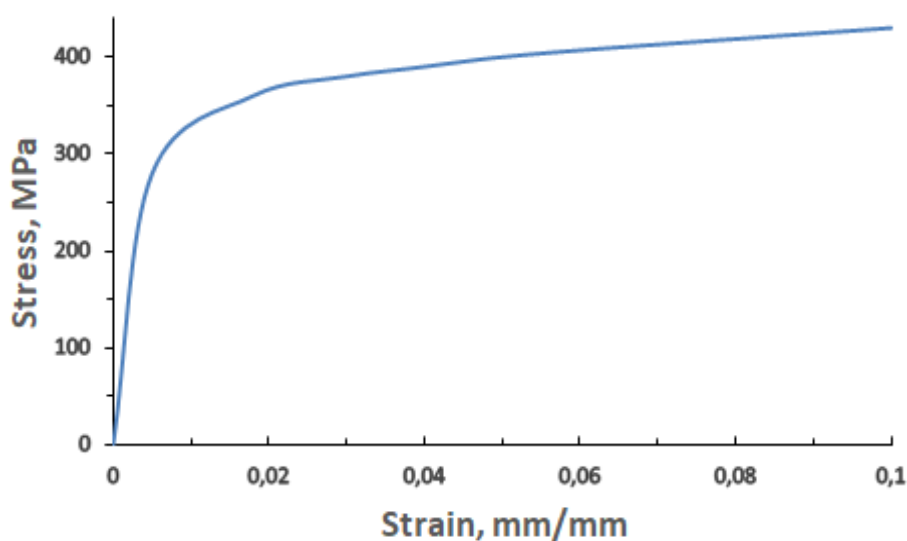


Рисунок 5. Діаграма розтягу алюмінієвого сплаву Д16чТ [7]

Таблиця 1. Фізико-механічні характеристики сплаву Ni-Ti з ефектом пам'яті форми і температури прямих і зворотних фазових перетворень [8, 9]

E_a – модуль пружності аустеніту, T=20°C	52700 МПа
E_m – модуль пружності мартенситу, T=20°C	45000 МПа
Коефіцієнт Пуассона	0,33
T_{as} – температура старту перетворення аустеніту	-60,5°C
T_{af} – температура завершення перетворення аустеніту	-38,7°C
T_{ms} – температура старту перетворення мартенситу	-69°C
T_{mf} – температура завершення перетворення мартенситу	-96°C

Інструмент із СПФ здеформований до розмірів, менших діаметра отвору пластини поміщують в отвір. При нагріванні інструмент розширюючись пластично деформує матеріал пластини в околі отвору. Після вилучення інструменту, в околі отвору формуються залишкові стискувальні напруження, які підвищують втону довговічність конструкції. Задання кроків до 3-D моделей виконувалось в такому порядку: 1-й крок – деформування розтягом, робочого інструменту за температури A_f – -38,7°C; 2-й крок – робочий інструмент розвантажують і поміщають у отвір пластини при температурі -38,7°C; 3-й крок – робочий інструмент нагрівають до температури M_f – 0°C в середині отвору; 4-й крок – робочий інструмент вилучають із отвору приклавши до нього навантаження. Для дискретизації моделей використано автоматичну генерацію сітки 20-вузловим скінченим елементом SOLID186. Найбільше значення кроку сітки становить – 0,8 мм, а найменше – 0,06 мм. Кількість елементів сітки в пластині – 19536, вузлів – 88486, в інструменті 3315 – елементів; та 14612 - вузлів.

Результати та їх обговорення. На рисунку 6 зображено розподіли нормальних залишкових напружень після вилучення інструменту із пластини при значеннях $Z = t$ (на поверхні отвору з сторони виходу інструменту), при $Z = t/2$ (в середині пластини) та при $Z = 0$ на поверхні отвору зі сторони протилежної до виходу інструменту. Напруження стиску в середині отвору досягають 414 МПа або в 1,47 вищі границі текучості алюмінієвого сплаву.

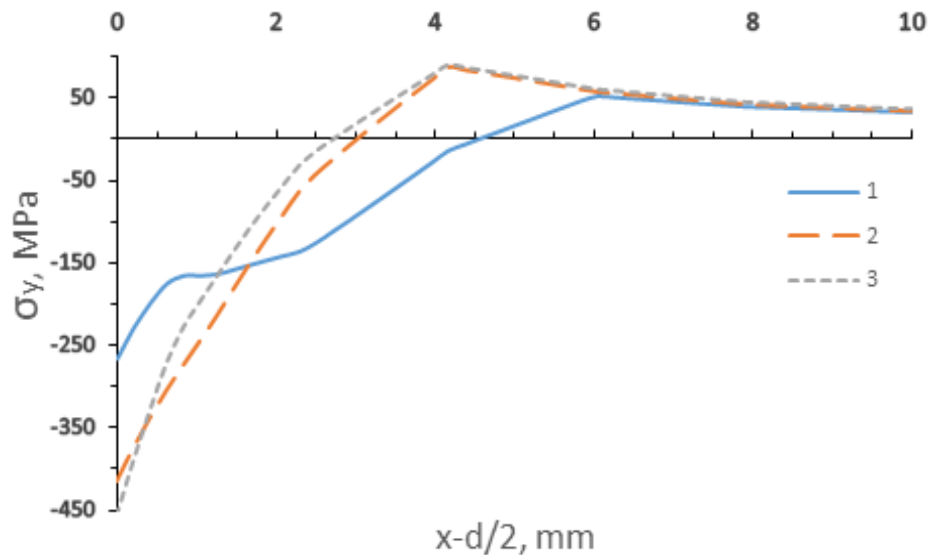


Рисунок 6. Розподіл нормальних залишкових стискувальних напружень в пластині вздовж осі Y при вилученні інструменту із пластини: 1 – при $Z = 0$; 2 – при $Z = t/2$; 3 – при $Z = t$

Висновок. Методом скінчених елементів змодельовали холодне пластичне деформування отвору в алюмінієвій пластині інструментом із сплаву з пам'яттю форми. Виявлено що, найбільші нормальні стискувальні напруження виникають в середині пластини та на поверхні отвору зі сторони виходу інструменту, а найменші значення на поверхні отвору зі сторони протилежної до виходу інструменту.

Література.

1. Qiang Pan. Damping Properties of Shape Memory Alloys, METAL 2008, Vol. 5, pp. 13–15.
2. Patent [US5265456A](#), classifications B23P9/025, Method of cold working holes using a shape memory alloy tool; Application filed by Grumman Aerospace Corp, Grumman Aerospace Corp. Application filed 1992.06.29, Publication 1993.11.30.
3. Ясній П., Дивдик О., Ясній В. Інструмент із сплаву з пам'яттю форми для зміцнення отворів в пластинах. Пат. 132422 Україна МПК В24В 39/00; опубл. 25.02.2019, бюл. № 4.
4. ANSYS, 2013, SAS IP, Inc., Ansys Help System, Mechanical APDL.
5. Дивдик О. В. Моделювання ефекту пам'яті форми методом скінчених елементів / О. В. Дивдик, Н. С. Луцик // Збірник тез доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 28-29 листопада 2018 року. — Т. : ТНТУ, 2018. — Том 1. — С. 25–26.
6. Дивдик О. В. Моделювання ефекту пам'яті форми методом скінчених елементів / Дивдик О. В. // Матеріали II Міжнародної студентської науково-технічної конференції „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“, 25-26 квітня 2019. — Т. : ТНТУ, 2019. — С. 156–157. — (Матеріалознавство, міцність матеріалів і конструкцій).
7. Glado S. Estimation of influence of burnishing holes on the durability of elements of transport aircraft wing - Manuscript Dissertation is submitted for the scientific degree of Candidate of Sciences (Engineering) sciences, in specialty 01.02.04, "Mechanics of deformable solids". Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2014.
8. Ясній, В. Фазові перетворення та механічні властивості сплаву нітинол з пам'яттю форми/ В. Ясній, Р. Юнга // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2018. – № 3. – С. 107 – 111.
9. Yasniy P. V., Dyvdyk O. V., Lutsyk N. S., Yasniy V. P. (2018) Modelling of mechanical behavior of shape memory alloys using finite elements method. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol. 91, no 3, pp. 7-15.