مقاله

بررسی رفتار و خواص مکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار

سید روح‌الله کاظمی بازاردهی*
استادیار گروه مهندسی مکانیک
دانشگاه گیلان
kazemi@guilan.ac.ir

محمد بیات
کارشناس مهندسی مکانیک
گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان
mohammadbayat.mc@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۱۵

چکیده

امروزه با گذشت بیش از شصت سال از نخستین پژوهش‌های علمی انجام‌شده دربارهٔ آلیاژهای حافظه‌دار[۱]، شاهد کاربردهای بسیار وسیع این دسته از مواد در حوزه‌های گوناگون هستیم. اگرچه در ابتدا این کاربردها تنها به ساخت اتصالات و کوپلینگ‌ها، آن‌هم فقط در حوزه‌های نظامی منحصر می‌شد، اما امروزه در بسیاری از کاربردهای روزمره از جمله ساخت انواع قاب عینک، آنتن موبایل، شیر جلوگیری از سوختگی و دیگر کاربردهای صنعتی همچون شیرهای ایمنی اطفاء حریق و محافظ باتری لیتیومی از این آلیاژها استفاده می‌شود. در این مقاله آلیاژهای حافظه‌دار و خواص فیزیکی آنها معرفی و رفتار مکانیکی آنها مطالعه شده و در انتها برخی از مهمترین کاربردهای آنها بررسی شده است.

واژگان کلیدی: آلیاژ حافظه‌دار، سوپرالاستیک[۲]، حافظهٔ شکلی، آستنیت[۳]، مارتنزیت[۴]، عملگر

۱. مقدمه

آلیاژ حافظه‌دار اصطلاحاً نام دسته‌ای از مواد محرک است. این مواد در مقایسه با سایر آلیاژها از خواص متمایزی برخوردارند. عکس‌العمل شدید این دسته از مواد نسبت به برخی از پارامترهای ترمودینامیکی و مکانیکی و قابلیت بازگشت به شکل اولیه در اثر اعمال پارامترهای مذکور به‌گونه‌ای است که می‌تواند رفتار سیستم را بهبود بخشد. هنگامی‌که یک آلیاژ معمولی تحت بار خارجی بیش از حد الاستیک قرار می‌گیرد تغییر شکل می‌دهد. این نوع تغییر شکل پس از حذف بار باقی می‌ماند. اما آلیاژهای حافظه‌دار رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. این دسته از مواد در دماهای پایین می‌توانند تغییر شکل پلاستیک چند درصدی را تحمل کنند و سپس در دماهای بالا به‌صورت کامل به شکل اولیهٔ خود بازگردند. این در حالی است که در فرایند برگشت به شکل اولیه می‌توانند نیروی زیادی تولید کنند؛ نیرویی که می‌تواند برای تحریک مفید واقع شود. به بیان دیگر، وقتی این مواد در معرض حرارت قرار می‌گیرند، به شکل یا اندازه‌ای مشخص بازمی‌گردند، لذا می‌توان این مواد را در دماهای پایین تغییر شکل پلاستیک داد و با قراردادن آنها در دماهای بالا از قابلیت برگشت به حالت قبل از تغییر فرم آنها بهره برد.

۲. بررسی ساختار و رفتار آلیاژ

نخستین تحقیقات در مورد آلیاژهای حافظه‌دار به سال ۱۹۵۰ م بازمی‌گردد که طی آن محققان نیروی دریایی ایالات متحدهٔ امریکا[۵] به پدیدهٔ حافظه‌داری در برخی از فلزات پایهٔ مسی پی بردند. مهمترین آلیاژ دارای چنین خاصیتی آلیاژ نیکل تیتانیوم[۶] بود. اگرچه قبل از آن آلیاژ نقره کادمیوم[۷] نیز دارای این اثر بود، اما تحقیقات به‌صورت بسیار جدی روی آلیاژ نیکل تیتانیوم صورت گرفت که اصطلاحاً نایتینول[۸] نام داشت. این نام برگرفته از نام آلیاژ و نام خواستگاه انجام نخستین تحقیقات روی آن بوده است [۲].

برخی دیگر از آلیاژهای دارای این خاصیت عبارت‌اند از: مس آلومینیم روی[۹] و مس آلومینیم نیکل[۱۰]؛ این دو آلیاژ مصرف تجاری بیشتری دارند و در عین‌حال دارای خاصیت حافظه‌داری کمتری هستند. همچنین آلیاژهای نیکل تیتانیوم سرب[۱۱] و نیکل تیتانیوم زیرکونیم[۱۲] که این دو بر خلاف دستهٔ قبلی مصرف تجاری کمتری دارند.

چون نیکل و تیتانیوم عناصر اصلی سازندهٔ نایتینول هستند آشنایی با برخی از خواص آنها حائز اهمیت است. نیکل رنگ سفید نقره‌ای براق دارد، فلزی است سمی و شکننده و از قابلیت پولیش خوبی برخوردار است. این فلز جزء فلزات غیرآهنی سنگین است با جرم مخصوص ۸۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نقطهٔ ذوب ۱۴۴۵ درجهٔ سانتی‌گراد؛ در برابر خوردگی مقاوم است و جذب آهن‌ربا می‌شود. همچنین در برابر حرارت و ضربه مقاومت خوبی نشان می‌دهد. موارد استفادهٔ آن شامل پوشش محافظ در آبکاری فلزات، تولید فولادهای آلیاژی و جز این‌هاست. تیتانیوم نیز فلزی است نقره‌فام مایل به خاکستری، جزء فلزات غیرآهنی سبک محسوب می‌شود. جرم مخصوص آن ۴۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نقطهٔ ذوب آن ۱۶۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد است. مقاومت در برابر خوردگی و سایش، همچنین استحکام زیاد آن موجب کاربرد در ساخت قطعات هواپیما، سفینه‌های فضایی، لوازم نظامی و جراحی شده است. آلیاژهای تیتانیم‌دار فلز اصلی ساختمان هواپیمای فراصوت را تشکیل می‌دهند. تیتانیوم بر خلاف نیکل در پزشکی بسیار مؤثر عمل می‌کند. همچنین با توجه به خواص بسیار خوب مکانیکی برای اصلاح دندان‌های کج و همچنین ترمیم استخوان‌های آسیب‌دیده کاربردهای فراوانی دارد [۴].

به‌طور کلی آلیاژهای حافظه‌دار دو رفتار بسیار مهم از خود نشان می‌دهند که عبارت است از: اثر حافظهٔ شکلی[۱۳] و اثر سوپرالاستیک. در ادامه این دو اثر بررسی می‌شود. این آلیاژها در دماهای خاصی تغییر فاز می‌دهند. در حالت بدون تنش، تبدیل فاز به‌وسیلهٔ چهار دما توصیف می‌شود. تبدیل مارتنزیت به آستنیت با دو دمای A_s و A_f مشخص می‌شود که به‌ترتیب دمای شروع و پایان می‌باشد. به‌طور مشابه، تبدیل آستنیت به مارتنزیت با دو دمای شروع و پایان M_s و M_f مشخص می‌شود. دماهای تبدیل با هم رابطه‌ای به‌صورت رابطهٔ ۱ دارند.

$$M_f < M_s < A_s < A_f \qquad (۱)$$

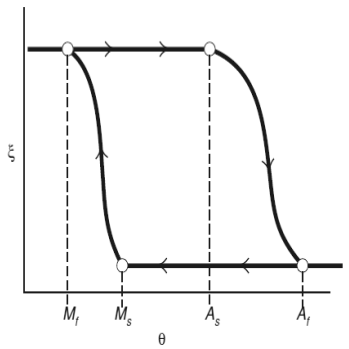
این آلیاژها سه حالت کلی وابسته به دما دارند که به‌ترتیب عبارت‌اند از:

۱. کاملاً در فاز مارتنزیت
۲. کاملاً در فاز آستنیت
۳. ترکیبی از آستنیت و مارتنزیت

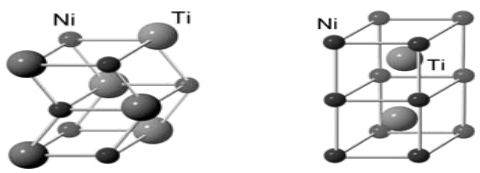
در شکل ۱ وابستگی ترکیب فازی آلیاژ نسبت به دما نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در دمای بالاتر از A_f کاملاً در فاز آستنیت و در دمای کمتر از M_s کاملاً مارتنزیت است [۳]. از مهمترین ویژگی‌های این آلیاژها این است که در دمای پایین در فاز مارتنزیت و در دمای بالا در فاز آستنیت هستند. در ادامه دربارهٔ فازهای آستنیت و مارتنزیت به اجمال توضیحاتی داده شده است.

آستنیت فازی است که در دمای بالا تشکیل می‌شود. این فاز ساختمان بلوری مکعبی همگن دارد و از مدول الاستیسیتهٔ بالایی برخوردار است. سردکردن آستنیت آن را به فاز مارتنزیت تبدیل می‌کند. مارتنزیت بدون تنش

ساختمانی دوقلویی دارد و از مدول ارتجاعی ضعیفی برخوردار است. بسیاری از مواد استحالهٔ مارتنزیتی[۱۴] دارند، اما برتری که آلیاژهای حافظه‌دار را نسبت به آلیاژهای دیگر متمایز می‌کند، قابلیت دوقلوشدن این آلیاژ در فاز مارتنزیت است. در حالی‌که مواد دیگر به‌وسیلهٔ لغزش و حرکت نابه‌جایی‌ها تغییر شکل می‌یابند، آلیاژهای حافظه‌دار به‌وسیلهٔ تغییر جهت سادهٔ ساختار کریستال‌های خود و از طریق مرزهای دوقلویی به تنش‌های اعمال‌شده عکس‌العمل نشان می‌دهند.



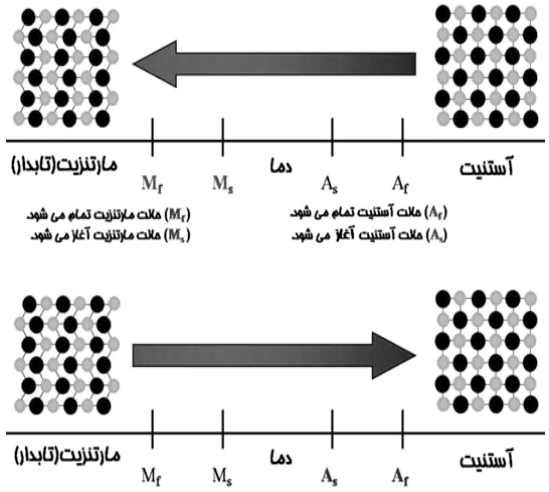
شکل ۱. نمودار کسر مارتنزیت نسبت به دما [۲]



(ب) (الف)

شکل۲. نمایشی از ساختار الف) آستنیت، ب) مارتنزیت

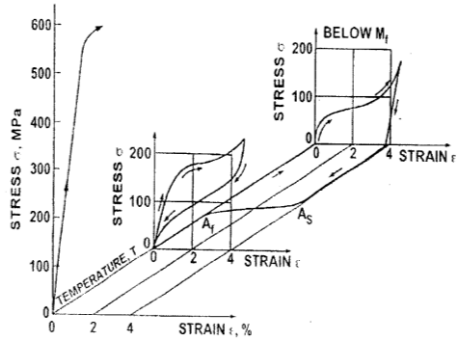
در دماهای پایین، اگر در این آلیاژها فاز مارتنزیت حاکم باشد و تغییر فرم پلاستیکی روی دهد، ساختار کریستالی دوقلو شده‌ای برای آلیاژ ایجاد می‌شود که ناشی از تغییر فرم پلاستیک است. با گرم‌کردن آلیاژ تغییر فرم یافته تا دمای شروع فاز آستنیت می‌توان شکل اولیه را بازگرداند. این توانایی به‌عنوان اثر حافظهٔ شکلی خوانده می‌شود و حاصل از تغییر فاز مارتنزیت در دمای پایین به فاز آستنیت در دمای بالا می‌باشد. در اثر خم‌کردن میلهٔ حافظه‌دار در دمای پایین و جایی‌که فاز مارتنزیت حاکم است، تغییر فرم پلاستیک در میله رخ می‌دهد و طول آن زیاد می‌شود [۵]. در شکل ۲ ساختار آلیاژ و تغییر فاز آن در اثر تغییر دما نمایش داده شده است.



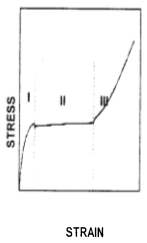
شکل ۳. نمایش ساختار آستنیت و مارتنزیت و وابستگی آن به دما

۳. رفتار مکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، آلیاژهای حافظه‌دار در دمای خاصی تغییر فاز می‌دهند، به‌طوری‌که در دمای کمتر از پایان آستنیت رفتار حافظه‌داری و در دمای بیشتر از آن رفتار سوپرالاستیک از خود بروز می‌دهند. در دمای بیش از A_f در واقع نوعی حلقهٔ هیسترزیس در نمودار تنش - کرنش به‌وجود می‌آید. این پدیده برای مواد مختلف در دماهای گوناگونی رخ می‌دهد. مثلاً آلیاژ نیکل تیتانیوم دارای دمای حلقهٔ بین ۲۵ تا ۴۰ درجهٔ سانتی‌گراد و آلیاژ مس نیکل تیتانیوم بین ۷ تا ۱۵ درجهٔ سانتی‌گراد و آلیاژ نیوبیوم نیکل تیتانیوم[۱۵] دارای یک حلقهٔ هیسترزیس بسیار بزرگ در دمای بالای ۱۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد است. در واقع منظور از حلقهٔ هیسترزیس همان حلقهٔ به‌وجود آمده از بارگذاری و باربرداری در نمودار تنش - کرنش آلیاژ حافظه‌دار می‌باشد. در شکل ۴ این موضوع نمایش داده شده است. در دمای کمتر از A_f و بیشتر از M_f اثر حافظه‌داری و در دمای بیشتر از A_f اثر سوپرالاستیک مشهود است. در نمودار شکل ۵ نیز فاز و نمودار تنش کرنش مشاهده می‌شود.

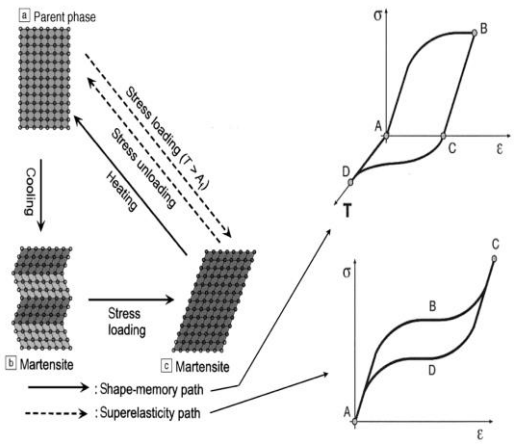


(الف)



(ب)

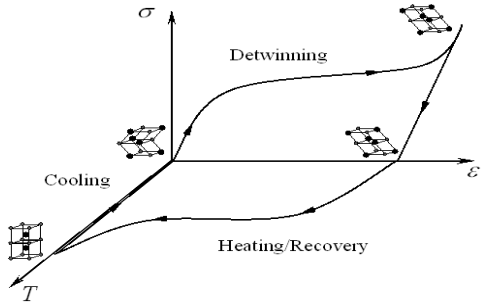
شکل ٤. نمایش نمودار تنش - کرنش برحسب دما [۹]



شکل ٥. نمودار تغییر فاز و تنش - کرنش برحسب دما [۱]

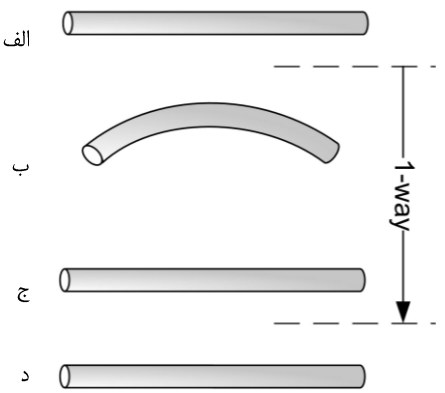
توجه به این نکته ضروری است که به دو طریق می‌توان تغییر فاز از مارتنزیت به آستنیت یا بالعکس را انجام داد. روش اول همان حرارت‌دادن به نمونه تا بالاتر از دمای A_f است که مارتنزیت به آستنیت تبدیل می‌شود و یا سردکردن نمونه تا کمتر از M_f است که آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود. روش دوم در دمایی ثابت صورت می‌گیرد، به‌طوری‌که مثلاً نمونه‌ای در دمای بیشتر از A_f قرار دارد. در این حالت فاز غالب آستنیت است. اما با اعمال نیرویی محوری به نمونه می‌توان مشاهده کرد که تغییر فاز از آستنیت به مارتنزیت انجام می‌شود. همچنین باربرداری از نمونه سبب تبدیل دوبارهٔ نمونه به آستنیت در همان دما می‌شود. به این روش اصطلاحاً استحالهٔ مارتنزیتی به‌کمک تنش[۱۶] گفته می‌شود [۱].

در ادامه و پیش از بررسی اثر حافظه‌داری و سوپرالاستیک، ابتدا مطالبی از مقاومت مصالح بیان می‌شود. اساساً تنش به‌معنای نیرو بر واحد سطح است. کمیت دیگری که برای تحلیل رفتار مواد مورد بررسی قرارمی‌گیرد، کرنش است که به‌صورت تغییر طول به طول اولیه تعریف می‌شود. همچنین تنش و کرنش توسط مدول یانگ به یکدیگر مرتبط می‌شوند. اگر فلزی تحت کشش یا فشار قرار بگیرد، در آن تنش به‌وجود می‌آید و درپی آن کرنش نیز رخ می‌دهد. اما باید توجه داشت که رابطهٔ خطی بین تنش و کرنش تنها در محدوده‌ای صحیح است که تغییر فرم ماده در آن الاستیک باشد. اگر باربرداری صورت گیرد، روی همان مسیر به حالت اولیه باز می‌گردد. این محدوده تا یک تنش مشخص می‌شود که به آن تنش تسلیم می‌گویند. اگر تنش افزایش یابد و بیش از مقدار تنش تسلیم شود، ماده وارد محدودهٔ پلاستیک می‌شود و دیگر روابط تنش - کرنش خطی نخواهد بود. در این زمان اگر باربرداری صورت گیرد، تنش روی خطی به موازات ناحیهٔ الاستیک صفر می‌شود. اما مقداری کرنش در آن باقی می‌ماند که به آن کرنش پسماند می‌گویند. همان‌گونه که پیشتر بیان شد، در محدوده‌ای خاص از دما، آلیاژ دارای فاز ترکیبی خواهد بود. حال اگر نمونهٔ آزمایش تحت بار محوری قرار گیرد، ابتدا تنش تا مقدار معینی افزایش می‌یابد. در این ناحیه تنش برحسب کرنش به‌صورت خطی تغییر می‌کند تا در نهایت به یک حد معین می‌رسد. سپس تغییر تنش برحسب کرنش به‌صورتی تغییر می‌کند که طی آن در ازای افزایش بسیار کم تنش، کرنش تغییر بسیار زیادی خواهد کرد. در این هنگام باربرداری از نمونه سبب ایجاد کرنشی در آن می‌شود که در اثر گرمادادن به آن از بین خواهد رفت.



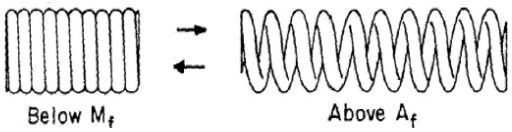
شکل ٦. اثر حافظهٔ شکلی و حذف تنش پسماند

به‌طور کلی اثر حافظهٔ شکلی به دو دستهٔ یک‌طرفه[17] و دوطرفه[18] تقسیم می‌شود. اگر اثر حافظه‌داری فقط بعد از تغییر شکل در حالت مارتنزیتی و سپس در سیکل گرم‌کردن مشاهده شود، به آن اثر حافظهٔ یک‌طرفه گفته می‌شود. این بدان معناست که در این حالت تغییر شکل ایجادشده، فقط با گرم‌کردن به حالت اولیهٔ خود بازمی‌گردد و چنانچه جسم را دوباره سرد کنیم، تغییری در شکل آن حاصل نمی‌شود. این خصوصیت در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷. اثر حافظه‌داری یک‌طرفه

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ابتدا فنر در دمای M_f به مقدار معینی تغییر فرم داده می‌شود، به‌صورتی که تغییر فرم دائمی در آن باقی بماند. حال اگر فنر تغییر فرم داده شده را تا دمای A_f حرارت دهیم، مجدداً به شکل اولیهٔ خود بازمی‌گردد و در سیکل سردشدن تا دمای M_f هیچ‌گونه تغییر شکلی در فنر مشاهده نمی‌شود. یکی از جالب‌ترین کاربردهای این مواد در طراحی و ساخت یک آنتن ماهواره توسط سازمان ملی هوانوردی و فضانوردی[19] بوده است. این آنتن با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار روی زمین ساخته شد. با توجه به اینکه یکی از قیدهای مهم در صنایع هوایی حجم تجهیزات است، آنتن ماهواره بعد از ساخت در دمای پایین، در دمای معمولی قرار گرفته و مچاله می‌گردد و پس از به حداقل رسیدن حجم آن در ماهواره جایگذاری می‌گردد. پس از پرتاب ماهواره و قرارگرفتن آن در مدار اصلی خود، آنتن با دریافت انرژی گرمایی به‌شکل اولیهٔ خود بازمی‌گردد [8]. برگشت‌پذیری به حالت اولیه، در اثر سرد و گرم‌کردن آلیاژهای حافظه‌دار دوطرفه، در بازهٔ معینی از دما امکان‌پذیر است. جسمی که دارای این خاصیت است، برای تغییر شکل تنها به بارگذاری حرارتی نیاز دارد. قطعه در اثر تغییر دما بین دو حالت تغییر شکل می‌دهد. یکی از این شکل‌ها در دمای بالاتر از پایان آستنیت و دیگری در دماهای دیگر است. در شکل ۸ یک فنر با اثر حافظه‌دار دوطرفه به‌صورت بازشده در حالت آستینی و شکل جمع‌شده در حالت مارتنزیتی نشان داده شده است.



شکل ۸. اثر حافظه‌داری دوطرفه

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، اگر فنر گرم شود، باز شده و در سیکل سردشدن مجدداً به شکل جمع‌شده درمی‌آید. باید توجه داشت که آلیاژهای حافظه‌دار برای اینکه اثر حافظه‌دار دوطرفه از خود نشان دهند به انجام عملیات خاصی نیاز دارند. این عملیات، که اصطلاحاً آموزش نامیده می‌شود، از تعدادی سیکل ترمومکانیکی تشکیل شده است. در اثر این سیکل‌های ترمومکانیکی یک ریزساختار جهت‌یافته به‌وجود می‌آید که در آن صفحات لغزش به‌طور مناسبی چیده

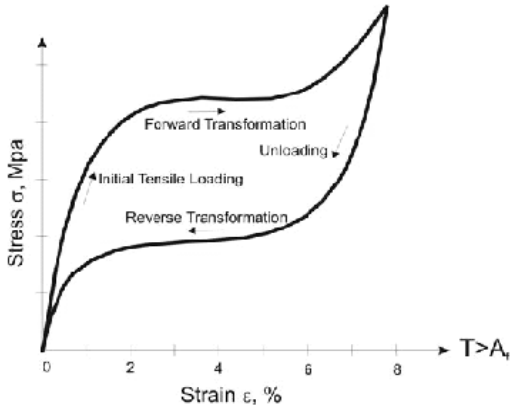
شده‌اند [۱]. از جمله کاربردهای این رفتار خاص ایجاد نیرو یا حرکت است. چون اکثر آلیاژهای حافظه‌دار فلزند، به‌دلیل داشتن مدول یانگ بزرگ در کرنش‌های بالا، تنش زیادی به‌وجود می‌آورند. یکی از روش‌های تولید نیرو آن است که نمونه‌ای را بین دو گیره قرار داده و سپس آن را تا دمای بالاتر از پایان آستنیت حرارت دهیم. در حین این عمل، نیروی بسیار بزرگی که ناشی از بازگشت به حالت اولیه است در نمونه به‌وجود خواهد آمد [۲].

۱-۳. رفتار سوپرالاستیک

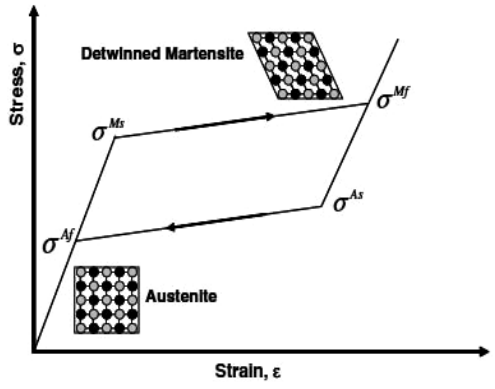
اگر نمونه‌ای را در دمای بالاتر از پایان آستنیت حرارت داده و در همان دما تحت بارگذاری قرار دهیم، مشاهده می‌شود که فاز آلیاژ به مارتنزیت تبدیل می‌شود. طبق نمودار تنش کرنش، ابتدا تنش تا حد الاستیک بالا رفته و پس از آن در عین تغییر کرنش زیاد، تنش آن افزایش بسیار کمی می‌یابد. سپس در طی باربرداری همان اتفاقی که در مسیر بارگذاری رخ داد عیناً تکرار می‌شود؛ یعنی ابتدا تنش تا حد مشخصی به‌صورت خطی تغییر می‌کند و پس از آن در ازای اندکی کاهش تنش، کرنش آن دچار کاهش شدیدی می‌شود [۳].

۴. کاربردهای متنوع آلیاژهای حافظه‌دار

در ابتدا بسیاری از تلاش‌ها برای توسعهٔ تولیدات صنعتی ساخته‌شده از آلیاژهای حافظه‌دار به شکست‌های پیاپی انجامید. البته این شکست‌ها ناشی از عدم آشنایی مهندسان با خواص مکانیکی و فیزیکی آلیاژهای حافظه‌دار بود. با گذشت زمان و کشف رفتارهای گوناگون این مواد، صنعت آلیاژهای حافظه‌دار پیشرفت کرد. یکی از نخستین کاربردهای موفق خاصیت حافظهٔ شکلی، استفاده از آن در سفت و محکم‌کردن اتصالات بود. در اواخر دههٔ شصت و اوائل دههٔ هفتاد، شرکت راشم[۲۰] طرح استفاده از این آلیاژها را در کوپلینگ لوله‌ها برای مصارف نظامی در نیروی هوایی و تفنگداران دریایی ایالات متحده مطرح کرد. این طرح بسیار ساده و مبتکرانه بود، بدین ترتیب که ابتدا یک روکش استوانه‌ای توخالی ساخته‌شده از آلیاژ حافظه‌دار روی مرز مشترک دو لوله قرار می‌گرفت که به‌لحاظ شعاعی ۳ درصد کوچک‌تر از قطر خارجی لوله بود. قبل از قرارگیری، ابتدا با سرمایش روکش ضمن تبدیل فاز آن به مارتنزیت، افزایش شعاعی حدود ۸ درصد در آن به‌وجود می‌آمد. سپس با حرارت‌دادن، روکش روی مرز دو لوله محکم می‌شد.



شکل ۹. اثر سوپرالاستیک



شکل ۱۰. نمایش تغییر فاز در دمای بالای A_f

اثر این کوپلینگ‌ها از آلیاژ نیکل تیتانیوم آهن ساخته می‌شدند که می‌بایست بعد از انبساط شعاعی اولیه در نیتروژن مایع قرار می‌گرفت. این کار اگرچه در بسیاری از محصولات تجاری کاربرد داشت، اما به‌علت مشکل‌آفرین بودن آن در قطعات هواپیماها اجرا نمی‌شد. همچنین روش جدیدی برای اتصال کوپلینگ‌ها ارائه شده که در آن ابتدا

روکش استوانه‌ای را دچار تنش پسماند در دمای کمتر از M_f می‌کردند، سپس با قراردادن آن روی محل اتصال و حرارت‌دادن، ضمن وقوع پدیدهٔ بازگشت، اتصال را محکم می‌کردند. این روش توسط شرکت ای. بی. بی.[21] برای نیروگاه‌های هسته‌ای به‌کار می‌رود [۲].

۴-۱. کوپلینگ کرایوفیت[22]

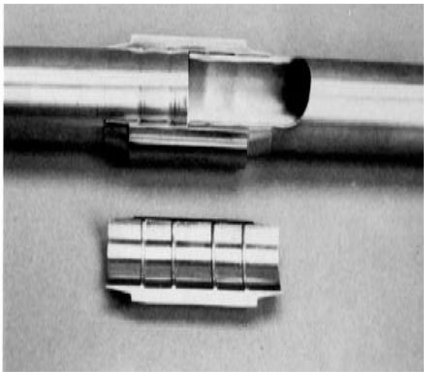
همان‌طور که گفته شد، نمونه‌ای معمول از کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار در اتصالات استفاده به‌عنوان کوپلینگ است. این پدیده بازیابی مقید نام دارد. به این ترتیب که استوانهٔ خالی ساخته شده از آلیاژ نیکل تیتانیوم آهن روی محل مورد نظر برای اتصال (در حالی‌که در فاز مارتنزیت بوده و اندکی افزایش شعاع در آن به‌وجود آمده است) قرار می‌گیرد و سپس در مجاورت هوا دچار انقباض شده و اتصال را محکم می‌کند.

۴-۲. رینگ‌های تاینل لاک[23]

با گذشت زمان و پیدایش انواع جدیدی از آلیاژهای حافظه‌دار نظیر آلیاژ نیکل تیتانیوم نیوبیوم، که دارای لوپ یا حلقهٔ هیسترزیس بزرگی بودند، گسترهٔ استفاده از آنها در حوزهٔ الکترونیک و مکانیک افزایش چشمگیری یافت. اجزای گیره‌ای، کانکتورها و سیل‌ها از جمله کاربردهای آن است. این مواد دارای گسترهٔ عملکرد بالاتر، محدودهٔ دمایی بزرگتر و قابلیت اطمینان بالاتر از انواع قبلی بودند. یکی از بارزترین کاربردهای آنها اتصال محافظهای رشته‌ای به کانکتورهای الکتریکی است.

۴-۳. آب‌بندی مسیر سوخت در انژکتور

یکی دیگر از کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار استفاده از آنها در بستن مسیر گذر سوخت در انژکتور خودروهای دیزل است. یک انژکتور دیزل از سه عضو اصلی ساخته شده است: شیر کنترل سولنوییدی، پیستون داخلی متراکم‌کننده و مسیر عبور سوخت که این دو عضو را به‌هم مرتبط می‌کند. در نهایت هم سوخت به خروجی رفته و در داخل محفظهٔ احتراق پاشیده می‌شود. در انژکتورهای دیزل فشار در سیلندر داخلی تا ۳۲۰۰۰ پوند بر اینچ مربع بالا می‌رود. در هنگام ساخت انژکتور، مسیر سوخت دریل شده و در نهایت سبب پدیدآمدن یک سوراخ باز در یک سمت انژکتور می‌شود. در روش‌های مرسوم این سوراخ توسط لحیم‌کاری مسیر سوخت به بدنه صورت می‌گیرد که البته این روش در نوسان‌های فشار در زمان‌های طولانی موجب گسیختگی اتصال می‌شود. به‌همین منظور در روشی جدید از آلیاژ نیکل تیتانیوم آهن استفاده می‌شود. در ابتدا مسیر سوخت که استوانه‌ای توپر است را تحت کشش قرار می‌دهند تا قطر آن کاهش یابد. پس از سوراخ‌کردن مسیر، آن را با سنگ‌زنی و برش به طول دلخواه می‌رسانند. در مرحلهٔ بعد، این مسیر در محل اصلی خود قرار می‌گیرد و در نهایت با حرارت‌دادن مسیر در جای خود محکم می‌شود. از دیگر کاربردهای آلیاهای حافظه‌دار، استفاده از آنها به‌عنوان عملگر است که بیشتر کاربرد تجاری دارد. در ادامه چند نمونه از کاربردهای آنها ذکر شده است.



شکل ۱۱. نمایی برش‌خورده از کوپلینگ کرایوفیت [۷]

۴-۴. شیرهای جلوگیری از سوختگی

گاه در هتل‌ها، آپارتمان‌ها و خانه‌ها مشاهده می‌شود آب داغی که از سیستم گرمایش مرکزی تأمین می‌شود، چندان داغ نیست، گاهی نیز به‌قدری داغ است که موجب سوختگی می‌شود. چون آب داغ با دمای بالاتر از ۴۸ درجهٔ سانتی‌گراد موجب سوختگی می‌شود، نوعی عملگر از جنس آلیاژ حافظه‌دار طراحی شده که در دمای بالاتر از ۴۸ درجهٔ

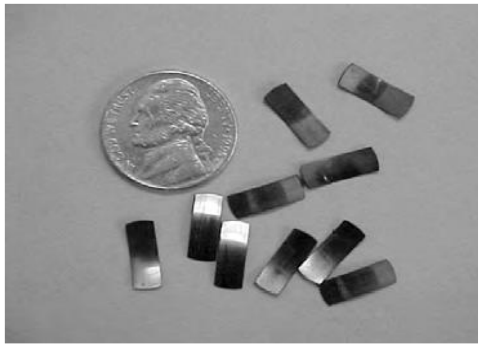
سانتی‌گراد ورق طره‌ای آن بسته شده و جریان آب داغ را قطع می‌کند. در این عملگر، پس از آنکه دما تا حد مطلوب پایین آمد، دوباره جریان وصل می‌شود.

۴-۵. شیر ایمنی[۲۴]

امروزه در صنایع تولید انواع نیمه‌هادی[۲۵]، به‌علت اشتعال‌پذیری بالای مواد موجود در کارخانه‌ها نوعی عملگر از جنس آلیاژ حافظه‌دار طراحی شده که در صورت بالارفتن دمای محلی، جریان گازهای سمی یا مشتعل را با دمیدن جریان هوا به‌سمت آنها قطع و کل سیستم کانال‌ها را عایق می‌کند و بدین ترتیب مانع بروز آتش‌سوزی می‌شود. این عملگر دارای یک ورق هوشمند است که با بالارفتن دما جریان هوای مخالف را باز می‌کند. این عملگر از آلیاژ نیکل تیتانیوم مس ساخته شده و توسط شرکت فایرچک توسعه داده شده است. امروزه این عملگر در صنایع پتروشیمی و گاز به‌کار می‌رود.

۴-۶. قطع‌کن باتری لیتیومی

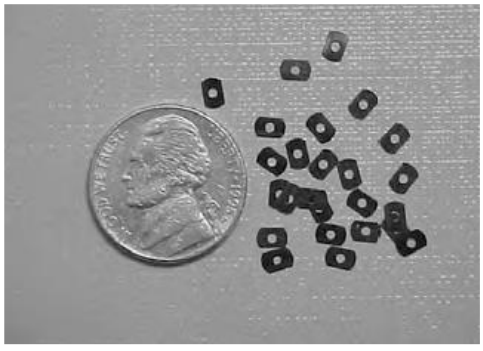
از دیگر کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار، استفاده از آنها در صنایع باتری‌سازی است. از این آلیاژها به‌عنوان نوعی سازوکار قطع‌کن جریان برق باتری‌های سلولی یونی لیتیومی چگالی بالا استفاده می‌شود. این عملگر در صورتی‌که دمای باتری در اثر شارژشدن بیش از حد یا اتصال کوتاه، تا حد قابل توجهی بالا رود، جریان برق ورودی را قطع می‌کند. این عملگر شکلی بشقابی دارد که در صورت تماس با جسم داغ به‌سمت داخل جمع شده و جریان را تا رسیدن باتری به دمای عادی قطع می‌کند [۷].



شکل ۱۲. ورق طره‌ای به‌کار رفته در شیر ضد سوزش [۷]

شکل ۱۳. شیر ضد سوزش [۷]

شکل ۱۴. شیر ایمنی فایرچک [۷]



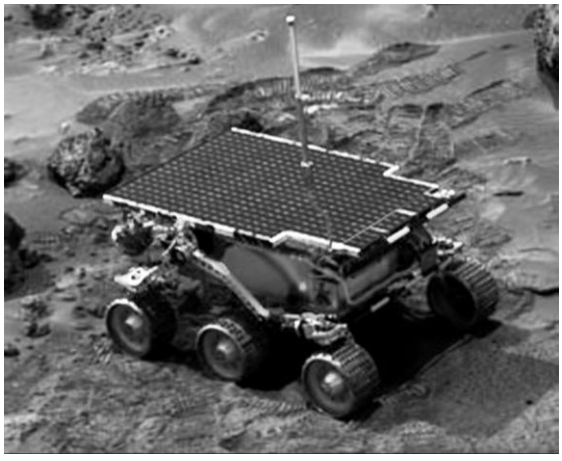
شکل ۱۵. عملگر قطع‌کن جریان باتری لیتیومی [۷]

۵. توسعهٔ کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار

محدودهٔ‌کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار بسیار گسترده است و در دههٔ اخیر نیز رشد بسیار چشمگیری داشته است. تا جایی‌که امروزه قاب بسیاری از عینک‌ها از آلیاژ تیتانیوم نیکل ساخته می‌شود؛ زیرا مقاومت بسیار بالای آنها و در عین‌حال سهولت بازیابی شکل اولیه در اثر ضربه بسیار کارآمد بوده و راحتی را به ارمغان می‌آورد. همچنین استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار در قطعات کاوشگر مریخ پیمای سوجورنر[۲۶] نشان‌دهندهٔ قابلیت بسیار گستردهٔ این مواد است [۶]. در بسیاری از آنتن‌های تلفن همراه نیز از این مواد استفاده می‌شود که به‌خصوص در دههٔ قبل کاربرد بسیاری داشت؛ زیرا آنتن‌های موبایل بسیار آسیب‌پذیر بودند و این مواد به‌علت قابلیت بازگشت بسیار مفید واقع می‌شدند [۷].

۶. جمع‌بندی

امروزه با گذشت بیش از شصت سال از ورود آلیاژهای حافظه‌دار به صنعت، بیش از ۸۰ درصد از موارد کاربرد آنها به حوزهٔ پزشکی مربوط می‌شود. لذا در این مقاله سعی شد تا برخی از کاربردهای صنعتی و تجاری مورد بررسی قرار گیرد تا قابلیت وسیع این مواد را برای اجرای طرح‌های مهندسی و تجاری نشان دهد. به‌کارگیری این مواد در نیروگاه‌ها و ساختمان‌های مسکونی سبب کاهش هزینه‌ها، افزایش ایمنی و عدم نیاز به سیستم‌های کنترلی گران‌قیمت شده است. در نتیجه می‌توان با استفاده از این مواد گام‌های صنعتی‌شدن را بسیار سریع‌تر برداشت و عملاً وابستگی صنعت داخل را به سیستم‌های پیشرفتهٔ کنترلی که تنها در کشورهای خاصی تولید می‌شوند را کم کرد.



شکل ۱۶. کاوشگر مریخ‌پیمای سوجورنر [۶]

۷. مآخذ

[1] Otsuka, K., T. Kakeshita. "Science and Technology of Shape-Memory Alloys: New Developments." *MRS Bulletin*, 27, 2002, pp. 91-100.

[2] Stoeckel, "The Shape Memory Effect- Phenomenon, Alloys and Applications", Proceedings: Shape Memory Alloys for Power Systems EPRI, 1995, pp. 1-13.

[3] Leo, D.J., *Engineering analysis of smart material systems*, Wiley, 2007.

[۴] *کلید فولاد*، مجموعهٔ استانداردها و نام‌گذاری‌ها.

[۵] بادیناس، ریچارد ،کیت نیزبت جوزف شیگلی. *طراحی اجزاء ماشین*، ترجمهٔ غلامرضا زارع‌پور، ویرایش نهم، دانش‌نگار، ۱۳۹۳.

[6] Georgia Institute of Technology, "Exploring Shape Memory Alloys: Smart Materials", 2007, http://www.nnin.org (accessed May 11, 2015)

[7] Wu, Ming H., L. McD. Schetky. "Industrial Applications for Shape Memory Alloys." *Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technolgies*, Pacific Grove, California, 2000, pp.171-182.

[8] Ryklina, E.P., S.D. Prokoshkin, I.Yu. Khmelevskaya, A.A. Shakhmina. "One-way and two-way shape memory effect in thermomechanically treated TiNi-based lloys." *Materials Science and Engineering*, 2008, pp.134–137.

[9] DesRoches, R., J. McCormick, M. Delemont. "Cyclic properties of shape memory alloy wires and bars, Journal of Structural Engineering." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, 2004, pp. 38-46.

پی‌نوشت

1. Shape Memory Alloys
2. Pseudoelasticity sometimes called superelasticity
3. Austenite
4. martensite
5. United States Navy (USN)
6. Nickel titanium also known as nitinol
7. silver cadmium
8. NITINOL
9. Copper Aluminum Zinc Alloy
10. Copper Aluminum Nickel Alloy
11. Nickel titanium Lead alloy
12. Nickel titanium Zirconium alloy
13. Shape Memory Effect (SME)

۱۴. استحالهٔ مارتنزیتی (Martensitic transformation) یا استحالهٔ بدون نفوذ یا استحالهٔ جابه‌جاساز اصطلاحاً به دسته‌ای از استحاله‌های فازی برشی گفته می‌شود که بدون نفوذ اتمی انجام می‌شوند [ویراستار].

15. Niobium-Nickel-Titanium (Nb-Ni-Ti)
16. stress-induced martensitic transformation
17. One-way memory effect
18. Two-way memory effect
19. National Aeronautics and Space Administration
20. Raychem Corporation, http://www.raychem.com (accessed May 11, 2015)
21. ABB (ASEA Brown Boveri), http://www.abb.com (accessed May 11, 2015)
22. CryoFit coupling
23. Tinel Lock
24. Firecheck
25. semiconductor
26. Sojourner