آلیاژهای حافظه‌دار و کاربردهای آنها در ساختارهای هوشمند

صادق بدخشان رار[۱] - دکتر سید خطیب الاسلام صدر نژاد[۲]
دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی و علم مواد
Sbadakhshan@yahoo.com

چکیده

علوم و تکنولوژی در قرن آینده به طور قطع تاثیر زیادی از مواد جدید خواهد پذیرفت. آلیاژهای حافظه‌دار(هوشمند) یکی از این مواد نو هستند که با قابلیت‌های بی‌نظیر خود، فصل جدیدی را در تکنولوژی پیشرفته، به خصوص در مورد سازه‌های هوشمند گشوده‌اند. اولین مشاهده ثبت شده در مورد پدیده حافظه‌داری در سال ۱۹۳۲ میلادی توسط چانگ و رید در آلیاژ Au-Cd انجام شد. از آن زمان به بعد این آلیاژها پس از طی یک دوران نهفتگی کاربردهای فراوانی یافتند، تا اینکه امروزه این آلیاژها در محدوده وسیعی از کاربردها از صنایع هوافضا و نظامی گرفته تا صنایع پزشکی و خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحقیقات برروی این آلیاژها در ایران از سال ۱۳۷۰ در دانشگاه صنعتی شریف شروع شد و منجر به بدست آمدن تکنولوژی ساخت این آلیاژها در داخل کشور شد. در مقاله مروری حاضر به خواص و کاربردهای این آلیاژ پرداخته شده و در مورد فعالیت‌های ساخت این آلیاژ در ایران توضیحاتی ارائه می‌شود.

تاریخچه و مقدمه‌ای در مورد آلیاژهای حافظه‌دار Ti - Ni

در سال ۱۹۶۲ در آزمایشگاه نیروی دریایی ایالات متحده آمریکا[۳] در حین عملیات حرارتی یک میله از جنس Ti-Ni با درصد اتمی برابر توسط بهلر[۴] پدیده حافظه‌داری[۵]، در این آلیاژ کشف شد[۱]. پس از مشاهده پدیده حافظه‌داری در آلیاژهای Ti-Ni تحقیقات وسیعی برروی آنها هم در بعد متالورژی آلیاژ و هم در بعد کاربردهای آن صورت گرفت و این آلیاژها به دلیل دارا بودن خصوصیات ویژه از قبیل: رفتارحافظه‌داری منحصر به فرد، مقاومت به خوردگی بالا، مقاومت ویژه الکتریکی نسبتاً بالا، ارائه رفتار فوق الاستیک[۶] و قابلیت انطباق با بدن[۷] کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف مهندسی و پزشکی پیدا کردند، تا اینکه امروزه از این آلیاژ به عنوان « راه حلی که در جستجوی مشکل است. »[۸] نام برده می‌شود.[۸] یکی از موارد کنترل کننده کاربرد این نوع آلیاژها قیمت و دشواری ساخت آنها می‌باشد، ولی در صورت توسعه دانش فنی و ایجاد امکان تولید داخلی آلیاژ، بدون شک کاربرد نایتینول به دلیل فزونی عرضه و تنزیل قیمت افزایش خواهد یافت. این آلیاژها با نام‌هایFelexon, Tinel, Nitinol, Tee-Nee, Ni-Ti-,Ti-Ni معروف می‌باشند. [۱] این اسامی فقط به آلیاژها یا ترکیبات واحد آلیاژی اشاره نمی‌کنند، بلکه معرف یک خانواده از آلیاژها

---

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شریف
۲. استاد دانشگاه صنعتی شریف

3. Naval ordnance laboratory
4. Buehler
5. Shape memoryeffect
6. Super elastic property
7. Bio compatibility
8. A Solution looking for a Problem

می‌باشند که خواص آنها به مقدار زیادی به ترکیب شیمیایی آلیاژ بستگی دارد. البته هر سازنده‌ای نامگذاری استانداردهای خاص خود را برای آلیاژهای Ti-Ni دارا می‌باشد.

کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار

کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار بطور کلی به پنج مجموعه زیر تقسیم بندی می‌شوند. [۳]

۱- کاربردهای با بازیابی آزاد[1] (استفاده از حرکت)

کاربردهایی که در آنها آلیاژ حافظه‌دار در حین سرد و گرم شدن آزادانه شکل اولیه خود را بازیابی می‌کنند، بدون آنکه یک تنش بیرونی از این کار ممانعت به‌عمل آورد و بنابراین تولید یک کرنش بازیابی می‌کنند. برای مثال در آنتن‌های سفینه‌های فضایی که پس از قرار گرفتن سفینه در فضا بدون اعمال تنش بیرونی و فقط با استفاده از گرم کردن باز می‌شوند [۹].

۲- کاربردهایی با بازیابی مقید[2] (استفاده از نیرو)

به کاربردهایی اطلاق می‌شود که در آنها نیروی خارجی جلوی بازیابی کرنش در آلیاژ را می‌گیرد. اگرچه در این کاربردها هیچ کرنشی بازیابی نمی‌شود ولی مقدار زیادی تنش ایجاد می‌شود. از این خاصیت درکاربردهایی مانند: چفت و بست‌ها و کوپلینگ‌های لوله استفاده می‌شود. این کاربرد وسیع‌ترین کاربرد آلیاژ را شامل می‌شود.[۴]

۳- کاربردهای با بازیابی تحت فشار[3] (استفاده از کار)

به کاربردهایی اطلاق می‌شود که در آنها هم تنش و هم کرنش در حین گرم کردن بازیابی شده و کار مکانیکی ایجاد شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این خاصیت در محرک‌ها[4] مورد استفاده قرار میگیرد. این محرک‌ها به دو نوع محرک‌های گرمایی و الکتریکی تقسیم می‌شوند [۵].

۴- کاربردهای ابر کشسانی (ذخیره انرژی مکانیکی)

این کاربرد بر اساس وجود درصد بسیار بالای کشسانی یا بازگشت فنری که در اکثر آلیاژهای Ti-Ni یافت می‌شود، بنیان نهاده شده است و باعث ذخیره انرژی مکانیکی می‌شود و در کاربردهایی نظیر فنرها مورد استفاده قرار میگیرد. اگرچه محدوده دمایی بروز این خاصیت کوچک است، ولی در همین محدوده آلیاژ می‌تواند رفتار الاستیک ۱۵ برابر فولادهای فنر را از خود نشان می‌دهد [۱].

۵- خاصیت میراکنندگی ارتعاشات[5]

از این خاصیت برای مهار ارتعاشات در سازه‌هایی که تحت ارتعاشات شدید قرار دارند، استفاده می‌گردد. برای مثال می‌توان به صفحات آزاد میراکننده ارتعاش در سفینه‌های فضایی اشاره کرد. همچنین می‌توان از این آلیاژها در پی ساختمان برای میراکردن ارتعاشات ناشی از زلزله استفاده کرد [۹].

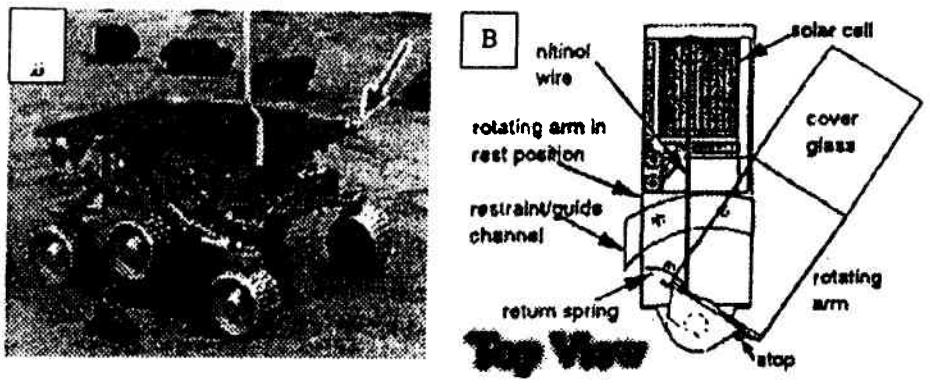
این آلیاژها به‌دلیل برتری چشمگیر نسبت به بسیاری از آلیاژها قابلیت استفاده در صنایع هوافضا، قطعات خودرو، پزشکی و ساخت عضلات مصنوعی را دارا می‌باشند. به‌کارگیری این آلیاژها برای ساخت ایمپلنت‌های[6]

---

1 . Free recovery uses
2 . Constrained Recovery
3 . Actuator uses
4 . Actuators
5 . High Capacity damping property
6 . Implants

ستخوان، سوزن‌های بخیه، و سیم‌های ارتودنسی[1] به سادگی عمل جراحی، کاهش دوره نقاهت و تسریع در التیام مار را باعث شود [۹].

یکی از زمینه‌های بسیار گسترده استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار کاربردهای هوافضا می‌باشد. برای مثال آلیاژ بتینول به عنوان یک محرک برروی سیستم مریخ نورد سفینه رهیاب مریخ[2] که توسط NASA به مریخ فرستاده د، به‌کار گرفته شده است. در شکل زیر تصویر وسیله مریخ نورد آورده شده است، که در آن مکان محرک مورد ستفاده (A) و ساختمان آن (B) نشان داده شده است.

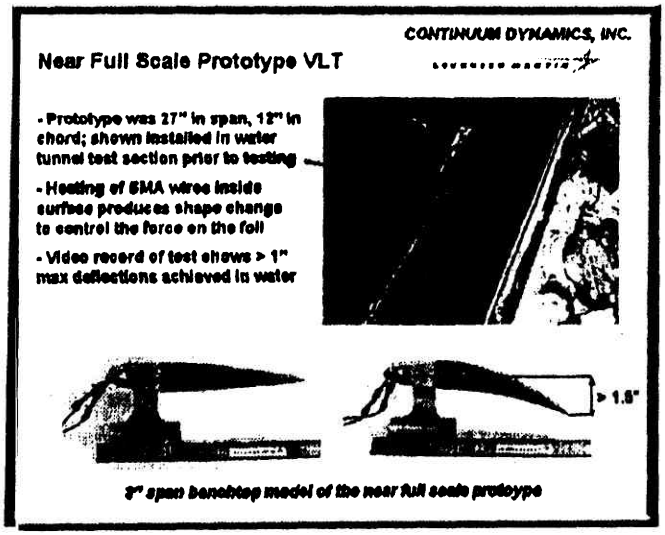


شکل ۱- سفینه رهیاب مریخ بهمراه تصویری از محرک استفاده شده در آن، که از آلیاژ Ti-Ni ساخته شده است. [۱۱]

یکی دیگر از کاربردهای مهم این آلیاژ در صنایع هوافضا و صنایع دریایی استفاده از آن در سازه‌های هوشمند می‌باشد. این سازه‌ها می‌توانند خود را با شرایط محیط وفق دهند و از جمله نتایج این موضوع می‌توان به افزایش بسیار زیاد قابلیت مانورپذیری وسائل هوایی و کاهش بسیار زیاد سطح مقطع راداری[3] آنها اشاره کرد. همچنین در وسائل دریایی استفاده از این سازه‌ها باعث کاهش قابل ملاحظه علائم آکوستیکی آنها می‌شود. یک مثال مهم در این زمینه طرح NASA برای طراحی و ساخت هواپیمایی است که می‌تواند در اتمسفر مریخ پرواز کند. این آلیاژ در بال‌های این هواپیما مورد استفاده قرار می‌گیرد. این بال‌ها به بال‌های هوشمند[4] معروف هستند. به‌دلیل شرایط کاملاً متفاوت و بعضاً ناشناخته اتمسفر مریخ طراحی مقطع بال در تونل باد برروی زمین کاری مشکل و غیردقیق می‌باشد، به همین خاطر احتیاج به بال‌هایی وجود دارد که با توجه به شرایط اتمسفر، مقطع خود را تغییر داده و خود را با محیط تطبیق بدهند. تنها گزینه موجود برای این مورد استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار در این بال‌ها می‌باشد [۶].

در شکل ۲ نمونه‌ای از این بال‌های هوشمند دیده می‌شود.

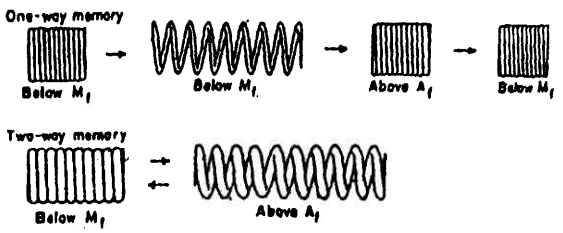
1.Orthodencies Wire
2.Mars Path finder
3.Radar cross section
4.Smart Wing



شکل ۲- نمائی از یک بال هوشمند ساخته شده از آلیاژهای حافظه‌دار [۱۲]

ماهیت خاصیت حافظه‌داری

خاصیت حافظه‌داری به صورت استاندارد به شکل پدیده‌ای است که در آن اگر یک آلیاژ دارای خاصیت حافظه‌داری را در دمای پایین تغییر شکل داده و آنرا تا بالای دمای استحاله مارتنزیت[1] به فاز مادر[2] (فاز استنیت[3]) حرارت دهیم، این آلیاژ به شکل اولیه قبل از تغییر شکل باز می‌گردد.[۷] بر این اساس خاصیت حافظه‌داری به دو دسته عمده تقسیم می‌شود. در دسته اول تغییر شکل ایجاد شده فقط با گرم کردن به حالت اولیه قبل از تغییر شکل باز می‌گردد و اگر جسم را دوباره سرد کنیم، تغییری در شکل آن حاصل نمی‌شود . که به این خاصیت حافظه‌داری یک طرفه[4] اطلاق می‌شود. دسته دوم از آلیاژها قادرند با سرد و گرم شدن در محدوده معین از دما دوباره به حالت قبل خود برگردند که به این خاصیت حافظه‌داری دو طرفه[5] گفته می‌شود. در شکل زیر این خاصیت دیده می‌شود.



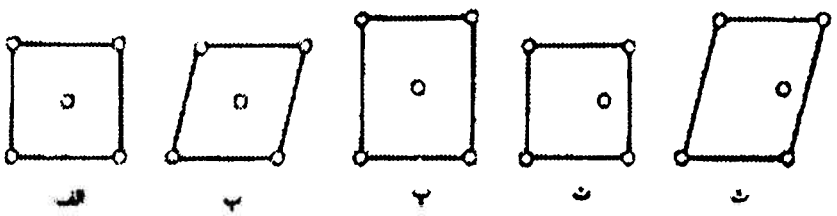
شکل ۳- پدیدهٔ حافظه‌داری یکطرفه و دوطرفه [۸]

اساس پدیده حافظه‌داری بر مبنای استحاله فازی مارتنزیت به استنیت[6] می‌باشد. در تغییر حالت مارتنزیتی هر اتم تمایل دارد اتم مجاورش را حفظ کند. بنابراین ماهیت تغییر حالت مارتنزیتی از نوع جابجایی اتم‌ها درکنار

1.Martensite phase
2.Parent phase
3.Austenite phase
4.One way shape memory effect
5.Two way shape memory effect
6.Martensite to Austenite transformation

یکدیگر می‌باشد. این جابجایی به موازات صفحه‌ای ثابت که صفحه رابط[1] نامیده می‌شود اتفاق می‌افتد. حرکت اتم‌ها در این حالت شامل یک کرنش برشی[2] به موازات صفحه رابط و کرنش انبساطی[3] عمود بر صفحه رابط می‌باشد. البته همواره کرنش‌های برشی به موازات صفحه رابط نیستند ولی باید به یاد داشت صفحات رابط همواره ثابت مانده و دچار اعوجاج نمی‌شوند [۷].

در شکل زیر حرکت اتم‌ها در تغییر حالت مارتنزیتی نشان داده شده است.



شکل ۴- تغییر آرایش اتم‌ها در حین استحاله مارتنزیتی . حالت‌های ب و پ به ترتیب کرنش‌های برشی و انبساطی را نشان می‌دهد. [۷]

فاز مارتنزیت در آلیاژ حافظه‌دار Ni-Ti از نوع مارتنزیت ترمو الاستیک[4] می‌باشد. این فاز با دو خصوصیت عمده لغزنده بودن[5] و انرژی کم فصل مشترک[6] آن با فاز مادر شناسایی می‌شود که با تغییرکوچکی در دما یا تنش، تغییر کرده و حرکت می‌کند. همین موضوع یکی از دلایل برگشت پذیر بودن تغییر حالت مارتنزیت ترموالاستیک می‌باشد [۷]. با سرد کردن این آلیاژ بسته‌های مارتنزیتی شروع به رشد کرده و ضخیم می‌شوند و در موقع گرم کردن این بسته شروع به کوچک شدن می‌کنند تا دمای خاتمه استحاله استنیتی به طور کلی ناپدید می‌شوند.

ساخت آلیاژ

ساخت آلیاژ توسط روش ذوب و ریخته‌گری، با توجه به امکانات موجود، با استفاده از چهار روش زیر انجام شد، تا پارامترهای موجود در هر روش با روشهای دیگر مقایسه شود و بتوان روش تولید در مقیاس صنعتی را به‌دست آورد. این چهار روش عبارت بودند از:

۱- ذوب در کوره القائی فرکانس متوسط تحت خلاء

۲- ذوب در کوره القائی فرکانس بالا تحت خلاء

۳- ذوب در کوره مقاومتی تحت خلاء

۴- ذوب در کوره مقاومتی تحت اتمسفر گاز خنثی

در میان این روش‌ها روش ذوب در کوره القائی تحت خلاء بهترین نتایج را از نظر ایجاد خواص مناسب حافظه‌داری در نمونه‌ها ایجاد کرد که در ادامه مشخصات این روش شرح داده خواهد شد.

1.Habit Plane
2.Shear strain
3.Expansion strain
4.Thermoelastic Martensite
5.Gllissile boundary
6.Low energy boundary

ذوب در کوره القائی فرکانس متوسط تحت خلا

۱۰ شمش با مقاطع مستطیل شکل و گرد توسط کوره القائی فرکانس متوسط تحت خلاء متعلق به سازمان انرژی اتمی ایران ذوب آلیاژسازی و ریخته‌گری گردیدند. مشخصات این کوره به قرار زیر می‌باشد.

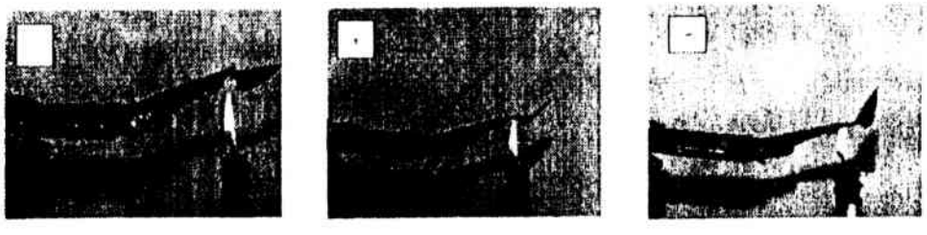
جدول ۱- مشخصات کوره القائی فرکانس متوسط تحت خلاء

شرکت سازنده	Leybold AG
فرکانس اسمی خروجی	4 kHz
ولتاژ اسمی خروجی	500 V
توان اسمی خروجی	60 KW
حداکثر ظرفیت	10 Kg
قابلیت ریخته گری در خلاء	دارد
بوته	گرافیت
ترموکوپل	Pt-Pt 10 Rh
عایق دور کوره	آلومینا با خلوص تجاری ۹۹ ٪
سال ساخت	۱۹۸۸

از مشخصات بسیارخوب این کوره می‌توان به خلاء مناسب آن در هنگام فرآیند ذوب و ریخته‌گری و زمان کوتاه فرآیند ذوب اشاره کرد. همچنین فرکانس متوسط کوره باعث به هم خوردن مذاب و ایجاد یک ترکیب شیمیایی یکنواخت در نمونه‌های ریختگی می‌شود. نتایج مربوطه به پدیده حافظه‌داری در قسمت زیر آورده شده است.

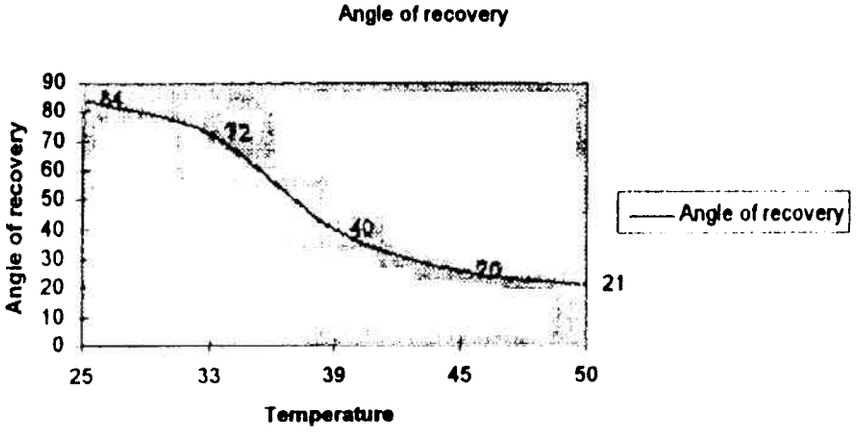
نتایج مربوط به آزمایشات خواص حافظه‌داری نمونه‌های ریختگی

در شکل ۵ تصویر بازگشت شمش ریختگی به شکل اولیه خود نشان داده شده است:



شکل ۵- تصویر بازگشت شمش ۳ به حالت اولیه براثر حرارت دادن

در این پروژه برای اولین بار در ایران، شمش‌های نیکل تیتانیوم که در حالت ریختگی از خود خواص حافظه‌داری را نشان می‌دهند، تولید شد. این موضوع در شکل ۵ به خوبی دیده می‌شود. این آلیاژها قادر بودند تا در حالت ریختگی تغییر شکل‌هایی را با زوایایی در حدود ۹۰ درجه را بازیابی کنند. در شکل زیر نمودار زاویه برگشت برحسب دما برای یکی از نمونه‌های ریختگی آورده شده است.



شکل ۶- نمودار مقدار بازگشت آلیاژ شماره ۳ (برحسب درجه بازگشت) برحسب دما

بر مبنای این نمودار دمای شروع تغییر حالت آلیاژ یعنی دمایی که زاویه بازیابی در آن افزایش ناگهانی پیدا می‌کند، دمایی در حدود ۴۵ درجه سانتیگراد برآورد می‌شود.

مراجع

1.L.kufamn, "Shape memory effect in alloy", Plenium Press, 1975

2.Glossary of terms used in shape memory alloys, JIS-H-7001, 1989

3.W.Van Moorleghem, M.Chandrasekaran, "Design element for shape memory alloys", Advanced material 93, elsevier science, 1994, p1143

4.Jan Van Humbeeck, "Non medical applications of shape memory alloys", Mat. Sci Eng, A, Vol. 273, p137

5.T.W.Duering, A.PELTON, "An overview of nitinol medical applications", Mat. Sci. Eng., A, Vol.273,P 149

6.T.W.Duering, R.A.Pelton, "Ni-Ti Shape Memory Alloy", Material Properties Handbook.: Titanium Handbook, ASM International, USA, 1994

۷- دیوید آپورتر، کنت ایسترلینگ، دگرگونی فازها در فلزات و آلیاژها، ترجمه ابوالقاسم دهقان، انتشارات دانشگاه شیراز ۱۳۷۸ صفحه ۵۵۸

۸- رضا شرفی مشتقین، "ساخت آلیاژ حافظه‌دار نیکل- تیتانیوم به روش ذوب و ریخته‌گری و بررسی خصوصیات متالورژیکی آن، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۴

9.W.Van Moorleghem, M. Chandrasekaran, "Design element for shape memory alloys", Advanced material 93, elsevier science, 1994, p1143

10.www. Robostore. Com, 2002

11.www. Northrop. Com, 2002