

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مکانیک

بررسی رفتار ترمومکانیکی سیم‌هایی از جنس آلیاژ حافظه‌دار

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
طراحی کاربردی

ایمان محققیان

اساتید راهنما
دکتر محمود سلیمی
دکتر محمود کدخدایی

کلیه حقوق مادی مرتبت بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق
موضوع این پایان نامه (رساله) متعلق به
دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تشر و قدردانی

پروردگار منان را سپاس می‌گوییم که در تمام مراحل زندگی همواره یار و یاور من بوده و لطف بیکران او در لحظه لحظه زندگی من جریان داشته است. از پدر و مادر عزیزم که مرا در آغوش مهر و محبت خود پروردانده و از هیچ فداکاری برای پیشرفت من دریغ ننموده‌اند و همچنین همسر مهربانم که در طول این پایان نامه مشوق و پشتیبان من بوده است، سپاسگزارم.

از اساتید گرامی دانشکده مکانیک به خصوص اساتید ارجمندم دکتر سلیمی و دکتر کدخدایی که همواره از راهنمایی این بزرگواران بهره‌جسته‌ام، کمال قدردانی و سپاس را دارم. در پایان از کلیه کسانی که مرا در این پایان-نامه یاری رساندند از جمله کلیه دوستانم، خانم مهندس صدیقی پور در آزمایشگاه فزیک الیاف دانشکده نساجی و هم‌چنین کلیه کارمندان محترم دانشکده مکانیک سپاسگزارم.

تقدیم به

پدر و مادر عزیز

و همسر مهربانم

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
هشت	فهرست مطالب
1	چکیده
	فصل اول: مقدمه
3	2-1 تاریخچه‌ی آلیاژهای حافظه‌دار
4	3-1 معرفی آلیاژهای حافظه‌دار
7	1-3-1 خصوصیات آلیاژهای حافظه‌دار
11	2-3-1 برخی دیگر از خصوصیات آلیاژهای حافظه‌دار
14	4-1 کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار
14	1-4-1 مصارف پزشکی
15	2-4-1 مصارف سازه‌ای
15	3-4-1 مصارف در صنعت هوافضا
15	4-4-1 استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار به عنوان عملگر
25	5-1 مروری بر مدل‌های ساختاری آلیاژهای حافظه‌دار
39	6-1 جبهه‌های تغییر فاز
42	7-1 اهداف و ساختار پایان‌نامه
	فصل دوم: مدل الکتروترمو مکانیکال
43	1-2 تئوری مدل
46	2-2 حالت الکتروترمال
47	1-2-2 حل عددی
49	2-2-2 نتایج
55	3-2 حالت ترمومکانیکال
61	4-2 حالت الکتروترمو مکانیکال
63	1-4-2 حالت تنش ثابت
71	2-4-2 حالت تنش متغیر (فتر جهت دار)
79	5-2 جمع‌بندی
	فصل سوم: اقدامات و نتایج آزمایشگاهی
80	1-3 تست‌های DSC
83	2-1-3 نتایج
94	2-3 ساخت اتاقک حرارتی برای تست‌های ترمومکانیکی
99	3-3 تست‌های ترمومکانیکی
100	1-3-3 بررسی مدول الاستیک

101	.....2-3-3 تست‌های نمونه‌ی BB (شبه‌الاستیک).
104	.....3-3-3 تست‌های نمونه‌ی B (حافظه‌دار).
107	.....4-3-3 بدست آوردن پارامترهای مدل
110	.....5-3-3 وابستگی رفتار آلیاژ به نرخ کرنش
111	.....4-3 جمع‌بندی
	فصل چهارم: نتیجه‌گیری
113	.....1-4 - جمع‌بندی کلی
114	.....2-4 - پیشنهادات
114	.....1-2-4 تمرکز تنش
116	.....2-2-4 اضافه کردن ترم گرادیان کرنش به مدل
120	.....3-4 پیشنهادات برای ادامه‌ی کار تجربی

مراجع

فهرست شکل‌ها

- 4 شکل 1-1- تعدادی از آلیاژهای حافظه‌دار و زمان کشف آن‌ها
- 5 شکل 2-1- سمت راست-بالا ساختار BCC فاز آستنیت، تصویر سمت چپ-بالا ساختار رامبوهدرال فاز R و تصویر میانی ساختار مونوکلینیک فاز مارتنزیت می‌باشد
- 6 شکل 3-1- استحاله‌ی مارتنزیتی در حالت بدون تنش و صرفاً حرارتی
- 7 شکل 4-1- نحوه‌ی جهت‌گیری و رینت‌های مارتنزیت در جهت اعمال بار در حین اعمال بار و ساختار ماده بعد از باربرداری و گرم کردن مجدد
- 8 شکل 5-1- خاصیت حافظه‌داری آلیاژهای حافظه‌دار
- 9 شکل 6-1- خاصیت شبه‌الاستیک آلیاژهای حافظه‌دار
- 10 شکل 7-1- رفتار مکانیکی خاصیت‌های حافظه‌داری و شبه‌الاستیک آلیاژهای حافظه‌دار
- 11 شکل 8-1- رفتار مکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار در دماهای متفاوت
- 12 شکل 9-1- مقایسه‌ی رفتار مکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار با فولاد زنگ‌نزن و بافت‌های بدن
- 15 شکل 10-1- نحوه‌ی مجهز نمودن پل‌های ضد زلزله به آلیاژهای حافظه‌دار
- 16 شکل 11-1- مقایسه‌ی نسبت توان به وزن برای عملگرهای مختلف
- 20 شکل 12-1- روش‌های مختلف حرارت‌دادن برای تحریک در عملگرهای حافظه‌دار
- 21 شکل 13-1- آنتن ماهواره ساخته شده از مواد حافظه‌دار
- 21 شکل 14-1- آنتن ماهواره از جنس آلیاژ حافظه‌دار
- 22 شکل 15-1- بازوی متحرک به کمک تحریک‌المان حافظه‌دار برای باز کردن درپوش شیشه‌ای مریخ پیمای ناسا
- 22 شکل 16-1- لولای حافظه‌دار که با عبور دادن جریان الکتریکی از درون سیم باز می‌شود
- 23 شکل 17-1- عملگر حرکت خطی با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار
- 23 شکل 18-1- عملگر خطی حافظه‌دار
- 24 شکل 19-1- عملگر حافظه‌دار با تحریک سیم‌های حافظه‌دار دیسک‌ها به هم نزدیک می‌شوند
- 24 شکل 20-1- آندوسکوپ نایتینولی
- 30 شکل 21-1- نمودار تنش بحرانی بر حسب دما برای مدل لیانگ
- 33 شکل 22-1- نمودار تنش بحرانی بر حسب دما برای مدل برینسون
- شکل 23-1- جبهه‌های تغییر فاز ونحوه‌ی حرکت آن‌ها برای دو نرخ 1×10^{-4} سمت چپ و 1×10^{-3} سمت راست در دمای 25 درجه‌ی سانتیگراد (شکل‌های پایین مربوط به عکس‌های حرارتی و شکل‌های بالا مربوط به عکس- برداری با پوشش شکننده است
- 40 شکل 24-1- بررسی همزمان نمودار تنش-زمان و جبهه‌های ایجاد شده در طول نوار حافظه‌دار در دو نرخ 1×10^{-4} (a) و 1×10^{-3} (b)
- 41 شکل 1-2- شمایی از مسأله‌ی شرط مرزی 1 بعدی
- 47 شکل 2-2- نمایی از ارتباط معادلات با هم ونحوه‌ی حل آن‌ها در نرم افزار
- 48 شکل 3-2- بررسی تعداد گره‌ها در پاسخ نهایی
- 49

50	شکل 4-2- مقایسه‌ی نتایج مدل حاضر با تحقیق انجام شده توسط آمالراج و همکارانش برای پروفیل دما در زمان 10 ثانیه برای نواحی نزدیک انتها.....
50	شکل 5-2- توزیع دمای سیم در نواحی مختلف و تغییرات آن با زمان.....
51	شکل 6-2- حرکت مرز مشترک بین فاز مارتنزیت و مخلوط مارتنزیت و آستنیت.....
52	شکل 7-2- مقدار میانگین کسر حجمی مارتنزیت در طول (a) حالت گرم شدن و (b) حالت خنک شدن.....
53	شکل 8-2- وابستگی زمان گرم و سرد شدن و زمان یک سیکل کامل به شعاع سیم.....
55	شکل 9-2- تنش‌های استحاله در نرخ کرنش‌های مختلف برای دو محیط آب و هوا.....
59	شکل 10-2- مقایسه‌ی بین نتایج حل عددی حاضر با نتایج کدخدایی و همکارانش (برای مشخصات جدول 2-2)
59	شکل 11-2- مقایسه‌ی تغییرات دما با زمان برای روش‌های مختلف محاسبه‌ی h
60	شکل 12-2- الف مقایسه‌ی نمودارهای تنش-کرنش برای دو حالت ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ثابت و متغیر و (ب) تغییرات دمای سیم در طول زمان برای یک سیکل بارگذاری و باربرداری.....
61	شکل 13-2- حرکت در فضای تنش-دما برای بارگذاری و باربرداری.....
61	شکل 14-2- سه نوع نحوه‌ی ایجاد نیروی جهت‌دار برای برگرداندن جسم به حالت اولیه.....
64	شکل 15-2- نحوه‌ی عملکرد عملگر حافظه‌دار در تنش ثابت با گرم و سرد کردن.....
66	شکل 16-2- نواحی تقسیم شده‌ی فضای تنش بحرانی-دما.....
68	شکل 17-2- هیستریزیس کرنش-دما در حین سیکل گرم و سرد کردن.....
69	شکل 18-2- نتایج آزمایشگاهی برای سیکل کرنش-دما.....
70	شکل 19-2- تغییرات دما برای یک سیکل گرم و سرد شدن برای سه حالت ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد
70	شکل 20-2- اختلاف در زمان گرم کردن برای سه حالت ضریب جابه‌جایی و سطح تنش‌ها مختلف.....
71	شکل 21-2- پاسخ زمانی برای تنش 400 مگاپاسکال و $\dot{\epsilon}=30000$ برای دو حالت ضریب انتقال حرارت جابه-جایی آزاد ثابت و متغیر.....
72	شکل 22-2- نمایی از یک عملگر جهت‌دار.....
74	شکل 23-2- نمایی از نحوه‌ی حل و ارتباط معادلات در حالت الکتروترمو مکانیکال با تنش متغیر.....
77	شکل 24-2- پاسخ زمانی عملگر در مدل حاضر با لحاظ ترم مکانیکی و بدون آن و مقایسه با نتایج ملافی و همکارانش.....
78	شکل 25-2- نحوه‌ی تغییرات تنش و دما در فضای تنش بحرانی-دمای معادلات برینسون.....
78	شکل 26-2- پاسخ زمانی دو نوع عملگر با تنش ثابت و عملگر جهت‌دار برای شرایط مشابه.....
81	شکل 3-1- تعیین دماهای استحاله با به وسیله‌ی یک سیکل رفت و برگشت حرارتی در تنش ثابت.....
82	شکل 3-2- شمایی از تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب دما برای ماده تحت استحاله‌ی مارتنزیتی.....
83	شکل 3-3- روش برخورد دادن خطوط برای بدست آوردن دماهای استحاله.....
86	شکل 4-3- نمودار حاصل از تست DSC بر روی نمونه‌ی B (حافظه‌دار) در هسا.....
86	شکل 5-3- نمودار حاصل از تست DSC بر روی نمونه‌ی BB (شبه‌الاستیک) در هسا.....
87	شکل 6-3- نمودار حاصل از تست DSC برای خنک کردن بر روی نمونه‌ی BB (شبه‌الاستیک) در دانشکده‌ی شیمی دانشگاه اصفهان.....

- شکل 3-7- نمودار حاصل از تست DSC برای گرم کردن بر روی نمونه BB (شبه الاستیک) در دانشکده‌ی شیمی دانشگاه اصفهان.....
- 87
- شکل 3-8- دیاگرام DSC با تکرار برای نمونه B (حافظه‌دار) در حالت رفت (سرد کردن).....
- 89
- شکل 3-9- دیاگرام DSC با تکرار برای نمونه B (حافظه‌دار) در حالت برگشت (گرم کردن).....
- 89
- شکل 3-10- دماهای آغاز و پایان تبدیل به آستنیت برای نمونه B (حافظه‌دار) در حالت رفت (سرد کردن)
- 90
- شکل 3-11- دماهای آغاز و پایان تبدیل به آستنیت به رامبوهدرال و رامبوهدرال به مارتنزیت برای نمونه B (حافظه‌دار) در حالت برگشت (گرم کردن).....
- 90
- شکل 3-12- میزان انرژی مبادله شده در حین استحاله برای نمونه B (حافظه‌دار) در حالت رفت (سرد کردن)
- 91
- شکل 3-13- میزان انرژی مبادله شده در حین استحاله برای نمونه B (حافظه‌دار) در حالت برگشت (گرم کردن)
- 91
- شکل 3-14- دماهای آغاز و پایان استحاله در حالت رفت و برگشت برای نمونه BB (شبه الاستیک).....
- 93
- شکل 3-15- میزان انرژی مبادله شده در حین استحاله برای نمونه BB (شبه الاستیک) برای حالت رفت و برگشت.....
- 93
- شکل 3-16- نمایی از فضای کاری و فضای پشتی اتاقک حرارتی.....
- 94
- شکل 3-17- نقشه‌ی انفجاری اتاقک حرارتی ساخته شده.....
- 95
- شکل 3-18- نمایی از کنترلر NX9.....
- 96
- شکل 3-19- نحوه‌ی ارتباط بین کنترلر و اتاقک حرارتی.....
- 97
- شکل 3-20- نمایی از نحوه‌ی تنظیم دما در دمای مورد نظر.....
- 97
- شکل 3-21- میله‌های کششی ساخته شده و پین‌های مربوط به آن.....
- 98
- شکل 3-22- نمایی از اتاقک حرارتی ساخته شده و تجهیزات داخلی آن.....
- 99
- شکل 3-23- مقایسه‌ی نتایج حاصل از extensometer با نتایج کلی بدست آمده از دستگاه تست کشش.....
- 100
- شکل 3-24- تصویر تجهیز ساخته شده و دستگاه در حین انجام تست.....
- 102
- شکل 3-25- تست‌های مکانیکی در دماهای مختلف و با کمترین نرخ کرنش ممکن $1/86 \times 10^{-4}$ برای نمونه‌ی BB (شبه الاستیک).....
- 103
- شکل 3-26- مقایسه‌ی دو تست در شرایط مشابه دمای محیط $31/2$ درجه‌ی سانتیگراد.....
- 104
- شکل 3-27- تست‌های مکانیکی در دماهای مختلف و با کمترین نرخ کرنش ممکن به میزان $1/86 \times 10^{-4}$ برای نمونه‌ی B (حافظه‌دار).....
- 105
- شکل 3-28- تست‌های مکانیکی در دماهای مختلف و با کمترین نرخ کرنش ممکن به میزان $1/86 \times 10^{-4}$ برای نمونه‌ی B (حافظه‌دار).....
- 106
- شکل 3-29- نحوه‌ی تغییرات ماده در حین بارگذاری برای نمونه B.....
- 107
- شکل 3-30- نتایج 4 تنش آغاز و پایان استحاله در حالت رفت و برگشت برای 5 دما بالاتر از A_f و عبور بهترین خط‌ها از این نقاط برای نمونه‌ی BB.....
- 108

- 109 شکل 3-31- تنش های بدست آمده برای دماهای مختلف برای نمونه ی B.
- 109 شکل 3-32- تنش های استحاله در بار گذاری و باربرداری در حضور فاز واسطه ی رامبوهدرال.
- 110 شکل 3-33- بهترین خط های عبوری از نقاط در دمای بالاتر از A_f برای نمونه ی B.
- 111 شکل 3-34- نمودار تنش- کرنش در 4 نرخ متفاوت در دمای 31 درجه ی سانتیگراد.
- 115 شکل 4-1- مدل کردن تست کشش ساده و بدست آوردن ناحیه ی تمرکز تنش در نزدیک فک ها.
- 116 شکل 4-2- تغییرات تنش در طول سیم و ناحیه ی نزدیک گریپر.
- شکل 4-3- دو نمونه از کاربرد گرادیان های درجه ی بالا شکل بالا: هموار سازی ناهمگنی ایجاد شده در میدان
کرنش. شکل پایین: ایجاد ناهمگنی در میدان کرنش.
- 117 شکل 4-4- نحوه ی تغییرات در طول و حرکت جبهه ی تغییر فاز برای کشش سیم در دمای ثابت.
- 119 شکل 4-5- نمایی از مجموعه ی پیشنهادی برای تست پاسخ زمانی عملگرهای تنش ثابت.
- 121

چکیده

ویژگی‌های منحصر به فرد مواد هوشمند و به خصوص آلیاژهای حافظه‌دار باعث شده است تا در دهه‌های اخیر توجه خاصی به این مواد معطوف گشته و استفاده از این مواد به عنوان راه حل مناسبی برای بسیاری از مسائل مهندسی مطرح شود. هم‌اکنون استفاده از این مواد به طور چشم‌گیری در زمینه‌های مختلف از جمله مهندسی پزشکی، هوافضا، مهندسی عمران و رباتیک رو به افزایش می‌باشد. یکی از مهم‌ترین کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار استفاده از آن‌ها به عنوان عملگر می‌باشد. برای پیش‌بینی رفتار عملگرهای حافظه‌دار که عمدتاً از سیم ساخته می‌شوند، به ارائه‌ی مدلی نیاز است که بتواند پیچیدگی‌های موجود در رفتار این مواد را به خوبی مدل نماید.

در قسمت نخست این پایان‌نامه مدل الکتروترمو مکانیکال در یک بعد برای استفاده در عملگرهای حافظه‌دار پیشنهاد می‌گردد. این مدل که در چارچوب مکانیک محیط‌های پیوسته استخراج گشته قادر است علاوه بر خصوصیات حافظه‌داری، شبه‌الاستیسیته و وابستگی به نرخ کرنش، تغییرات در طول را نیز مدل نماید. ایراداتی که در مدل‌های قبلی برای مسیرهای ترمومکانیکی پیچیده وجود داشت، در این مدل برطرف گردیده است. این مدل برای 4 حالت متداول در عملگرهای حافظه‌دار مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه پارامترهای موثر بر پاسخ زمانی عملگرهای حافظه‌دار در حالت کلی الکتروترمو مکانیکال بررسی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که نحوه‌ی مدل کردن انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد تأثیر بسزایی در نتایج نهایی دارد و ثابت در نظر گرفتن ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی فرض صحیحی نمی‌باشد. هم‌چنین با نوشتن معادلات در چارچوب مکانیک محیط‌های پیوسته به ترم‌هایی برمی‌خوریم که در مدل‌هایی که با استفاده از بالانس انرژی ارائه می‌شوند در نظر گرفته نشده‌اند و در پاسخ زمانی بسیار موثر می‌باشد.

قسمت دوم این پایان‌نامه به اقدامات و نتایج آزمایشگاهی اختصاص دارد. بر خلاف فلزات معمولی، به دلیل پیچیدگی‌های موجود در رفتار آلیاژ-های حافظه‌دار، پیش‌بینی این رفتار به پارامترهای مدل زیادی نیاز دارد و تعیین این پارامترها مستلزم انجام آزمایشات زیاد و دقیق می‌باشد. در ابتدا به بررسی نحوه‌ی استخراج دماهای استحاله برای دو نمونه‌ی نیکل-تیتانیوم و ملاحظات لازم برای انجام این تست‌ها پرداخته می‌شود. سپس برای انجام تست‌های ترمومکانیکی اتافک حرارتی ساخته شد. این اتافک قابل نصب بر روی انواع دستگاه‌های تست کشش ایستاده بوده و به کمک آن می‌توان تست‌های مکانیکی را در دماهای مختلف انجام داد. با انجام تست‌های ترمومکانیکی پارامترهای مورد نیاز برای مدل برای هر دو نمونه‌ی نیکل-تیتانیوم استخراج گردید.

کلمات کلیدی: آلیاژهای حافظه‌دار، مدل الکتروترمو مکانیکال، عملگرهای حافظه‌دار، تست‌های DSC، اتافک حرارتی، تست‌های ترمومکانیکال

فصل اول

مقدمه

1-1- تعریف کلی

در صد سال اخیر پیشرفت‌های زیادی در زمینه‌ی فهم و درک رفتار مواد معمولی نظیر فولاد، بتن و غیره انجام شده است و بشر با استفاده از این مواد توانسته است پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه‌های مختلف علم و تکنولوژی انجام دهد. با این وجود با سرعت گرفتن این پیشرفت‌ها در دهه‌های اخیر نیاز به طراحی و ساخت سیستم‌های پیشرفته با قابلیت‌های خاص بیش از پیش احساس می‌شود؛ در ضمن این که مواد معمولی به تنهایی قادر به پاسخ‌گویی به این نیازها نمی‌باشند. با گسترش تحقیقات در زمینه‌ی علم مواد و وجود دستگاه‌ها و امکانات پیشرفته امکان شناسایی و ساخت مواد جدید با قابلیت‌های بالا فراهم شده است. موادی که در عین سبک و کم‌حجم بودن قابلیت انجام وظایف مورد نظر را به خوبی دارا می‌باشند و می‌توانند در بسیاری از صنایع ظریف جایگزین سیستم‌های قدیمی شوند. دسته‌ای از این مواد، مواد هوشمند می‌باشند. به طور کلی، تعریف مشخص و استاندارد برای مواد هوشمند وجود ندارد و واژه‌ی ماده‌ی هوشمند معمولاً به موادی اطلاق می‌شود که یک یا چند خصوصیت آن ماده در پاسخ به یک محرک خارجی می‌تواند تغییر یابد. مواد هوشمند را می‌توان به سه دسته‌ی کلی طبقه‌بندی نمود:

1. آلیاژهای حافظه‌دار (SMA)¹: که انرژی حرارتی را به مکانیکی یا بالعکس تبدیل می‌کنند.

¹ Shape Memory Alloy

2. پیزو الکتريک‌ها (PZT)¹: موادی هستند که چنانچه تحت تنش قرار گیرند در آن‌ها ولتاژ تولید می‌شود و عکس این پدیده هم می‌تواند رخ دهد؛ یعنی می‌توانند انرژی مکانیکی را به انرژی الکتريکی تبدیل نمایند [1].

3. حافظه‌دارهای مغناطیسی (MSM)²: انواعی از فرومگنتیک‌ها³ هستند که چنانچه در میدان‌های مغناطیسی قرار گیرند تغییرات زیادی در شکل و اندازه‌ی آن‌ها ایجاد می‌شود [2].

در این پایان‌نامه با توجه به تمرکز بر دسته‌ی اول از این مواد، تنها به معرفی آلیاژهای حافظه‌دار پرداخته می‌شود.

1-2- تاریخچه‌ی آلیاژهای حافظه‌دار

تلاش‌های انجام شده برای درک رفتار آلیاژهای حافظه‌دار تنها به سال‌های اخیر بر می‌گردد. اولین نتایج گزارش شده مربوط به سال 1932 است [3 و 4]. در این سال دانشمندی سوئدی به نام "اورلاندر"⁴ در طی تحقیقات خود بر روی آلیاژ AuCd دریافت که این آلیاژ می‌تواند شکل اولیه‌ی خود را به وسیله‌ی گرم کردن بازیابی کند. در سال 1938 "گرینگر و مورادیان"⁵ رفتار وابسته به دمایی از آلیاژ CuZn گزارش کردند [5]. کمی بعد در سال 1949 "کراجامور و خاندروس"⁶ [6] و به دنبال آن در سال 1951 "چانگ و رید"⁷ [7] رفتار ترموالاستیک را از آلیاژ AuCd مشاهده نمودند.

در اوایل دهه‌ی 1960 "بولر"⁸ و همکارانش [8] در آزمایشگاه نیروی دریایی آمریکا رفتار حافظه‌داری آلیاژ نیکل-تیتانیوم NiTi را زمانی که نوار خم شده‌ی این آلیاژ در اثر حرارت یک pipe lighter به شکل اولیه‌ی اش برگشت کشف کردند. آن‌ها این آلیاژ را نایتینول⁹ نام گذاری کردند و از آن زمان تحقیقات عمده‌ای به منظور درک رفتار این دسته از آلیاژهای حافظه‌دار انجام گرفته است. تاکنون تعداد زیادی آلیاژ شناخته شده که از خود رفتار حافظه‌داری نشان می‌دهند. تعدادی از این آلیاژها و زمان کشف آن‌ها در شکل 1-1 آمده است.

در این میان تنها آن‌هایی که از نظر هزینه به صرفه باشند و بتوانند مقدار قابل توجهی از کرنش را بازیابی کنند مثل پلی کریستال‌ها یا آن‌هایی که حد قابل قبولی از نیرو را به خاطر تغییر شکل‌شان ایجاد می‌کنند از نظر تجاری مورد توجه می‌باشند. تعدادی از این آلیاژها شامل آلیاژهای نیکل-تیتانیوم و بعضی از آلیاژها با پایه‌ی مس مثل CuZnAl و CuAlNi می‌باشند. در میان تمامی آلیاژهای شناخته شده آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیوم مفیدترین و مناسب‌ترین آلیاژ برای کاربردهای مهندسی است. خصوصیات مثل چقرمگی بالا، جابه‌جایی قابل برگشت بیشتر، مقاومت سایشی عالی (قابل مقایسه با سری 300 فولادهای زنگ‌نزن)، دماهای استحاله‌ی پایدار، سازگاری بالا با بدن و قابلیت

¹ Piezoelectric

² Magnetic Shape Memory

³ Ferromagnetic

⁴ Ölander

⁵ Greninger & Mooradian

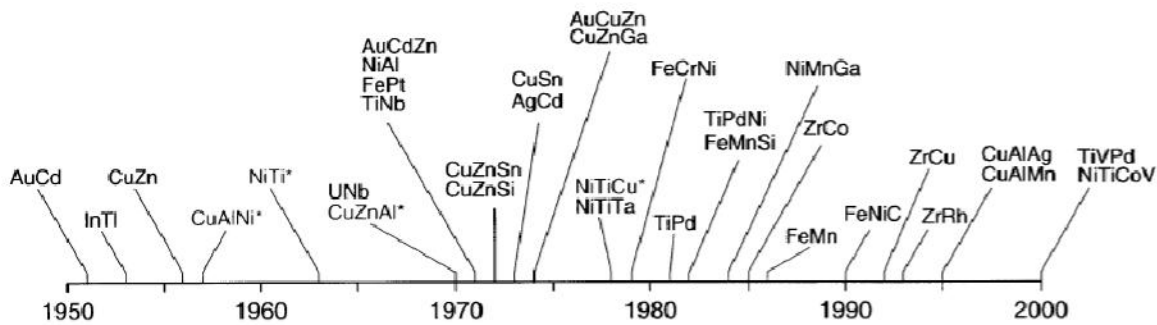
⁶ Kurdjumov & Khandros

⁷ Chang & Read

⁸ Buehler

⁹ Nitinol (Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory)

حرارت دادن الکتریکی برای برگشت دادن به شکل اصلی اش باعث شده است تا این آلیاژ از برتری قابل ملاحظه‌ای نسبت به دیگر آلیاژهای حافظه‌دار برخوردار باشد و سهم عمده‌ای از تحقیقات انجام گرفته روی آلیاژهای حافظه‌دار به این نوع آلیاژ معطوف می‌گردد [9].



شکل 1-1- تعدادی از آلیاژهای حافظه‌دار و زمان کشف آن‌ها [10]

آلیاژ نیکل-تیتانیوم یک ترکیب دوتایی بین فلزی با نسبت اتمی یکسان از آلیاژهای نیکل و تیتانیوم است (این آلیاژ دارای نسبت اتمی تقریباً 50-50 می‌باشد). این ترکیب خصوصیات مفید ترکیبات بین فلزی شامل گستره‌ی حلالیت متوسط برای نیکل و تیتانیوم اضافی و دیگر ترکیبات فلزی و همچنین چقرمگی قابل قیاس با آلیاژهای معمولی را دارا می‌باشد. حلالیت این آلیاژ سبب می‌شود که بتواند با دیگر ترکیبات فلزی ترکیب شود و بدین ترتیب خصوصیات مکانیکی و دماهای استحاله‌ی آن تغییر کند. به عنوان مثال اضافه کردن تا 1 درصد نیکل اضافی به آلیاژ می‌تواند به شدت دماهای استحاله‌ی آن را تغییر دهد و استحکام تسلیم حالت آستنیت را افزایش دهد. اضافه کردن آهن و کروم به آلیاژ نیز دماهای استحاله را تغییر می‌دهد. با تغییر در درصد اتمی نیکل و تیتانیوم و همچنین اضافه کردن دیگر عناصر می‌توان دماهای استحاله را بین 100 تا 200- تغییر داد. اضافه کردن مس باعث کاهش هیستریزس و پایین آوردن تنش تغییر شکل می‌شود [9].

3-1- معرفی آلیاژهای حافظه‌دار

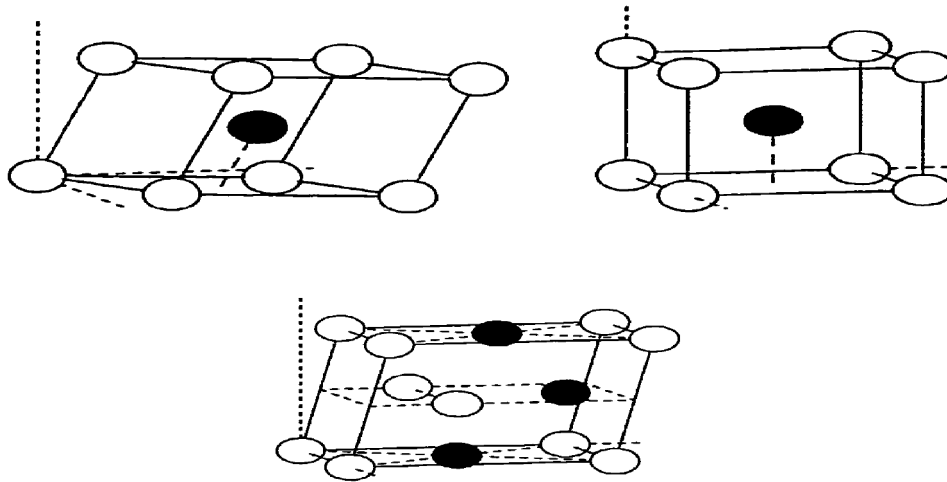
عامل اصلی ایجاد کننده‌ی رفتارهای منحصر به فرد در این آلیاژها وقوع تبدیل فاز مارتنزیتی در این مواد است. تغییر فاز مارتنزیتی یک تغییر فاز حالت جامد است که دارای مشخصات ویژه‌ای می‌باشد. از جمله‌ی این ویژگی‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

1. این تبدیل فاز شامل یک تغییر شکل غیر الاستیک¹ شبکه‌ی کریستالی است که بدون دخالت هیچ گونه فرآیند پخش‌ی اتفاق می‌افتد. این استحاله‌ی فازی از حرکت دسته‌جمعی اتم‌ها در فواصلی کمتر از پارامترهای شبکه اتفاق می‌افتد.
2. عدم وجود فرآیندهای پخش‌ی، استحاله‌ی مارتنزیتی را تقریباً آنی می‌سازد.

¹ Inelastic

3. این استحاله به دلیل عدم وجود فرآیندهای پختی برگشت پذیر می باشد.

این استحاله بین دو فاز جامد رخ می دهد. در دماهای بالا آلیاژ دارای یک ساختار کریستالی منظم با تقارن بالا و عمدتاً به صورت BCC¹ است که به این ساختار کریستالی آستنیت² می گویند. با پایین آمدن دما این آلیاژها به ساختارهای کریستالی با تقارن کمتر تبدیل می شوند که مارتنزیت³ نام دارد. آرایش های مونوکلینیک⁴ فاز مارتنزیت در آلیاژ نیکل-تیتانیوم نمونه ای از این ساختارهای کریستالی با تقارن کم می باشد. البته ممکن است درحین تبدیل این دو فاز به یکدیگر، فازهای واسطه مثل فاز R با ساختار رامبوهدرال⁵ هم تشکیل شود. نمایی از این سه ساختار در شکل 1-2 آمده است.



شکل 1-2- سمت راست-بالا ساختار BCC فاز آستنیت، تصویر سمت چپ-بالا ساختار رامبوهدرال فاز R و تصویر میانی ساختار مونوکلینیک فاز مارتنزیت می باشد

نکته ای که باید به آن توجه داشت این است که مارتنزیت اشاره شده در بالا با مارتنزیت فولاد متفاوت است. اگر چه هر دو ناشی از تبدیل فاز مارتنزیتی می باشند ولی تفاوت های کاملاً مشخصی با هم دارند. مارتنزیت فولاد به دلیل وجود اتم های نیتروژن و کربن که موانعی برای حرکت نابجایی ها محسوب می شوند، سخت است ولی مارتنزیت های غیر آهنی به طور کلی نرم تر از فاز آستنیت خود هستند [11].

تقارن کم در فاز مارتنزیت به معنای وجود جهت گیری های مختلف در این فاز می باشد که به آن ورینت⁶ می گویند. ورینت های مختلف دارای جهت گیری های محلی مختلفی هستند. زمانی که آلیاژ حافظه دار بدون حضور تنش سرد می شود، استحاله ی مارتنزیتی آغاز گشته و ماده از فاز آستنیت به مارتنزیت تبدیل می گردد. در این حالت نحوه ی آرایش ورینت های مختلف به نحوی است که دارای بهترین حالت از نظر انرژی باشد. این حالت آرایش مارتنزیت را

¹ Body Centered Cubic

² Austenite

³ Martensite

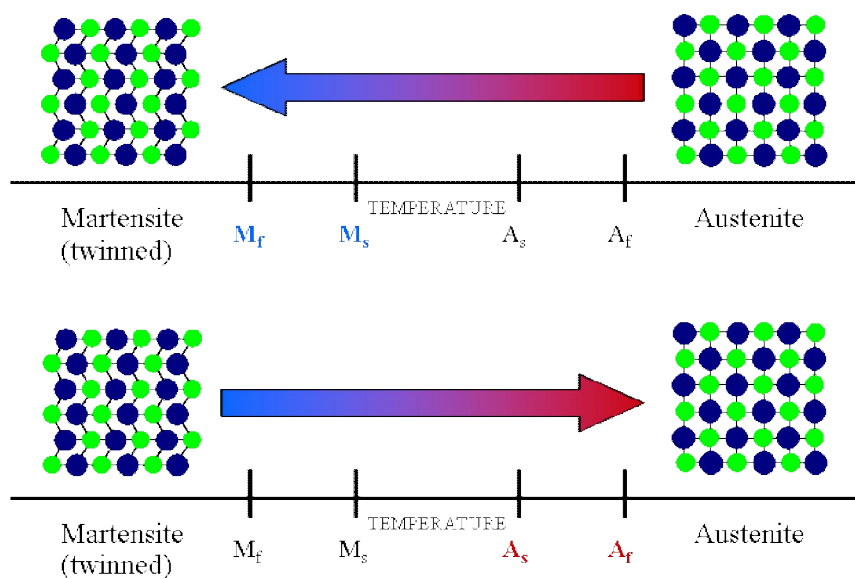
⁴ Monoclinic

⁵ Rhombohedral

⁶ Variant

مارتنزیت دوقلویی¹ یا مارتنزیت ناشی از حرارت² می‌نامند. (برای اطلاعات بیشتر در مورد تغییرات کریستالوگرافیکی به مرجع [12] مراجعه شود). این نوع تغییر فاز، کرنش‌های ماکروسکوپی بسیار کوچک و قابل اغماض ایجاد می‌کند [13]. شکل 1-3 این تغییر فاز را با جزئیات بیشتری نشان می‌دهد. در این شکل برگشت‌پذیری استحاله‌ی مارتنزیتی برای حالت بدون تنش نمایش داده شده است. همان‌طوری که در شکل مشخص است 4 دمای مهم برای این دسته از آلیاژها وجود دارد. زمانی که ماده از حالت آستنیت سرد می‌شود با رسیدن به دمای M_s ماده شروع به تغییر فاز کرده و با رسیدن به دمای M_f استحاله تمام شده و ماده کاملاً در فاز مارتنزیت قرار دارد. با گرم کردن مارتنزیت و رسیدن به دمای A_s استحاله معکوس آغاز می‌شود و با رسیدن به دمای A_f کاملاً به صورت آستنیت تبدیل می‌شود.

لازم به ذکر است که در این شکل A_s بزرگتر از M_s فرض شده در حالی که برخی از مواد این شرط را نداشته و A_s کوچکتر از M_s دارند. اما در تمامی مطالعاتی که به طور عمومی بر روی آلیاژهای حافظه‌دار متمرکز شده دمای A_s بزرگتر از M_s در نظر گرفته می‌شود. موادی با این ویژگی را آلیاژهای نوع اول³ می‌نامند [14]. روش‌های مختلفی برای بدست آوردن این دماهای استحاله وجود دارد که متداول‌ترین آن‌ها روش DSC است مشخصات این روش و دیگر روش‌ها در فصل 3 با جزئیات بیشتر آورده شده است.



شکل 1-3- استحاله‌ی مارتنزیتی در حالت بدون تنش و صرفاً حرارتی

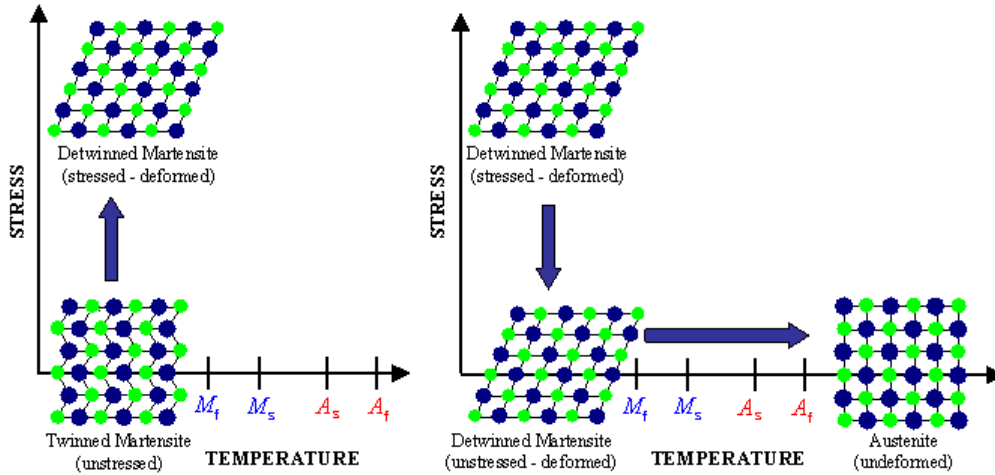
چنانچه مارتنزیت تنها در اثر کاهش دما از آستنیت بدست آید ساختاری همانند آن چه در شکل 1-3 نشان داده شده دارد؛ اما همواره فاز مارتنزیت به اینصورت وجود ندارد. به عنوان نمونه چنانچه در دمای کمتر از M_f مارتنزیت تحت

¹ Twinned Martensite

² Temperature-induced

³Type I

اعمال تنش قرار گیرد مطابق شکل 4-1 ساختار تغییر فرم یافته جدیدی به دست می‌آورد که آرایش اجزای آن متفاوت از ساختار قبلی می‌باشد.



شکل 4-1- نحوه‌ی جهت گیری ورینت‌های مارتنزیت در جهت اعمال بار در حین اعمال بار و ساختار ماده بعد از باربرداری و گرم کردن مجدد

در این ساختار اعمال تنش در یک راستا سبب می‌شود تا ورینت‌های مارتنزیت، همانند دو قطبی‌ها زمانی که در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، در یک راستا مرتب شوند. به این ساختار مارتنزیت، مارتنزیت غیردوقلو¹ یا مارتنزیت تنش دیده² می‌گویند مارتنزیت غیر دوقلو را همچنین می‌توان از وارد کردن تنش به آستنیت همان طوری که در شکل 4-1 آمده است نیز بدست آورد. کرنش ماکروسکوپی که در این حالت قابل ملاحظه بوده و می‌توان در این حالت بین 3 تا 8 درصد کرنش را بازیابی نمود [15].

1-3-1- خصوصیات آلیاژهای حافظه‌دار

این آلیاژها دارای دو خصوصیت بارز می‌باشند؛ خاصیت حافظه‌داری SME³ و خاصیت شبه الاستیک PE⁴ (البته در بعضی مراجع به نام سوپرالاستیک نیز شناخته می‌شود).

1. خاصیت حافظه‌داری که نام این دسته از آلیاژها از آن گرفته شده است به این معنی است که اگر این آلیاژها در حالت مارتنزیت دچار تغییر شکل شوند می‌توان با حرارت دادن آن‌ها را به شکل اولیه‌اشان در حالت آستنیت، بازگرداند. این خاصیت در دو شکل 1-5 نمایش داده شده‌اند. همان طوری که در شکل 1-5 (a) مشخص است ماده در حالت A در دمای بالا و در حالت آستنیت کامل قرار دارد. با خنک شدن (حالت B) به آرامی فاز مارتنزیت (البته از نوع دوقلو) در آن ایجاد می‌شود به نحوی که در این حالت ترکیبی از هر دو فاز آستنیت و مارتنزیت در ماده وجود دارد. با سرد شدن ماده (حالت C) مارتنزیت دوقلو در کل جسم

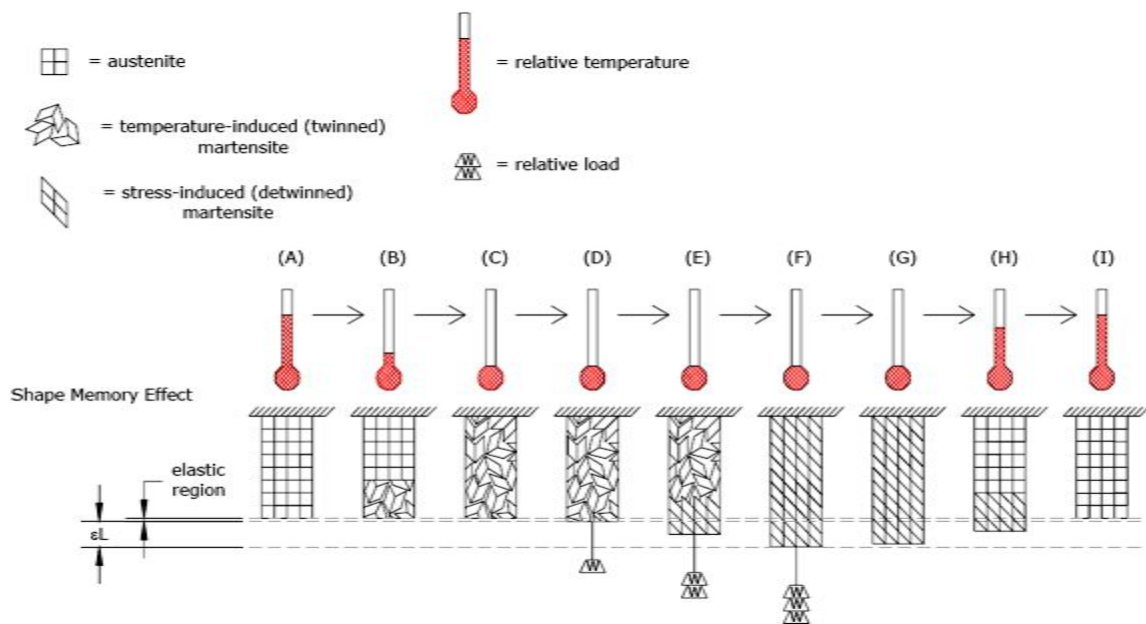
¹ Detwinned Martensite

² Stress Induced Martensite

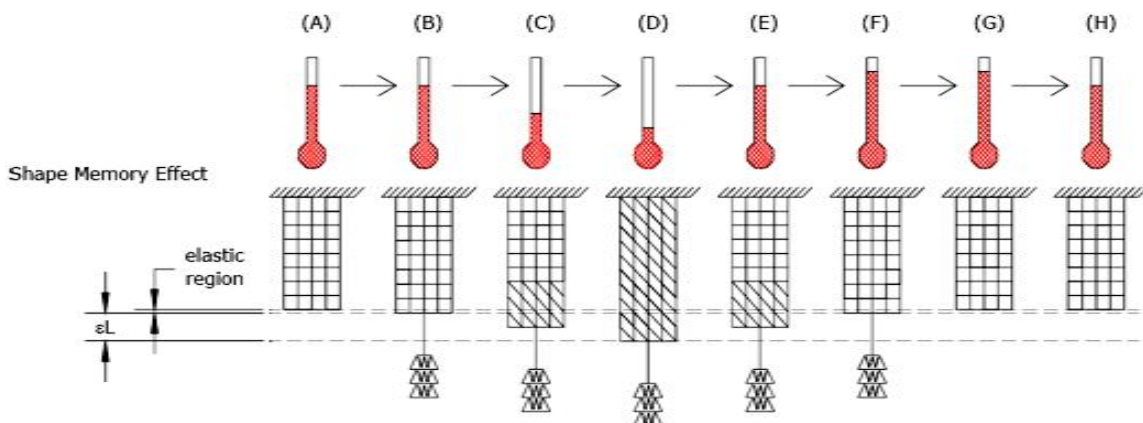
³ Shape Memory Effect

⁴ Pseudoelasticity

ایجاد می‌شود. حال اگر در همین دما شروع به اعمال تنش به ماده نمایم (حالت D-F) و رینت‌ها در جهت اعمال بار منظم شده و کرنش ماکروسکوپی که به مراتب بیش از مقدار الاستیک است در ماده ایجاد می‌کنند. با گرم کردن مجدد ماده مارتنزیت‌های غیر دوقلو به آستنیت تبدیل شده و کرنش‌های ایجاد شده بازیابی می‌شود. شکل 5-1 (b) خاصیت حافظه‌داری را در حالت دیگری نشان می‌دهد. در این حالت آستنیت موجود در حالت A بارگذاری می‌شود (حالت B). با خنک شدن ماده، دمای آن به حدی می‌رسد که تنش اعمالی در حالت B کافی بوده و ماده وارد فاز مارتنزیت می‌شود (حالت C و D). با گرم کردن مجدد ماده کرنش‌ها بازیابی شده و ماده به شکل اولیه‌اش می‌رسد.



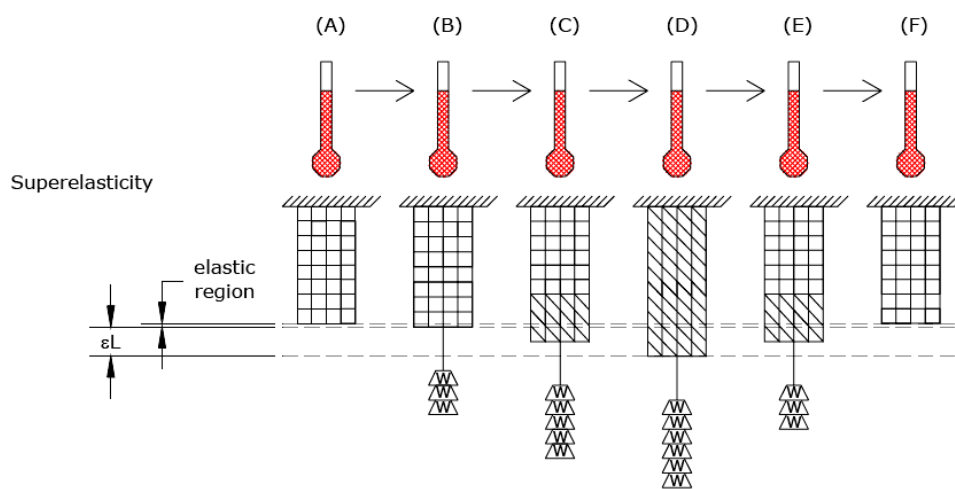
(a)



(b)

شکل 5-1- خاصیت حافظه‌داری آلیاژهای حافظه‌دار [16]

2. خاصیت شبه الاستیک به قابلیت تحمل کرنش‌های زیاد و بازیابی این کرنش‌ها با باربرداری می‌گویند. جزئیات این خصیصه در شکل 1-6 آمده است. همان طوری که در این شکل مشخص است ماده در طول مراحل در دمای ثابت قرار دارد. ماده از حالت A که آستنیت کامل است بارگذاری شده (مرحله B)، ولیکن تنش ایجاد شده در اثر این بار به اندازه‌ای نیست که بتواند ماده را وارد فاز مارتنزیت نماید. با زیادتر کردن این تنش در مراحل C و D تنش به میزان کافی افزایش یافته و تغییر شکل‌های زیاد در اثر استحاله در ماده ایجاد می‌شود. با کم کردن تنش ماده به حالت آستنیت اولیه که در این دما حالت پایدارتری دارد بر می‌گردد.



شکل 1-6- خاصیت شبه الاستیک آلیاژهای حافظه‌دار [16]

برای بهتر بیان کردن این دو رفتار و مشاهده رفتار مکانیکی این دو خاصیت، ترکیب این دو رفتار در شکل 1-7 آورده شده است. ماده در حالت (0) در دمای زیر M_f و در فاز مارتنزیت است و هیچ گونه تنشی به آن اعمال نمی‌شود. با اعمال تنش، کریستال‌ها در راستای اعمال بار مرتب شده و مارتنزیت از حالت دوقلو به حالت غیردوقلو (حالت 1) تغییر می‌کند. زمانی که بار برداشته می‌شود به دلیل آن که در دماهای پایین، مارتنزیت غیردوقلو پایدارتر از حالت دوقلو می‌باشد مارتنزیت آرایش خود را حفظ کرده و فقط کریستال‌ها به صورت الاستیک باربرداری می‌شوند بنابراین مقداری کرنش در آن باقی می‌ماند (حالت 2). در فاصله‌ی 2 تا 3 ماده در حال مارتنزیت گرم می‌شود و با رسیدن به دمای M_s ماده شروع به تغییر فاز کرده کرنش‌ها آزاد شده و ماده شکل اولیه‌ی خود را بازیابی می‌کند (3 تا 4) که این بیان کننده‌ی خاصیت حافظه‌داری آلیاژهای حافظه‌دار می‌باشد. از موقعیت 5 که ماده در دمای بالاتر از A_f و کاملاً در حالت آستنیت قرار دارد، دوباره شروع به بارگذاری می‌شود. در فاصله‌ی 6 تا 7 ماده در تنش تقریباً ثابت متحمل کرنش زیادی می‌شود و با رسیدن به موقعیت 7 کاملاً به حالت مارتنزیت غیردوقلو تبدیل می‌شود. در فاصله‌ی 6 تا 7 ترکیبی از هر دو فاز آستنیت و مارتنزیت تنش دیده وجود دارد. زمانی که باربرداری از موقعیت 7 شروع می‌شود، در ابتدا ماده به صورت الاستیک و در فاز مارتنزیت باربرداری شده و با رسیدن به حالت 8 و تنش