

به نام خدا



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

مطالعه‌ی نظری و تجربی رفتار فنرهای حافظه‌دار

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

بهنام حیدری دهویی

استاد راهنما

دکتر محمود کدخدایی



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک آقای بهنام حیدری دهویی

تحت عنوان

مطالعه‌ی نظری و تجربی رفتار فنرهای حافظه‌دار

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۰/۳۰ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب قرار گرفت:

دکتر محمود کدخدایی

۱- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر فتح‌اله کریم‌زاده

۲- استاد مشاور پایان نامه

دکتر محمد مشایخی

۳- استاد داور

دکتر رضا جعفری ندوشن

۴- استاد داور

دکتر محمدرضا سلیم‌پور

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

تشر و قدردانی

با سپاس از استاد ارجمندم، جناب آقای دکتر محمود کدخدایی، که بدون لطف و راهنمایی‌های ایشان، و صبر و حوصله‌ای که به خرج دادند، این پروژه به پایان نمی‌رسید.

و آقای دکتر فتح‌اله کریم‌زاده، که حضورشان در مقام استاد و مشاور، سبب دلگرمی من برای ادامه راه بود.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان
است.

به پدر و مادر عزیزم

که انگیزه کسب علم و معرفت و تلاش برای فرادهای زیباتر را فرارویم قرار دادند و اندیشیدن
به فرادهای متعالی را در ذهنم بارور ساختند و ساعت‌های دشوار زندگی‌ام را در سایبان آرام
قنوت‌شان به استراحت نشستم.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	هشت
فهرست شکل ها	۵۵
فصل اول: مقدمه	۵۵
فصل دوم: اقدامات و نتایج آزمایشگاهی	یازده
فصل سوم: مدل سازی فنرهای حافظه دار	دوازده
فصل چهارم: نتیجه گیری	سیزده
فهرست جداول	چهارده
فصل اول: مقدمه	چهارده
فصل دوم: اقدامات و نتایج آزمایشگاهی	چهارده
فصل سوم: مدل سازی فنرهای حافظه دار	پانزده
چکیده	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED
فصل اول: مقدمه	
۱-۱- معرفی آلیاژهای حافظه دار	۲
۲-۱- مروری بر مدل های ساختاری آلیاژهای حافظه دار	۷
۱-۲-۱- مدل های ماکروسکوپی	۸
۳-۱- کاربردهای فنرهای حافظه دار	۱۸
۱-۳-۱- کاربرد فنرهای حافظه دار در پزشکی	۱۹
۲-۳-۱- کاربرد فنرهای حافظه دار در صنایع هوایی	۲۲
۳-۳-۱- کاربرد فنرهای حافظه دار در صنایع خودروسازی	۲۳
۱-۳-۳-۱- عملگرهای حرارتی	۲۳
۲-۳-۳-۱- عملگرهای الکتریکی	۲۶
۴-۳-۱- کاربرد فنرهای حافظه دار در مهندسی عمران	۳۰
۴-۱- تحقیقات انجام شده در زمینه ی ساخت فنرهای حافظه دار	۳۱
۵-۱- تحقیقات انجام شده در زمینه ی مدل سازی فنرهای حافظه دار	۳۹
۶-۱- اهداف و ساختار پایان نامه	۴۲
فصل دوم: اقدامات و نتایج آزمایشگاهی	
۱-۲- مقدمه	۴۴
۲-۲- فرآیند تثبیت شکل برای ساخت فنر و چالش های پیش رو	۴۴

۵۱.....	۳-۲-تست های DSC
۵۳.....	۳-۲-۱-نتایج
۷۰.....	۴-۲-تست های ترمومکانیکی
۸۲.....	۵-۲-نتیجه گیری

فصل سوم: مدل سازی فنر حافظه دار

۸۳.....	۳-۱-مقدمه
۸۳.....	۳-۲-مروری بر مدل سازی های انجام شده در زمینه ی فنرهای حافظه دار
۸۴.....	۳-۲-۱-مدل تاناکا و توبوشی
۸۹.....	۳-۲-۲-مدل لیانگک و همکارانش
۹۱.....	۳-۲-۳-مدل توی و همکارانش
۹۳.....	۳-۲-۴-مدل سوی و همکارانش
۹۶.....	۳-۲-۵-مدل میرزایی فر و همکارانش
۹۸.....	۳-۳-تئوری مدل ارائه شده در این تحقیق
۹۸.....	۳-۳-۱-معادلات ساختاری آلیاژهای حافظه دار تحت پیچش
۹۹.....	۳-۳-۲-روابط استاندارد فنر
۱۰۷.....	۳-۳-۳-نتایج
۱۱۷.....	۳-۴-نتیجه گیری

فصل چهارم: نتیجه گیری

۱۱۹.....	۴-۱-جمع بندی کلی
۱۲۱.....	۴-۲-پیشنهادات
۱۲۱.....	۴-۲-۱-توسعه ی مدل ارائه شده با استفاده از روابط موجود برای جابجایی بزرگ
۱۲۲.....	۴-۲-۲-استفاده از فنرهای حافظه دار در سیستم تعلیق خودرو
۱۲۳.....	۴-۲-۳-بررسی رفتار فنرهای مارپیچ حافظه دار تحت خستگی
۱۲۴.....	۴-۲-۴-بررسی رفتار دوسویه فنرهای مارپیچ حافظه دار
۱۲۶.....	مراجع

فصل اول: مقدمه

- شکل ۱-۱ نحوه‌ی تغییر ساختار بلوری فازها در اثر اعمال حرارت به یک آلیاژ حافظه‌دار [۵]..... ۴
- شکل ۱-۲ نحوه تغییر فاز مارتنزیت در اثر تنش [۵]..... ۵
- شکل ۱-۳ نمایش دو نوع مارتنزیت ناشی از تنش در بارگذاری یک بعدی [۵]..... ۶
- شکل ۱-۴ نمایش چگونگی ایجاد خاصیت حافظه‌داری [۵]..... ۶
- شکل ۱-۵ نمایش خاصیت سوپرالاستیک آلیاژهای حافظه‌دار [۵]..... ۷
- شکل ۱-۶ نمودار تنش بحرانی بر حسب دما برای مدل «لیانگ» [۷]..... ۱۲
- شکل ۱-۷ نمودار تنش بحرانی بر حسب دما برای مدل «برینسون» [۷]..... ۱۴
- شکل ۱-۸ ویژگی سوپرالاستیک آلیاژهای حافظه‌دار..... ۱۹
- شکل ۱-۹ مقایسه‌ی کیفی رفتار مواد مختلف استفاده شده در ارتودنسی [۸]..... ۲۰
- شکل ۱-۱۰ دستگاه آندوسکوپی کپسولی با استفاده از فنرهای حافظه‌دار به عنوان عملگر [۹]..... ۲۱
- شکل ۱-۱۱ مجموعه‌ی پوسته پایینی و عمگرهای حافظه‌دار [۱۰]..... ۲۲
- شکل ۱-۱۲ عمگرهای حرارتی حافظه‌دار..... ۲۴
- شکل ۱-۱۳ گستره دمای انتقال آلیاژهای Ni-Ti تجاری در دسترس [۱۱]..... ۲۵
- شکل ۱-۱۴ عملکرد سوپاپ‌های حرارتی [۱۱]..... ۲۵
- شکل ۱-۱۵ نمایی از مقطع عرضی سوپاپ حرارتی [۱۱]..... ۲۶
- شکل ۱-۱۶ محرک‌های الکتریکی حافظه‌دار [۱۱]..... ۲۷
- شکل ۱-۱۷ محدوده دمای کاری برای خودروها و دمای انتقال برای آلیاژهای حافظه‌دار Ni-Ti [۱۱]..... ۲۸
- شکل ۱-۱۸ لامپ مه شکن با محرک الکتریکی حافظه‌دار [۱۱]..... ۲۸
- شکل ۱-۱۹ برف پاک کن با استفاده از فنر حافظه‌دار [۱۱]..... ۲۹
- شکل ۱-۲۰ مکانیزم قفل در با استفاده از فنرهای حافظه‌دار [۱۱]..... ۲۹
- شکل ۱-۲۱ سیم ساخته شده از نایتینول، [۱۷]..... ۳۲
- شکل ۱-۲۲ اثر دمای آنیل کردن بر روی گرمای نهان استحاله در حین گرم کردن نمونه‌ی نایتینول [۱۹]..... ۳۳
- شکل ۱-۲۳ اثر دما و زمان عملیات حرارتی بر Ap:..... ۳۴
- شکل ۱-۲۴ اثر دمای آنیل کردن بر روی دماهای استحاله [۲۲]..... ۳۵
- شکل ۱-۲۵ نمودار کشش نایتینول در دمای اتاق برای نمونه‌های آنیل شده در دماهای مختلف: [۲۲]..... ۳۷

شکل ۱-۲۶ فرآیند تولید یک فنر ساخته شده از شمش آلیاژ حافظه‌دار [۲۳]. ۳۸.....

شکل ۱-۲۷ طرح اولیه از عمگر خطی آلیاژ حافظه‌دار- فولاد ضد زنگ [۲۴]. ۳۹.....

شکل ۱-۲۸ حداکثر طول فنر در فاز آستنیت بر حسب سیکل کاری [۲۴]. ۳۹.....

فصل دوم: اقدامات و نتایج آزمایشگاهی

شکل ۲-۱ نمونه‌ی سیم نایتینول ۴۶.....

شکل ۲-۲ نمونه‌ی فنر حافظه‌دار با اجزای ثابت کننده که داخل فویل استیل پیچانده شده است. ۴۶.....

شکل ۲-۳ کوره‌ی لوله‌ای تحت گاز آرگون. ۴۷.....

شکل ۲-۴ (a) استنت در آنورسیم آئورت سینه‌ای، (b) یک واحد از استنت، (c) و (d) ابعاد مورد انتظار از واحد

استنت [۲۱]. ۴۹.....

شکل ۲-۵ شکل فنر حافظه‌دار SMA1. ۵۰.....

شکل ۲-۶ دماهای آغاز و پایان استحاله‌ی مارتنزیت به آستنیت برای سیم SME (نمونه‌ی اولیه) [۷]. ۵۴.....

شکل ۲-۷ دماهای آغاز و پایان استحاله‌ی آستنیت به رامبوهدرال و رامبوهدرال به مارتنزیت برای سیم SME (نمونه

اولیه) [۷]. ۵۵.....

شکل ۲-۸ میزان انرژی مبادله شده برای سیم SME (نمونه اولیه) [۷]. ۵۵.....

شکل ۲-۹ میزان انرژی مبادله شده برای سیم SME (نمونه اولیه) [۷]. ۵۶.....

شکل ۲-۱۰ دماهای آغاز و پایان استحاله در حالت رفت و برگشت برای سیم PE (نمونه اولیه) [۷]. ۵۷.....

شکل ۲-۱۱ میزان انرژی مبادله شده برای سیم PE (نمونه اولیه) [۷]. ۵۷.....

شکل ۲-۱۲ دماهای آغاز و پایان استحاله‌ی مارتنزیت به آستنیت برای فنر SMA1. ۵۹.....

شکل ۲-۱۳ دماهای آغاز و پایان استحاله‌ی آستنیت به رامبوهدرال و رامبوهدرال به مارتنزیت برای فنر SMA1. ۵۹.....

شکل ۲-۱۴ پیچ با قطر ۹ میلی‌متر و گام ۵ میلی‌متر که سیم SME به دور آن پیچانده شده است. ۶۰.....

شکل ۲-۱۵ فنر SMA2 که دارای گام ۴ میلی‌متر و قطر ۸.۳ میلی‌متر می‌باشد. ۶۱.....

شکل ۲-۱۶ دماهای آغاز و پایان استحاله و میزان انرژی مبادله شده در حالت رفت و برگشت برای فنر SMA2. ۶۲.....

شکل ۲-۱۷ دماهای آغاز و پایان استحاله و میزان انرژی مبادله شده در حالت رفت و برگشت برای فنر SMA3. ۶۴.....

شکل ۲-۱۸ دماهای آغاز و پایان استحاله در حالت رفت و برگشت برای فنر SMA4. ۶۵.....

شکل ۲-۱۹ دماهای آغاز و پایان استحاله در حالت رفت و برگشت برای فنر SMA5. ۶۶.....

شکل ۲-۲۰ دماهای آغاز و پایان استحاله در حالت رفت و برگشت برای فنر SMA6. ۶۶.....

شکل ۲-۲۱ اثر دمای عملیات حرارتی بر دماهای استحاله. ۶۷.....

شکل ۲-۲۲ اثر گام فنر بر دماهای استحاله برای فنرهای ساخته شده از سیم SME. ۶۸.....

- شکل ۲-۲۳ اثر گام فنر بر دماهای استحاله برای فنرهای ساخته شده از سیم PE ۶۸
- شکل ۲-۲۴ اثر فرآیند تثبیت شکل بر دمای قله و دره در حالت رفت و برگشت استحاله ۶۹
- شکل ۲-۲۵ اثر فرآیند تثبیت شکل بر دمای قله و دره در حالت رفت و برگشت استحاله ۷۰
- شکل ۲-۲۶ تست کشش در دمای مختلف با نرخ کرنش $4 - 1.86 \times 10$ برای نمونه SME [v] ۷۱
- شکل ۲-۲۷ تست کشش در دمای مختلف با نرخ کرنش $4 - 1.86 \times 10$ برای نمونه SME [v] ۷۲
- شکل ۲-۲۸ تست کشش در دمای مختلف با نرخ کرنش $4 - 1.86 \times 10$ برای نمونه PE [v] ۷۳
- شکل ۲-۲۹ سازوکار مورد استفاده برای جلوگیری از خم شدگی فنر در حین تست فشار ۷۵
- شکل ۲-۳۰ تست فشار فنر SMA2 که دو سر فنر سنگ زده شده است ۷۶
- شکل ۲-۳۱ تست فشار بر روی فنر SMA4 در ۵ سیکل ۷۷
- شکل ۲-۳۲ تست فشار بر روی فنرهای SMA2 و SMA4 ۷۹
- شکل ۲-۳۳ تست فشار بر روی فنرهای SMA2 و SMA5 ۸۰
- شکل ۲-۳۴ تست فشار بر روی فنر SMA2 در دماهای ۲۹۱/۱۵ K و ۲۹۳/۱۵ K ۸۰
- شکل ۲-۳۵ تست فشار بر روی فنر SMA6 ۸۱
- شکل ۲-۳۶ تست فشار بر روی فنر SMA4 در سه سیکل و در دمای 80°C ۸۲

فصل سوم: مدل سازی فنرهای حافظه دار

- شکل ۳-۱ توزیع تنش و کرنش پیشگی، زمانی که ناحیه استحاله به $r = rb$ می رسد [۲۹] ۸۷
- شکل ۳-۲ نمودار نیرو-جابجایی در شرایط دما ثابت [۲۹] ۸۸
- شکل ۳-۳ المان تیر تیموشینکو خطی مورد استفاده در مدل سازی اجرا محدودی «توی» و همکارانش [۳۱] ۹۲
- شکل ۳-۴ رفتار ترمومکانیکی فنرهای حافظه دار بر اساس فرضیات سوی و همکارانش [۳۳] ۹۵
- شکل ۳-۵ فنر ماریپج ۹۹
- شکل ۳-۶ مقطع عرضی فنر ماریپج ۱۰۰
- شکل ۳-۷ مقطع عرضی سیم یک فنر ماریپج حافظه دار در حین بارگذاری و باربرداری ۱۰۱
- شکل ۳-۸ مقایسه نتایج حاصل از مدل با نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل «توی» و همکارانش [۳۱] ۱۰۹
- شکل ۳-۹ توزیع کسر حجمی مارتنزیت در مقطع سیم فنر ماریپج حافظه دار ۱۰۹
- شکل ۳-۱۰ مقایسه نتایج حاصل از آزمایش و نتایج مدل ارائه شده برای فنر SMA2 در دمای ۲۹۱/۱۵k ۱۱۱
- شکل ۳-۱۱ مقایسه نتایج حاصل از آزمایش و نتایج مدل ارائه شده برای فنر SMA2 در دمای ۲۹۳.۱۵k ۱۱۱
- شکل ۳-۱۲ تغییرات کسر حجمی مارتنزیت ناشی از تنش در سطح مقطع سیم فنر SMA2 در دمای ۲۹۱/۱۵k ۱۱۲
- شکل ۳-۱۳ تغییرات کسر حجمی مارتنزیت ناشی از دما در جابجایی ۸ میلی متر برای سطح مقطع سیم فنر SMA2 ۱۱۳
- شکل ۳-۱۴ تغییرات کسر حجمی مارتنزیت کل در جابجایی ۸ میلی متر برای سطح مقطع سیم فنر SMA2 ۱۱۳

- شکل ۳-۱۵ تغییرات کرنش برشی در جابجایی ۸ میلی متر برای سطح مقطع سیم فنر SMA2 ۱۱۴
- شکل ۳-۱۶ تغییرات تنش برشی در جابجایی ۸ میلی متر برای سطح مقطع سیم فنر SMA2 ۱۱۴
- شکل ۳-۱۷ تغییرات نیرو در جابجایی ۸ میلی متر برای سطح مقطع سیم فنر SMA2 ۱۱۵
- شکل ۳-۱۸ تغییرات مدول برشی در جابجایی ۸ میلی متر برای سطح مقطع سیم فنر SMA2 ۱۱۵
- شکل ۳-۱۹ اثر افزایش و کاهش مدول الاستیک آستنیت کامل و مارتنزیت کامل ۱۱۶
- شکل ۳-۲۰ اثر افزایش و کاهش شیب دیاگرام فازی ۱۱۷

فصل چهارم: نتیجه گیری

- شکل ۴-۱ مدل ۳ درجه آزادی خودرو (جرم تایرها صفر در نظر گرفته می شود) ۱۲۲
- شکل ۴-۲ نمایی از سیستم کلی مورد استفاده در سیستم تعلیق خودرو برای راحتی سوار ۱۲۳
- شکل ۴-۳ نمایش شماتیک فرآیند ایجاد رفتار دوسویه در فنرهای حافظه دار ۱۲۵

فهرست جداول

صفحه

عنوان

فصل اول: مقدمه

- جدول ۱-۱ میزان تأثیر نیروی ارتودنسی پس از گذشت زمان‌های متفاوت [۵]..... ۲۰
- جدول ۱-۲ تغییرات دمای استحاله در دماهای آنیل کردن مختلف [۱۹]..... ۳۳

فصل دوم: اقدامات و نتایج آزمایشگاهی

- جدول ۲-۱ مشخصات ارائه شده توسط شرکت Merry برای سیم SME..... ۴۵
- جدول ۲-۲ مشخصات ارائه شده توسط شرکت Merry برای سیم PE..... ۴۵
- جدول ۲-۳ زاویه θ به دست آمده برای استنت بعد از انجام عملیات حرارتی در دماها و زمان‌های متفاوت [۲۱]..... ۴۸
- جدول ۲-۴ دماهای استحاله‌ی استخراجی از تست DSC برای سیم SME (نمونه‌ی اولیه)..... ۵۳
- جدول ۲-۵ میزان انرژی مبادله شده و نرمال انرژی، استخراجی از تست DSC برای سیم SME (نمونه‌ی اولیه)..... ۵۳
- جدول ۲-۶ دماهای قله و دره‌ی استخراجی از تست DSC برای سیم SME (نمونه‌ی اولیه)..... ۵۴
- جدول ۲-۷ دماهای استحاله‌ی استخراجی از تست DSC برای سیم PE (نمونه اولیه)..... ۵۶
- جدول ۲-۸ میزان انرژی مبادله شده و نرمال انرژی، استخراجی از تست DSC برای سیم PE (نمونه اولیه)..... ۵۶
- جدول ۲-۹ دماهای قله و دره‌ی استخراجی از تست DSC برای سیم PE (نمونه اولیه)..... ۵۶
- جدول ۲-۱۰ دماهای استحاله‌ی استخراجی از تست DSC برای فنر SMA1..... ۵۸
- جدول ۲-۱۱ دماهای قله و دره‌ی استخراجی از تست DSC برای فنر SMA1..... ۵۸
- جدول ۲-۱۲ دماهای استحاله‌ی استخراجی از تست DSC برای فنر SMA2..... ۶۱
- جدول ۲-۱۳ میزان انرژی مبادله شده و نرمال انرژی، استخراجی از تست DSC برای فنر SMA2..... ۶۱
- جدول ۲-۱۴ دمای قله و دره‌ی استخراجی از تست DSC برای فنر SMA2..... ۶۱
- جدول ۲-۱۵ دماهای استحاله‌ی استخراجی از تست DSC برای فنر SMA3..... ۶۳
- جدول ۲-۱۶ میزان انرژی مبادله شده و نرمال انرژی، استخراجی از تست DSC برای فنر SMA3..... ۶۳
- جدول ۲-۱۷ دمای قله و دره‌ی استخراجی از تست DSC برای فنر SMA3..... ۶۳
- جدول ۲-۱۸ مشخصات اولیه و شرایط فرآیند تثبیت شکل برای هر فنر ساخته شده..... ۶۴
- جدول ۲-۱۹ دماهای استحاله‌ی استخراجی از تست DSC..... ۶۴
- جدول ۲-۲۰ دمای قله و دره‌ی استخراجی از تست DSC..... ۶۵
- جدول ۲-۲۱ پارامترهای به دست آمده برای سیم‌های SME و PE توسط تست کشش ساده..... ۷۰
- جدول ۲-۲۲ مشخصات هندسی فنر SMA2 در شرایط مختلف تست..... ۷۶

جدول ۲-۲۳ طول فنر SMA4 در شرایط مختلف تست. ۷۸

فصل سوم: مدل سازی فنرهای حافظه دار

جدول ۳-۱ پارامترهای ورودی در مدل توی و همکارانش [۳۱] ۱۰۸

جدول ۳-۲ داده های ورودی مدل حاضر برای فنر SMA2 ۱۱۰

چکیده

آلیاژهای حافظه‌دار دسته‌ای از مواد هوشمند با دو ویژگی منحصر به فرد حافظه‌داری و شبه‌الاستیک می‌باشند که این دو ویژگی ناشی از استحاله‌ی فازی مارتنزیت تحت بارگذاری‌های ترمومکانیکی مختلف است. بسته به این دو ویژگی ذکر شده آلیاژهای حافظه‌دار در فرم‌های مختلفی به عنوان عملگر مورد استفاده قرار می‌گیرند که فنرها از پرکاربردترین این عملگرها هستند. برای ساخت نمونه‌های حافظه‌دار با شکل مشخص (مانند فنرها، چنگک‌ها و واشرها) با استفاده از نمونه اولیه (مانند میله‌ها، سیم‌ها و ورق‌ها) نیاز به انجام فرآیندی به نام تثبیت شکل است. فرآیند تثبیت شکل شامل تغییر شکل نمونه‌ی اولیه به شکل مورد نظر، مقید کردن نمونه و عملیات حرارتی است. در این پژوهش دو نوع سیم از جنس نایتینول استفاده می‌شود که یکی از آن‌ها در دمای محیط دارای خاصیت حافظه‌داری و دیگری دارای خاصیت شبه‌الاستیک است. عملیات حرارتی با استفاده از کوره لوله‌ای تحت اتمسفر (گاز آرگون) انجام می‌شود و فنرهایی با شرایط مختلف ساخته می‌شود. تأثیر دمای عملیات حرارتی و گام فنر بر روی دماهای استحاله و رفتار مکانیکی فنرهای مارپیچ حافظه‌دار بررسی می‌شود. دماهای استحاله با استفاده از آزمون DSC اندازه‌گیری می‌شود و رفتار مکانیکی سیم‌ها و فنرهای ساخته شده با استفاده از آزمون فشار و کشش در دماهای مختلف به دست می‌آید. سختی فنرهای ساخته در شرایط مختلف اندازه‌گیری می‌شود و تغییرات سختی فنرها در هنگام استحاله بررسی می‌شود. هم‌چنین پارامترهای لازم برای مدل‌سازی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به دست می‌آید.

در این پژوهش برای بررسی رفتار فنرهای حافظه‌دار، مدلی ارائه می‌شود که هر دو ویژگی حافظه‌داری و شبه‌الاستیک فنرهای مارپیچ حافظه‌دار را به خوبی نشان می‌دهد. از معادلات ساختاری اصلاح شده‌ی برینسون، معادلات تعادل استاتیکی فنر و سازگاری هندسی در این مدل استفاده شده است و با استفاده از معیار تسلیم فون میزز مدل یک بعدی برینسون به مدل قابل استفاده برای فنرهای حافظه‌دار تعمیم داده شده است. در این مدل، ضریب پواسون برخلاف کارهای قبلی برابر $0/5$ فرض نمی‌شود و می‌تواند مقدار دلخواهی داشته باشد؛ علاوه بر این، حداکثر کرنش ماندگار در کشش و برش یکسان فرض نمی‌شوند. صحت نتایج حاصل از مدل در قیاس با نتایج آزمایشگاهی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و نتایج حاصل از مدل با نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده مقایسه می‌شود. در پایان، اثر پارامترهای مختلف آلیاژهای حافظه‌دار مانند مدول الاستیک و شیب نمودار فازی بر رفتار مکانیکی فنرهای مارپیچ حافظه‌دار با استفاده از نتایج مدل ارائه شده بررسی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ۱- فنرهای مارپیچ حافظه‌دار ۲- تثبیت شکل ۳- دماهای استحاله ۴- معادلات ساختاری ۵- معادلات تعادل استاتیکی

فصل اول

مقدمه

۱-۱- معرفی آلیاژهای حافظه‌دار

آلیاژهای حافظه‌دار گروهی از مواد هوشمند هستند، که به علت برخورداری از ویژگی‌های خاص دارای کاربردهای متنوعی در صنعت هوافضا، رباتیک، علوم پزشکی و غیره هستند. مهم‌ترین ویژگی این آلیاژها که به خاطر آن شهرت دارند آن است که چنانچه تا دمای خاصی حرارت ببینند می‌توانند کرنش‌های ماندگار ایجاد شده در اثر بارگذاری را آزاد کرده و شکل اولیه خود را به دست آورند. البته این ویژگی، که خاصیت حافظه‌داری^۱ نام دارد، تنها بخشی از خصوصیات این دسته از مواد بوده که در ادامه به بخشی از آنها اشاره خواهد شد. خاصیت حافظه‌داری برای اولین بار توسط یک فیزیک‌دان سوئدی به نام آرن اولاندر^۲ در سال ۱۹۳۲، بر روی آلیاژ طلا-کادمیوم^۳ کشف شد [۱]. در سال ۱۹۳۸ گرینگر^۴ و مورادیان^۵ متوجه تشکیل و ناپدید شدن فاز مارتنزیت در اثر کاهش و افزایش دما در آلیاژ مس-روی^۶ شدند [۲]. حدود یک دهه بعد،

۱ Shape memory effect

۲ Arne Olander

۳ Au-Cd

۴ Greninger

۵ Mooradian

۶ Cu-Zn

پدیده حافظه‌داری مبتنی بر رفتار ترموالاستیک فاز مارتنزیت توسط کورماجوف^۱ در سال ۱۹۴۹ و چنگ^۲ و رید در سال ۱۹۵۱ گزارش شد [۲]. البته از آن جا که ماهیت رفتارهای مشاهده شده تا این تاریخ در آلیاژهای مذکور با آنچه امروزه به عنوان ویژگی حافظه‌داری در آلیاژهای حافظه‌دار رخ می‌دهد متفاوت است، بعضی، این تحقیقات را در زمره تحقیقات بر روی آلیاژهای حافظه‌دار به حساب نمی‌آورند، که در قسمت‌های بعدی توضیحات بیشتری ارائه خواهد شد. در حقیقت نقطه عطف در تاریخچه آلیاژهای حافظه‌دار مربوط می‌شود به کشف بولر^۳ و همکارانش در سال ۱۹۵۹ [۱]. آن‌ها در حالی که در آزمایشگاه توپخانه نیروی دریایی، در حال بررسی مقاومت به حرارت و خوردگی آلیاژ نیکل-تیتانیوم بودند، به طور اتفاقی متوجه پدیده حافظه‌داری آن شدند و از همین رو این آلیاژ به نایتینول^۴ که مخفف عبارت نیکل-تیتانیوم آزمایشگاه توپخانه نیروی دریایی در زبان انگلیسی است، شهرت یافته است. اما تا دو سال بعد خاصیت حافظه‌داری آن از دید همگان پنهان بود. در سال ۱۹۶۱ و در جریان یک کنفرانس، او نمونه سیمی از این آلیاژ تهیه کرد و آن را تا زد تا مقاومت به خستگی آن را به حصار نشان دهد. در حالی که این نمونه بین حصار دست به دست می‌چرخید، دکتر دیوید اس. مازی^۵ از رؤسای بولر سعی کرد با استفاده از فندک پیپ خود اثر حرارت را بر این آلیاژ ببیند. در این هنگام بود که ناگهان سیم به شکل اولیه خود برگشت و همه از خاصیت حافظه‌داری آن شگفت زده شدند [۳ و ۴].

اگرچه تاکنون آلیاژهای حافظه‌دار مختلف دیگری نظیر CuZnAl ، FeMnSi و CuAlNi شناخته شده‌اند، ولی بنابر ویژگی‌های منحصر به فرد آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیوم، این آلیاژ به عنوان پرکاربردترین و معروف‌ترین آلیاژ حافظه‌دار مطرح و اغلب تحقیقات بر روی نایتینول صورت گرفته است. خاصیت حافظه‌داری در آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیوم هنگام ترکیب نیکل و تیتانیوم با درصد اتمی تقریباً یکسان (معمولاً ۵۰-۵۰) ایجاد می‌شود. البته درصد نیکل در ترکیب عمدتاً از ۴۷ تا ۵۱ درصد و تیتانیوم از ۴۹ تا ۵۳ درصد قابل تغییر می‌باشد.

خاصیت کلیدی آلیاژهای حافظه‌دار که منجر به وجود ویژگی‌های منحصر به فرد در آن‌ها شده، وقوع تبدیل فاز مارتنزیتی در اینگونه مواد است. در ادامه به منظور معرفی و بررسی دقیق‌تر خواص این آلیاژها چگونگی این تغییر فاز و رفتارهای متالورژیکی مربوطه به طور خلاصه بیان شده و از ذکر جزئیات تفصیلی خودداری می‌گردد.

۱ Kurdjumov

۲ Chang and Read

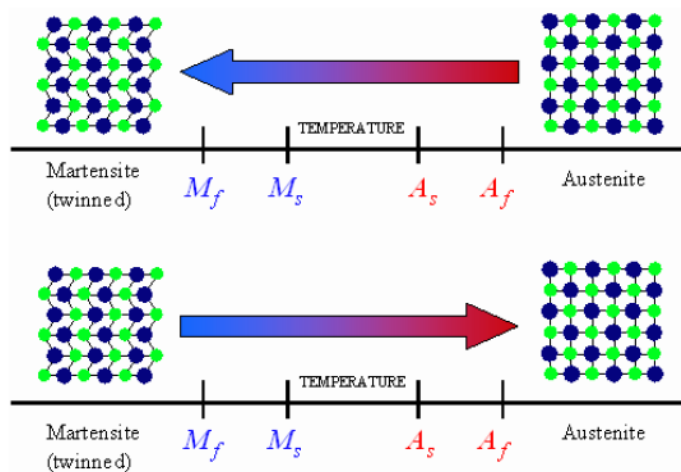
۳ Buehler

۴ Nitinol (Ni Ti Naval Ordnance Laboratory)

۵ Dr. David S. Muzzey

آلیاژهای حافظه‌دار دارای دو فاز پایدار آستنیت^۱ و مارتنزیت هستند. این مواد در دماهای بالا بصورت آستنیت که یک ساختار کریستالی متقارن با انرژی بالا است موجود بوده، اما در دماهای پایین بصورت مارتنزیت با انرژی کم که تقارن ساختار آن کمتر از آستنیت است می‌باشند. شیوه متداولی که در تغییر این فاز به مارتنزیت^۲ وجود دارد استحاله مارتنزیتی در طی سرد کردن است. هنگام این تغییر فاز ناشی از سرد کردن، شبکه بلوری تقارن خود را از دست داده و به ساختار تک صفحه‌ای^۳ تبدیل می‌شود. ساختار جدید بعضاً پس از تشکیل یک فاز ناپایدار واسطه به نام رامبوهدرال تشکیل شده که این فاز واسطه دارای خواص ویژه‌ای است که در اینجا از ذکر این موارد صرف‌نظر می‌شود.

شکل ۱-۱ این استحاله را با جزئیات بیشتر نشان می‌دهد. در تغییر فاز آستنیت به مارتنزیت در اثر سرد شدن، درجه حرارت آغاز تشکیل مارتنزیت M_S و درجه حرارت پایان تشکیل این فاز M_f نام دارد. این استحاله برگشت‌پذیر بوده و با گرم کردن مارتنزیت می‌توان به فاز آستنیت دست یافت. در این صورت دمای آغاز تشکیل آستنیت را A_S و دمای پایان تشکیل آن را A_f می‌نامند. این چهار درجه حرارت از خواص مهم این آلیاژها بوده که بسته به شرایط مختلف، از جمله درصد ترکیب عناصر و عملیات‌های ساخت و پس از ساخت جسم، مقادیر متفاوتی می‌توانند داشته باشند. لازم به ذکر است که در این شکل A_S بزرگتر از M_S فرض شده، درحالی که برخی از مواد این شرط را نداشته و A_S کوچکتر از M_S دارند اما در تمامی مطالعاتی که به‌طور 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 اول می‌نامند.



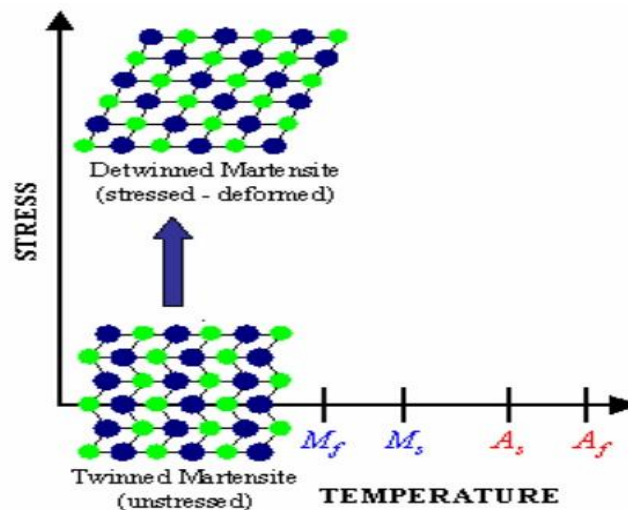
شکل ۱-۱ نحوه‌ی تغییر ساختار بلوری فازها در اثر اعمال حرارت به یک آلیاژ حافظه‌دار [۵]

۱ Austenite

۲ Martensite

۳ Monoclinic

نکته دیگر آن که چنانچه مارتنزیت در اثر کاهش دما از آستنیت به دست آید، ساختاری همانند آنچه در شکل ۱-۱ نشان داده شد دارد، اما همواره فاز مارتنزیت به این صورت وجود ندارد. به عنوان نمونه چنانچه در دمای کمتر از M_f فاز مارتنزیت تحت اعمال تنش قرار گیرد، مطابق شکل ۱-۲ ساختار تغییر فرم یافته جدیدی به دست می‌آورد که اجزای آن متفاوت از ساختار قبلی است. ساختار جدید با ایجاد برش موضعی در مارتنزیت اولیه ایجاد شده که در حالت یک بعدی تنها به یکی از دو فرم نشان داده شده در شکل ۱-۳ خواهد بود. ساختاری از مارتنزیت که بدون اعمال هیچ گونه تنش و تنها در اثر سرد شدن فاز آستنیت به دست آمده است را مارتنزیت ناشی از دما^۱، دوقلوشده^۲، چند نوعی^۳ و یا خود تطبیق^۴ و ساختار دیگر را مارتنزیت ناشی از تنش^۵، غیر دوقلو^۶، تک نوعی^۷، تغییر فرم یافته^۸ یا تنش دیده^۹ می‌نامند [۵].



شکل ۱-۲ نحوه تغییر فاز مارتنزیت در اثر تنش [۵]

۱ Temperature-Induced

۲ Twinned

۳ Multiple-Variant

۴ Self-Accommodated

۵ Stress-Induced

۶ Detwinned

۷ Single-Variant

۸ Deformed

۹ Stressed