

به نام خدا



# مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

[www.Iran-mavad.com](http://www.Iran-mavad.com)



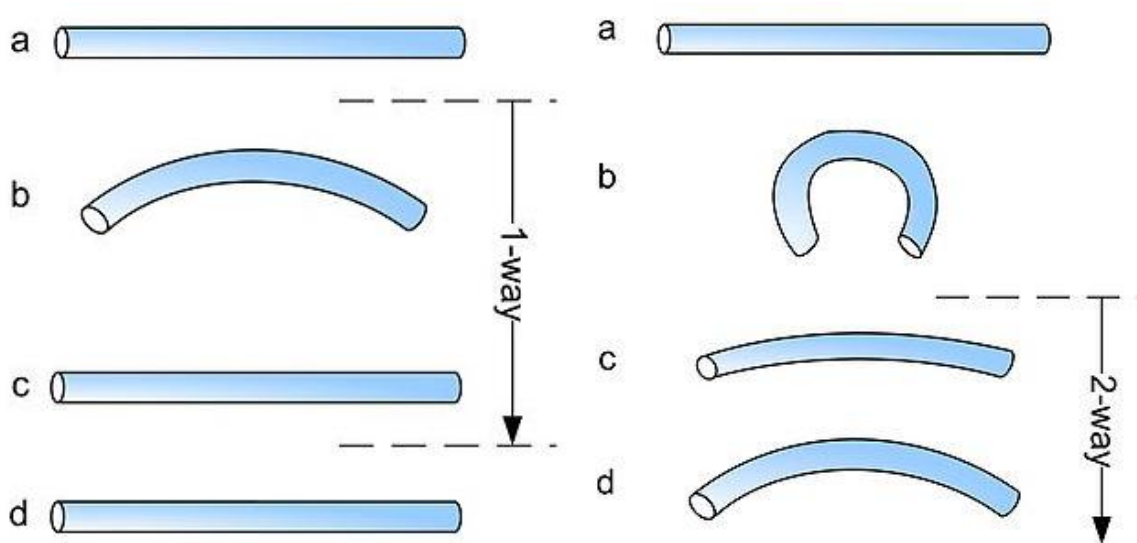
آلیاژ حافظه‌دار (Shape Memory Alloy) به آلیاژهایی گفته می‌شود که خواص ترمومکانیکی قدرتمندی همراه با تغییر ناگهانی در ساختار شبکه خود از طریق استحاله مارتنزیتی فعال شده توسط تنش یا دما نشان می‌دهند [۱].

### خواص :

آلیاژ حافظه‌دار خواص متفاوتی دارند. دو خاصیت معمول در این آلیاژها :

- حافظه‌داری یک‌طرفه
- حافظه‌داری دو‌طرفه

میباشد. تصویر شماتیک این دو اثر را در شکل زیر ملاحظه می‌فرمایید :



یکی دیگر از خواص این آلیاژ سوپرالاستیسیته می‌باشد که آلیاژ به محض باربرداری به شکل اولیه اش باز می‌گردد. بنابراین در این حالت برای رسیدن به شکل اولیه نیازی به اعمال حرارت نمی‌باشد.

### سیستم‌های معمول :

تاکنون خواص حافظه‌داری در چند سیستم آلیاژی دیده شده است اما اکثر آنها هنگام فعالسازی نیرو یا کرنش بالایی ایجاد نمی‌کنند. دو سیستم آلیاژ حافظه‌دار عمده که هنگام فعالسازی توانایی ایجاد نیروی بالایی در آنها مشاهده شده است، عبارتند از سیستم‌های بر پایه مس [۲] (مثلاً Cu-Sn ، Cu-Zn ، Cu-Al) و سیستم‌های بر پایه Ni-Ti [۳] (مثلاً نایتینول). خواص حافظه‌داری سیستم‌های سه‌تایی بسیاری بر پایه این سیستم‌های دوتایی بررسی شده است.

### کاربردها :

یکی از اولین کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار در مقیاس انبوه، استفاده در اتصالات لوله‌های هیدرولیک اف-۱۴ بود [۴].

اما پزشکی اولین زمینه‌ای است که آلیاژهای حافظه‌دار در آن کاربردهای زیادی یافتند. علت این امر مناسب بودن دمای بدن برای عملکرد آلیاژهای حافظه‌دار در ناحیه شبه‌الاستیک است. کاربردهای پزشکی آلیاژهای حافظه‌دار شامل استنت‌ها [۵]، فیلترها، سیم‌های هادی آنژیوپلاستی [۶] و گیره‌ها هستند [۷، ۸، ۹].

#### منابع:

1. A. Sadjadpour and K. Bhattacharya, *A micromechanics inspired constitutive model for shape-memory alloys: the one-dimensional case*, Smart Materials and Structures, 16 (2007) S51–S62. doi:10.1088/0964-1726/16/1/S06
2. C.Y. Chung, C.W.H. Lam, *Cu-based shape memory alloys with enhanced thermal stability and mechanical properties*, Material Science and Engineering A, Vol. 273 (1999) pp. 622-624. doi:10.1016/S0921-5093(99)00335-4
3. Y.B. Xu, R.J. Wang, Z.G. Wang, *In-situ investigation of stress-induced martensitic transformation in the Ti-Ni shape memory alloy during deformation*, Materials Letters, Vol. 24 (1995) pp.355-358. doi:10.1016/0167-577X(95)00127-1
4. J. V. Humbeeck, *Non-medical applications of shape memory alloys*, Materials Science and Engineering: A, vol. 273-275, pp. 134–148, 1999. doi:10.1016/S0921-5093(99)00293-2
5. Stents
6. angioplasty guidewires
7. T. Duerig, A. Pelton, and D. Stockel, *An overview of Nitinol medical applications*, Materials Science and Engineering: A, vol. 273–275, pp. 149–160, 1999. doi:10.1016/S0921-5093(99)00294-4
8. J. Haasters, G. Bensmann, and A. Pon, *Applications of the memory alloy NiTi as an implant material*, Mater . Sci. Implant Orthop. Surg, vol. 116, pp. 117–124, 1986.
9. M. Thier, *Shape-memory alloys for implants, instruments and external applications in medicine; uses and chances in the future*, Metall. (Berlin), vol. 44, no. 1, pp. 29–33, 1990.

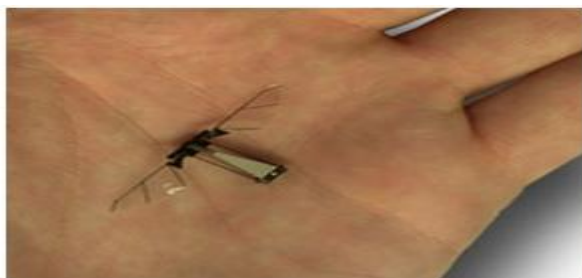
---

#### تاریخچه‌ی آلیاژهای حافظه‌دار

با گذشت زمان، علم و فناوری، تأثیر زیادی از مواد پیشرفته و جدید پذیرفته و در آینده نیز، بیش از پیش، تأثیر خواهد پذیرفت. در این میان، آلیاژهای حافظه‌دار، جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده‌اند. این دسته

از مواد، با قابلیت‌های بی‌نظیری که تاکنون از خود بروز داده‌اند، فصل جدیدی را در فناوری پیشرفته و روز دنیا گشوده‌اند.

اولین مشاهدات ثبت‌شده در مورد پدیده‌ی حافظه‌داری به سال ۱۹۳۲ میلادی و در مورد آلیاژ Au-Cu بر می‌گردد. در سال ، Cu-Zn در آلیاژ، ۱۹۳۸ پیدایش و پس از آن، از بین‌رفتن یک فاز معین در اثر کاهش و افزایش دما، گزارش شد. در نهایت، پایه و اساس رفتار حافظه‌داری و ترموالاستیک (کشسانی حرارتی) بین سال‌های ۱۹۴۹ تا ۱۹۵۱ تشریح و تفسیر گردید. از آن زمان به بعد، این آلیاژها، به‌مرور، کاربردهای فراوانی یافتند، تا این‌که امروزه، ردپای این آلیاژها را در صنایع هوافضا تا صنایع پزشکی، خودروسازی و رباتیک، به‌وضوح می‌توان مشاهده‌نمود. در شکل زیر، می‌توانید نظاره‌گر دو نمونه از کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار باشید.



شکل ۲



شکل ۱

۱: استنت، نمونه‌ای از کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار در علم پزشکی؛ ۲: ربات ۶۰ میلی‌گرمی پرنده، نمونه‌ای از کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار در علم رباتیک.

### بررسی رفتار آلیاژهای حافظه‌دار

آلیاژهای حافظه‌دار به دسته‌ای از آلیاژها گفته می‌شود که قادرند تغییر شکل و کرنش‌های دائمی که بر آنها اعمال می‌شود را بازیابی نموده و در نهایت، به شکل اولیه‌ی خود، بازگردند.

رفتار آلیاژهای حافظه‌دار، براساس یک دگرگونی فازی و تغییر ساختار بلوری رخ می‌دهد که در آن، آلیاژ، از یک ساختار مستحکم و پایدار در دمای بالاتر (آستنیت)، به یک ساختار تغییرفرم‌پذیر پایدار در دمای پایین تر (مارتنزیت)، تبدیل می‌گردد. به‌طور خلاصه، خاصیت حافظه‌داری، به‌صورت استاندارد، به پدیده‌ای گفته می‌شود که در آن، یک آلیاژ را در دمای پایین، تغییر شکل داده و این آلیاژ تغییرشکل‌یافته را به‌منظور تغییر فاز و رساندن آن به فاز مادر (فاز آستنیت) و متعاقباً، به شکل اولیه، حرارت داده و آن را به همان شکل قبل از تغییر شکل باز، می‌گردانند.

بر این اساس، خاصیت حافظه‌داری، به دو دسته‌ی عمده تقسیم می‌شود:

در دسته‌ی اول، تغییرشکل ایجادشده، فقط با گرم کردن به حالت اولیه‌ی قبل از تغییرشکل باز می‌گردد و اگر جسم را دوباره سرد کنیم، تغییر جدیدی در شکل آن مشاهده نمی‌شود که این پدیده را «حافظه‌داری

یک طرفه» نامیده‌اند. در آلیاژهایی که دارای این ویژگی می‌باشند، هدف، بازیابی شکل اولیه‌ی نمونه‌ای است که تحت بارگذاری مکانیکی قرار گرفته و تغییر شکل داده‌است.

دسته‌ی دوم از این آلیاژها، پدیده‌ی «حافظه‌داری دوطرفه» را از خود بروز می‌دهند. این آلیاژها قادرند با سرد و گرم شدن در محدوده‌ی معینی از دما، دوباره به حالت قبلی خود بازگردند؛ یعنی، در دو طرف محدوده‌ی تغییر دما، شکل مشخصی از خود به نمایش می‌گذارند. آلیاژهایی که در این گروه هستند، کاربردی متفاوت دارند؛ بدین گونه در این نوع کاربرد، نیازی به اعمال نیرو نمی‌باشد و فقط با فراهم کردن شرایط دمایی معین، در دو سر بازه‌ی دمایی تعریف شده برای آلیاژ حافظه‌دار دوطرفه، می‌توان به شکل معین و از پیش تعیین شده‌ای برای این دسته از آلیاژها رسید. با اصلاح میکروساختار آلیاژهای حافظه‌دار دوطرفه، می‌توان به خواص پایداری رسید. به طور مثال، تربیت آلیاژهای حافظه‌داری که دارای استحکام بالاتری می‌باشند (دانه‌های ریزتر) به منظور رسیدن به خاصیت حافظه‌داری دوطرفه، کار دشوارتری می‌باشد.

### مقایسه‌ی گروه‌هایی از آلیاژهای حافظه‌دار

از میان آلیاژهایی که رفتار حافظه‌داری را بروز می‌دهند، آلیاژهای پایه‌ی  $Ti-Ni$ ، برای کاربردهای فناورانه، به دفعات مورد استفاده واقع شده‌اند. با این حال، در کاربردهایی، از آلیاژهای پایه‌ی مس بهره گرفته و اخیراً نیز، آلیاژهای حافظه‌دار پایه‌ی  $Fe-Mn-Si$ ، برای کاربردهای صنعتی به کار گرفته شده‌اند. بدون شک، آلیاژهای پایه‌ی  $Ti-Ni$ ، با وجود اثر حافظه‌داری مطلوبی که از خود نشان می‌دهند، هزینه‌ی بالای آن‌ها، از به کارگیری بسیار زیاد آن برای استفاده‌های عملی، جلوگیری می‌کند.

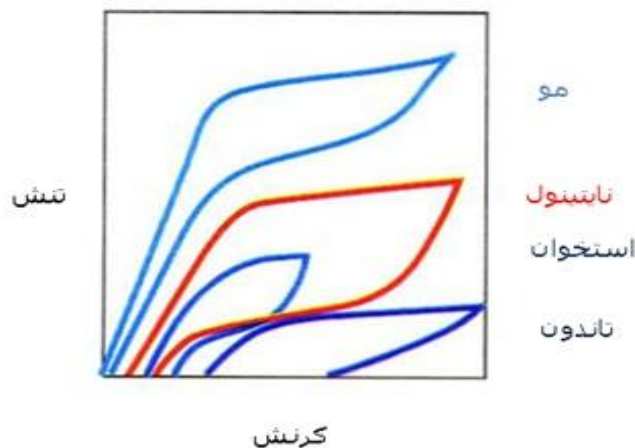
در این میان، آلیاژهای حافظه‌دار پایه‌ی آهن، عموماً ارزان تر هستند و در دهه‌ی گذشته، به عنوان یک گزینه برای جانشین شدن به جای آلیاژهای حافظه‌دار پایه‌ی  $Ti-Ni$ ، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. به طور کلی، آلیاژهای پایه‌ی آهن، دارای ۴ خصوصیت مهم ذیل هستند:

- (۱) قیمت پایین
- (۲) کار پذیری خوب
- (۳) ماشینکاری خوب
- (۴) جوش پذیری خوب

### نایتینول

همان طور که گفته شد، یکی از آلیاژهایی که امروزه در میان گروه‌های مختلف آلیاژهای حافظه‌دار، نظیر آلیاژهای حافظه‌دار پایه‌ی مس و پایه‌ی آهن، در صنایع مختلف، کاربردهای فراوانی یافته، «نایتینول» است. در دهه‌ی ۱۹۶۰، بهلر و همکارانش، در آزمایش‌های خود، ویژگی حافظه‌داری را در آلیاژ نیکل-تیتانیوم با نسبت اتمی معادل، کشف نمودند. دلیل انتخاب این اسم (**Nitinol**) برای آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیوم (**Nickel-Titanium**)، آن بود که این آلیاژ، برای اولین بار، در آزمایشگاهی به نام (**Naval Ordnance**)

Laboratory شناسایی شد. نایتینول، به دلیل ویژگی‌های مطلوبی که از خود به‌معرض نمایش گذاشت، به‌زودی کاربردهای خاص خود را در علم پزشکی پیدا کرد. همان‌گونه که از «شکل ۳» مشخص است، نایتینول، رفتار مکانیکی بسیار مشابهی با اعضای بدن از خود نشان می‌دهد.



«شکل ۳»

استنت‌هایی که به‌وسیله‌ی فولادهای زنگ‌نزن و یا آلیاژهای پایه‌ی کبالت، به‌طور رایج، مورد استفاده قرار می‌گیرند، تنها قادرند در حدود ۱٪ از کرنشی که توسط نیرو به آن‌ها اعمال شده‌است را بازیابی کنند؛ در صورتی که این مقدار، در مقایسه با کرنشی که مواد طبیعی (استخوان، تاندون و...) قادر به بازیابی آن هستند (در حدود ۱۰٪)، ناچیز است. با مقایسه‌ی این اعداد و شکل شماره‌ی ۳، می‌توان دلیل افزایش کاربرد نایتینول را در علم پزشکی دریافت.

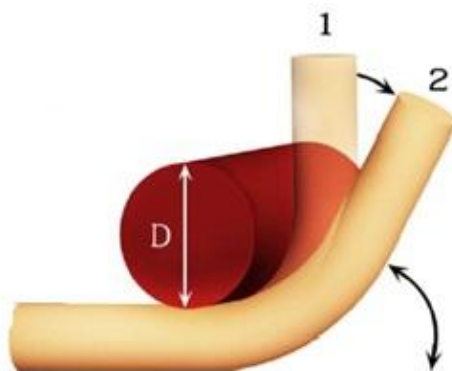


شکل ۴: کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار در پزشکی، به‌عنوان استنت

#### آلیاژهای حافظه‌دار پایه مس :

گروهی دیگر از آلیاژهای حافظه‌دار، آلیاژهای حافظه‌دار پایه‌ی مس هستند. آلیاژهای حافظه‌دار پایه‌ی مس، از جمله آلیاژهای حافظه‌دار تجاری متداول می‌باشند. این آلیاژها، باتوجه به خواص منحصربه‌فرد خود، در

بسیاری از صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله مزایای آلیاژهای حافظه‌دار پایه‌ی مس، می‌توان به دمای کاری بالا، قیمت پایین‌تر و راحت‌تر بودن فرآیند تولید در مقایسه با آلیاژهای حافظه‌دار نایتانول اشاره کرد. مهم‌ترین کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار پایه‌ی مس، در حسگرها و محرک‌ها می‌باشد.



«شکل ۵»

از میان آلیاژهای حافظه‌دار تجاری پایه‌ی مس، آلیاژ  $\text{Cu-Al-Ni}$ ، یکی از پرکاربردترین آن‌ها است. از این رو، شناخت و توسعه‌ی روش‌های تولید این آلیاژ که از لحاظ اقتصادی به‌صرفه بوده و خواص مطلوبی ایجاد نمایند، ضروری به‌نظر می‌رسد. یکی از چالش‌های اصلی پیش پای آلیاژهای حافظه‌دار، به‌خصوص آلیاژهای حافظه‌دار پایه‌ی مس، مشکل بودن روش تولید آن‌هاست. حجم کم سرمایه‌گذاری، دسترسی به آلیاژ همگن، کاهش مصرف انرژی، ساخت قطعه با کمترین هزینه، سرعت بالای تولید و به‌حداقل رساندن آلودگی، متغیرهای تعیین‌کننده‌ای هستند که روی انتخاب روش تولید این آلیاژها اثر می‌گذارند.

#### مقایسه برخی روش‌های تولید آلیاژهای حافظه‌دار پایه‌ی مس :

به‌طور کلی، دو روش برای تولید آلیاژهای حافظه‌دار پایه‌ی مس، متداول‌تر هستند: روش ریخته‌گری و روش متالورژی پودر. در روش ریخته‌گری، به‌دلیل حساسیت بالای این آلیاژها به تردی در اثر درشت‌شدن دانه‌ها در فرآیندهای ریخته‌گری متداول و به‌وجود آمدن رسوبات ترد، کنترل ترکیب شیمیایی، از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. درشت‌شدن دانه‌ها و به‌وجود آمدن رسوبات، مهم‌ترین مشکلات تولید به‌روش ریخته‌گری است که می‌توانند باعث کاهش خواص حافظه‌داری، خواص مکانیکی و خصوصاً افت شدید داکتیلیته گردند. هرچند که ریخته‌گری این دسته از آلیاژها، مزایایی مانند کاهش هزینه‌ها و قابلیت تولید قطعاتی با شکل‌های پیچیده‌تر را دارد، اما معایب روش ریخته‌گری، باعث مورد توجه قرارگرفتن روش‌هایی مانند روش ریخته‌گری چرخشی و یا استفاده از متالورژی پودر در سال‌های اخیر شده‌است.

#### کاربردهای مختلف آلیاژهای حافظه‌دار :

در این قسمت، به کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار اشاره می‌شود که به‌طور کلی، به پنج مجموعه تقسیم‌بندی شده‌است:



### ۱- کاربردهای با بازیابی آزاد (استفاده از حرکت) :

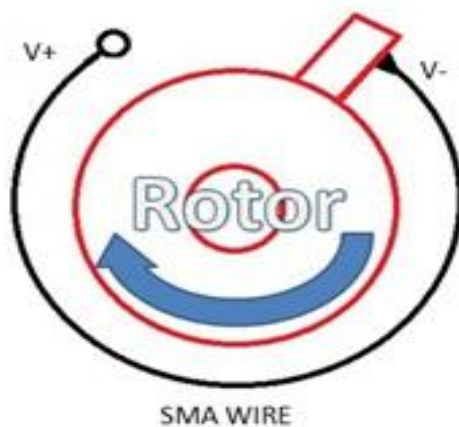
کاربردهایی که در آن‌ها، آلیاژ حافظه‌دار در حین سرد و گرم‌شدن، آزادانه شکل اولیه خود را بازیابی می‌کند، بدون آن‌که یک تنش بیرونی، از این کار ممانعت به‌عمل آورد و بنابراین، تولید یک کرنش بازیابی می‌کند. برای مثال، در آنتن‌های سفینه‌های فضایی که پس از قرارگرفتن سفینه در فضا، بدون اعمال تنش بیرونی و فقط با استفاده از گرم‌کردن، باز می‌شوند.

### ۲- کاربردهایی با بازیابی مقید (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، در کاربردهایی مانند چفت‌ها و بست‌ها و کوپلینگ‌های لوله استفاده می‌شود. این کاربرد، وسیع‌ترین کاربرد برای این آلیاژ را شامل می‌شود.

### ۳- کاربردهای با بازیابی تحت فشار (استفاده از کار) :

به کاربردهایی اطلاق می‌شود که در آن‌ها، هم تنش و هم کرنش در حین گرم‌کردن بازیابی شده و کار مکانیکی ایجادشده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این خاصیت، در محرک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این محرک‌ها، به دو نوع محرک‌های گرمایی و الکتریکی تقسیم می‌شوند.



«شکل ۶»

در «شکل ۶»، مصداقی از کاربرد یک سیم از جنس آلیاژ حافظه‌دار را می‌توان مشاهده نمود که با تغییر دمای ناشی از مقاومت سیم در برابر جریان و بسته به شرایطی که برای سیم حافظه‌دار تعریف شده‌است، سیم در محدوده‌ی معینی، انبساط و انقباض می‌یابد.

### ۴- کاربردهای ابرکشسانی (ذخیره‌ی انرژی مکانیکی) :

این کاربرد، بر اساس وجود درصد بسیار بالای کشسانی یا بازگشت فنری که در اکثر آلیاژهای Ti-Ni یافت می‌شود، بنیان نهاده شده‌است و باعث ذخیره‌شدن انرژی مکانیکی می‌شود و در کاربردهایی نظیر



فنرها، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگرچه محدوده‌ی دمایی بروز این خاصیت کوچک است، ولی در همین محدوده، آلیاژ می‌تواند رفتار الاستیکی معادل ۱۵ برابر فولادهای فنری را از خود نشان دهد.

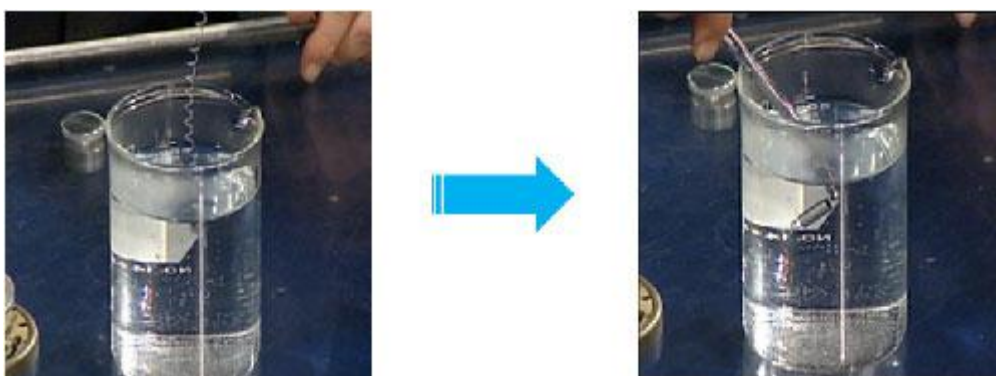
#### ۵- خاصیت میراکنندگی ارتعاشات :

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

---

آلیاژ حافظه‌دار گروهی از آلیاژهای فلزی هستند که این توانایی را دارند که اگر آن‌ها را تا بالای دمای ویژه‌ای گرم کنیم، قادر به بازیابی شکل اولیه خود خواهند بود. که می‌توان از آن برای انجام آزمایشات سرگرم‌کننده استفاده کرد. به عنوان مثال اگر شما یک فنر فلزی معمولی را از دو طرف بکشید تا صاف شود، راهی برای

بازگشت فنر به شکل اولیه وجود ندارد. در حالی که یک فنر ساخته شده از فلز حافظه‌دار می‌تواند به راحتی به فرم مارپیچ خود با حرارت دادن تا دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد (توسط آب داغ یا هوای داغ تولید شده توسط سشوار) تبدیل شود (شکل ۱). فلز حافظه‌دار را می‌توان با یک نوار لاستیکی مقایسه کرد که می‌تواند به طور قابل توجهی کشیده شود بدون اینکه از شکل خارج شود. وقتی فنری از فلز حافظه‌دار ساخته می‌شود، قابلیت کشش و انبساط دارد و شبکه‌ی کریستالی قابل تغییر است بدون اینکه خراب شود. وقتی فنر تا دمای خاصی حرارت داده می‌شود، اتم‌های شبکه‌ی کریستالی مجدداً نظم و ترتیب اولیه‌ی خود را به دست می‌آورند و فنر مارپیچ می‌شود. به عبارت دیگر فنر شکل اولیه‌ی خود را به یاد می‌آورد.



شکل ۱

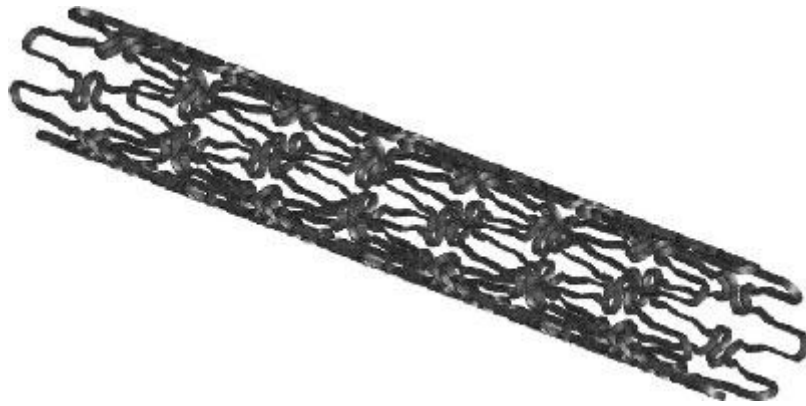
در سال ۱۹۶۵، اولین سری از آلیاژ فلزی از نیکل و تیتانیوم توسط ناول اوردننس (Naval Ordnance) ساخته شد. که این آلیاژها را نایتینول نامیدند. نام این آلیاژ، از حرف اول Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory (Nitinol) گرفته شده است. این دسته از آلیاژها خواص منحصر به فردی دارند. آن‌ها شکل خود را به حافظه می‌سپارند. این خاصیت هوشمندانه ناشی از توانایی ماده در برابر تغییر فاز است.

### کاربردهای آلیاژ حافظه‌دار

استخوان‌های شکسته می‌توانند با آلیاژهای حافظه‌دار بهبود پیدا کنند. ورق آلیاژ دارای حافظه‌ی انتقال دما است که نزدیک به دمای بدن است و به هر دو سر استخوان شکسته متصل می‌شود. بر اثر حرارت بدن، ورق تمایل دارد تا منقبض شود تا شکل اولیه‌ی خود را حفظ کند. بنابراین یک نیروی تراکمی را به استخوان شکسته در قسمت ترک یا شکستگی اعمال می‌کند. بعد از اینکه استخوان شکسته التیام می‌یابد، ورق‌های حافظه‌دار به طور مداوم با اعمال نیروی فشرده سازی باعث تقویت استخوان‌ها در مدت توانبخشی می‌شوند. آلیاژهای حافظه‌دار همچنین به جای مفصل ران هم کاربرد دارند که ناشی از قابلیت ارتجاعی بسیار بالای (سوپرالاستیسیته) آن است.



در گرفتگی رگ های خونی، یک نوع لوله از جنس آلیاژ حافظه‌دار به صورت فشرده داخل رگ تنگ، قرار می‌گیرد، فلز حافظه‌دار یک حافظه‌ی انتقال دما را نزدیک به دمای بدن دارد، بنابراین فلز حافظه‌دار منبسط می‌شود تا رگ‌های خونی را باز کند.

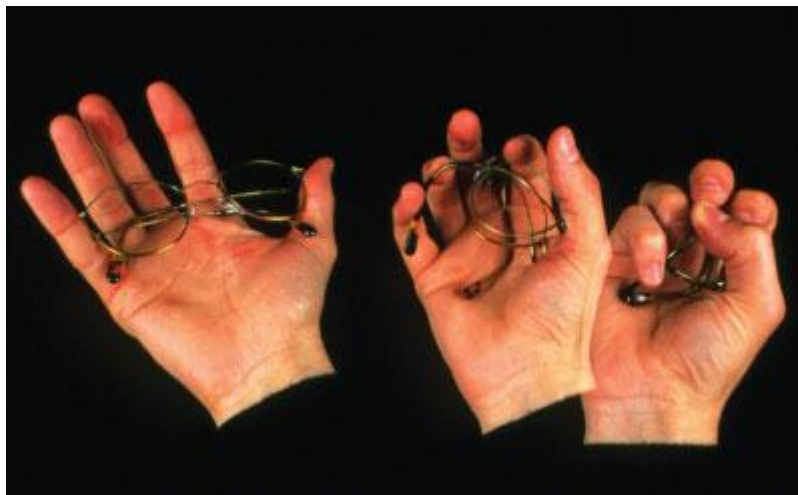


استفاده از آلیاژ حافظه‌دار در ارتودنسی دندان، شکل دیگری از قابلیت‌های آن است. سیم‌های ارتودنسی از جنس  $Ni-Ti$  وقتی در دمای ثابتی هستند شکل خود را حفظ می‌کنند، و به دلیل قابلیت سوپرالاستیسیته‌ی این فلز، سیم‌ها، شکل اولیه‌ی خود را بعد از تکرار فشار و حذف آن دوباره به‌دست می‌آورند.

انتخاب دما و کنترل سیستم دمایی آب در حمام و دوش آب، نیز یکی دیگر از کاربرد آلیاژ حافظه‌دار است. آلیاژهای حافظه‌دار می‌توانند برای محدود کردن جریان آب از طریق واکنش در برابر تغییرات دمایی، طراحی شوند. که این امر از سوخته شدن با آب داغ جلوگیری می‌کند. فلزات حافظه‌دار این امکان را نیز فراهم می‌کنند که آب، در دمای مناسب جریانش را از سر بگیرد.

خطوط و لوله‌های حامل گاز و یا سیالات سمی یا اشتعال پذیر بایستی به دلیل جلوگیری از حوادث فاجعه آفرین، به شدت کنترل شوند. بنابراین سیستم‌های کنترلی می‌توانند توسط آلیاژهای حافظه‌دار برنامه‌دار شوند تا به محض افزایش دما خاموش شوند. که این امر تا حدود زیادی می‌تواند از مشکلات احتمالی در صنایعی نظیر پتروشیمی، گاز، داروسازی و ... بکاهد.

در آگهی‌های تجاری خاص، شرکت‌های سازنده‌ی عینک، نشان می‌دهند که قاب یا فریم‌های عینک می‌توانند خم و کج بشوند و مجدداً به حالت اول خود بازگردند که در واقع این فریم‌های عینک از فلزات حافظه‌دار با خاصیت سوپرالاستیسیته ساخته شده‌اند.



نویسنده: عاطفه قویدست- دانشجوی دکتری شیمی آلی- دانشگاه گیلان

تاریخچه:

در سال ۱۹۳۲ مشاهدات ثبت شده درباره پدیده حافظه داری شکلی توسط Read و Change انجام شد. آنها وارون پذیری حافظه شکلی را در AuCd از طریق مطالعات فلز شناسی و تغییرات مقاومت آلیاژ، بررسی کردند.

در سال ۱۹۵۶ مشاهدات و نتایج تحقیقات مربوط به تز دکترای Horbojen در موضوع اثر حافظه دار در آلیاژ Cu-Zn منتشر شد. در سال ۱۹۶۲ Buhler و همکارانش، به بررسی پدیده حافظه داری شکلی در آلیاژ تیتانیوم و نیکل که دارای اتمهای برابر می باشند پرداختند. در این هنگام تحقیق درباره متالورژی و کاربردهای عملی اولیه آن به طور جدی آغاز شد.

در سال ۱۹۶۷ در کنفرانس Nol ، Buhler و همکارانش تحقیقات گسترده خود را بر روی Nitinol و کاربردهای تجاری فراوان در صنایع ارائه دادند. از جمله کاربردهای مطرح شده ساخت کوپلینگ توسط شرکت Raychem برای اتصال لوله های هیدرولیکی می باشد. که در صنایع هوایی و نیروی دریایی ایالات متحده و همچنین در حوزه های نفتی دریای شمال مورد استفاده قرار گرفت.

در سال ۱۹۸۰ میلادی Micheal و Hawt با انتشار مقاله ای از نتایج تحقیقات خودشان بر روی برنج آنرا به عنوان ماده جدید حافظه دار معرفی کردند.

مقدمه:

در پدیده حافظه داری، نمونه در حالت کاملاً مارتنزیتی به مقدار معینی تغییر فرم داده می شود سپس با گرم کردن نمونه و برگشت آن به حالت آستینی، شکل نمونه نیز به حالت اول خود بر گردد.



شکل (۱) سیکل حرارتی مکانیکی توصیف کننده پدیده حافظه داری شکلی

شکل (۱) چگونگی پدیده حافظه داری شکل را با تبدیل دو فاز آستنیت و مارتنزیت به یکدیگر نشان می دهد. بررسی بر روی تغییر حالت متالورژیکی نمونه جامد، تغییر آرایش اتم ها بدون هیچگونه تغییری در ترکیب شیمیایی فاز زمینه را نشان می دهد. این تغییر آرایش منجر به ایجاد ساختار کریستالی فاز جدید و پایدار می شود. پیشرفت تغییر حالت بدون نیاز به حرکت و جابجایی اتمها به صورت مجزا، را می توان مستقل از زمان دانست و به همین دلیل می توان وابستگی دما را به عنوان تنها عامل پیشرفت این تغییر نشان داد.

### ۱- تغییر حالت های مارتنزیتی و پدیده حافظه دار شدن :

تغییر حالت متالورژیکی جامدات از دو طریق زیر امکان پذیر است.

(۱) حرکت و جابجایی اتم ها وابسته به درجه حرارت و زمان با تغییر در ترکیب شیمیایی فاز جدید نسبت به زمینه قبلی.

(۲) تغییر آرایش اتمی به صورت هماهنگ وابسته به دما و بدون وابستگی به زمان و هیچگونه تغییری در ترکیب شیمیایی فاز جدید نسبت به زمینه قبلی.

تغییر حالت های مارتنزیتی به طریقه دوم مرتبط است و دارای مشخصات زیر است:

۱. تغییر مکان به صورت شبه برشی می باشد و در آن اتم ها به صورت هماهنگ و گروهی جابجا می شود .

۲. دیفوزیون اتمی در آن اتفاق نمی افتد .

رفتار حافظه دار شدن کاملاً به مشخصه اول مرتبط بوده و نظم اتم های آلیاژ نباید به هم بخورد .

## ۲- کریستالوگرافی مارتنزیتی :

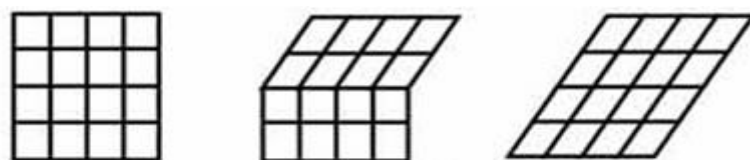
تغییر حالت تبدیل آستنیت به مارتنزیت از لحاظ کریستالوگرافی در سه مرحله قابل بررسی است.

(۱) تغییر فرم شبکه ای

(۲) برش ناهمگن

(۳) دوران شبکه ای

فرآیند تبدیل آستنیت به مارتنزیت در مرحله تغییر فرم شبکه ای در شکل ۲ نشان داده شده است . در این مرحله اتم ها با جابه جایی جزئی و هماهنگ، پیشروی فصل مشترک از هر لایه اتمی را موجب می شوند .



شکل ۲، (الف) فاز کاملاً آستنیتی ، (ب) عبور فصل مشترک از

هر لایه اتمی ، (ج) نمایش جابجایی جزئی اتمها.

باید توجه داشت پدیده حافظه داری بدون تغییر حجم و تغییر شکل امکان پذیر بوده و برش ناهمگن توجیه کننده این مطالب می باشد .

برش ناهمگن در مارتنزیت به دو طریق امکان پذیر است:

(۱) مکانیزیم لغزش یافتن صفحات اتمی

(۲) مکانیزیم تشکیل دوقلویی ها



الف

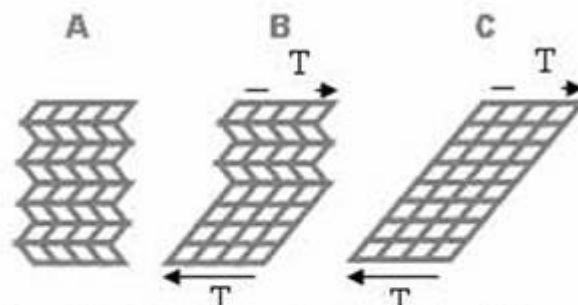
ب

شکل ۳- الف) مکانیزیم افزایش یافتن صفحات اتمی  
ب) مکانیزیم تشکیل دوقلویی

تصاویر نشان داده شده چگونگی انطباق فاز مارتنزیت بر فاز آستنیت را در هنگام جابجایی جزئی و گروهی اتمها با حفظ شبکه کریستالی نشان می دهد .

باید توجه داشت که لغزش صفحات اتمی به علت شکسته شدن باند های اتمی بعنوان مکانیزیم تغییر فرم پلاستیک دائم محسوب می شود، در صورتی که در مکانیزیم دو قلویی به علت انرژی پایین مرز دوقلویی و

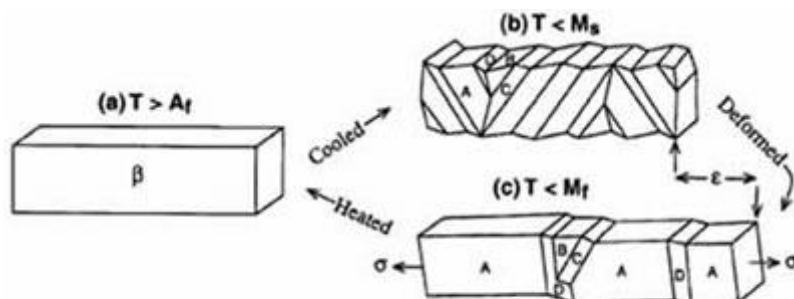
برخورداری از تحرک و لغزندگی نسبی تغییر فرم غیر دائم است. در آلیاژهای حافظه دار، کرنش های ناشی از تغییر حالت در اثر تشکیل یک جفت از دوقلویی های دو طرف مرز ذخیره سازی می شوند و برای برگشت پذیری از آن استفاده می شود.



شکل 4 - (A) تشکیل دوقلویی (B) حرکت واریانت ها و حذف واریانت های مقابل با اضافه شدن تنش (C) حذف و تبدیل نهایی واریانت ها به یک واریانت و تغییر شکل کامل

شکل 4 مرز دوقلویی را نمایش می دهد و هر یک از دوقلویی های دو طرف مرز دوقلویی یک واریانت را شامل می شود. در صورت وارد کردن تنش برشی به مرز دوقلویی باعث حرکت یکی از واریانت ها شده و واریانت دیگری حذف می شود. (شکل 4، B) این روند می تواند تا تبدیل تمامی واریانت به یک واریانت واحد ادامه یابد (شکل 4، C)

بررسی پدیده حافظه داری در تک کریستال آستینیت در شکل 5 نمایش داده شده است.



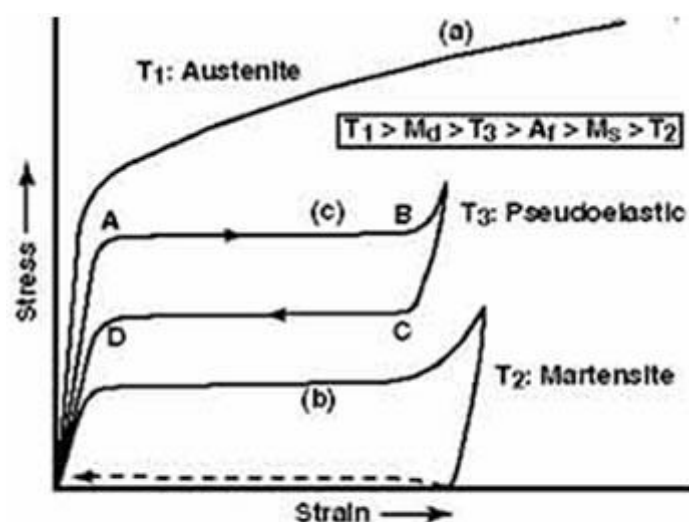
شکل 5 - (a) تک کریستال آستینیت (b) تشکیل واریانت های A، B، C، D در اثر سرد شدن نمونه زیر دمای  $M_f$  (c) رشد واریانت A در اثر حذف واریانت های دیگر

مرحله اول همانطور که از شکل پیداست بعد از سرد کردن کریستال در زیر دمای  $M_f$  واریانت های A و B و C و D تشکیل می شوند مرحله دوم با وارد کردن تنش به کریستال، واریانتها شروع به حرکت و حذف شدن می کنند تا واریانت واحد A تشکیل گردد. حین تشکیل واریانت واحد A کرنش هایی در جهت واریانت A ذخیره می شود. مرحله سوم مربوط به حرارت دادن کریستال نمونه برای تبدیل مارتنزیت به آستینیت می باشد از آنجاییکه کرنش ها تنها در جهت واریانت A ذخیره شده اند، پس تنها مسیر برای برگشت پذیری، واریانت A می باشد و نمونه به شکل اولیه خود باز می گردد.

### ۳- رفتار ترمومکانیکی:



آلیاژ های حافظه دار در درجه حرارت های مختلف دارای خصوصیات مکانیکی بسیاری می باشند در شکل ۶ منحنی های ساده تنش - کرنش برای آلیاژ تیتانیوم- نیکل مشاهده می شود. آلیاژ در دماهای پایین ، متوسط و بالای دمای استحاله مورد آزمایش قرار گرفته است. تغییر شکل در مارتنزیت با چند در صد کرنش و تنش فشاری نسبتاً کم دیده می شود . در حالیکه آستنیت در درجه حرارت بالا نیاز به تنش نسبتاً زیادی برای تغییر شکل دارد. خط چین روی منحنی مارتنزیت نمایانگر برگشت پذیری آلیاژ بعد از برداشتن تنش وارد شده بعد از گرم کردن نمونه و تبدیل به فاز آستنیت می باشد ولی چنانچه که مشاهده می شود در منحنی مربوط به آستنیت با برداشتن تنش و گرم کردن نمونه امکان برگشت پذیری وجود ندارد .



شکل ۶ ، منحنی تنش - کرنش در دماهای متفاوت (a) آستنیت ، (b) مارتنزیت ، (c) رفتار الاستیکی کاذب

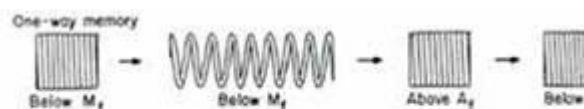
#### ۴- خاصیت ارتجاعی کاذب:

خصوصیت جالب توجه درباره منحنی تنش - کرنش در قسمت منحنی C دیده می شود. به طوری که پس از حرارت دادن نمونه کمی بالاتر از درجه حرارت انتقال ، در درجه حرارت بالای Af به نمونه در فاز مارتنزیت تنش وارد می شود. با افزایش مقدار تنش ، تغییر شکل نیز به صورت یکنواخت افزایش می یابد (منحنی AB در این هنگام رفتار تغییر شکل و تنش پایداری مشاهده می شود با کاهش تنش (منحنی CD) مارتنزیت به آستنیت تبدیل می شود باید توجه داشت که برگشت پذیری انجام شده به خاطر تغییر حرارت نمونه نمی باشد و دلیل آن کاهش فشار است. این پدیده را که موجب می شود آلیاژ خاصیت کشسانی نامحدود پیدا کند به عنوان خاصیت ارتجاعی کاذب نامیده می شود .

#### ۵- اثر حافظه دار یک طرفه و دو طرفه:

الف) اثر حافظه دار یک طرفه:

در صورتیکه اثر حافظه داری فقط بعد از تغییر شکل در حالت مارتنزیتی و سپس در سیکل گرم کردن مشاهده شود به آن اثر حافظه یک طرفه گفته می شود. این بدان معنی است که در این حالت تغییر شکل ایجاد شده ، فقط با گرم کردن به حالت اولیه قبل از تغییر شکل باز می گردد و چنانچه جسم را دوباره سرد کنیم تغییری در شکل آن حاصل نمی شود این خصوصیت در شکل شماره ۷ نمایش داده شده است .

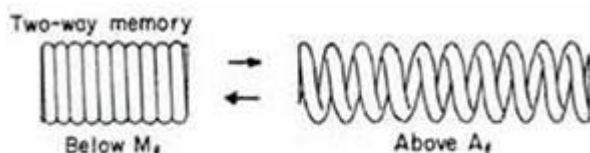


شکل ۷ - اثر حافظه دار یک طرفه

همانطور که در تصویر مشاهده می شود ابتدا فنر در دمای  $M_f$  به مقدار معینی تغییر فرم داده می شود به صورتیکه تغییر فرم دائمی در آن باقی بماند حال اگر فنر تغییر فرم داده شده را تا دمای  $A_f$  حرارت دهیم مجدداً به شکل اولیه خود بر می گردد و در سیکل سرد شدن تا دمای  $M_f$  هیچگونه تغییر شکلی در فنر مشاهده نمی شود. .

#### ب) اثر حافظه دار دو طرفه:

برگشت پذیری به حالت اولیه خود در اثر سرد و گرم کردن آلیاژهای حافظه دار دو طرفه در بازه معینی از دما امکان پذیر است . در شکل ۸ یک فنر با اثر حافظه دار دو طرفه به صورت باز شده در حالت آستینی و شکل جمع شده در حالت مارتنزیتی نشان داده شده است .



شکل ۸ - اثر حافظه دار دو طرفه

همانطور که مشاهده می شود اگر فنر گرم شود باز شده و در سیکل سرد شدن مجدداً به شکل جمع شده در می آید . باید توجه داشت که آلیاژهای حافظه دار برای اینکه اثر حافظه دار دو طرفه از خود نشان دهند نیاز به انجام عملیات ترمومکانیکی خاصی بر روی آنها می باشد.

#### ۶- ساخت آلیاژهای حافظه دار:

روش های اصلی ساخت آلیاژهای حافظه دار در دو گروه عمده قابل بررسی است:

الف) ساخت آلیاژ به طریقه ذوب و ریخته گری با استفاده از کوره های القایی و کوره های مقاومتی

ب) ساخت آلیاژ به طریقه متالورژی پودر

برای تولید آلیاژهای حافظه دار در تناژهای بالا و تجارتي ، از روش ذوب و ریخته گری استفاده می شود.

#### ۷- کاربرد آلیاژهای حافظه دار در مهندسی پزشکی:

کاربرد پزشکی آلیاژ های حافظه دار به عنوان یک عملگر با اثر باقیمانده در داخل بدن قابل بررسی است. آلیاژی که در بدن افراد برای بهبود رفتار بالینی اعضای آنها بکار گرفته شده است نباید مولد هیچ گونه حساسیتی باشد علاوه بر آن آلیاژ بکارگرفته شده نباید به صورت ذراتی از یون آن ماده وارد خون شخص گیرنده این گونه آلیاژها شود .

جنبه های متعددی شامل شاخص های مزاجی افراد همچون سن ، قوای بدن و سلامتی و خصوصیات شیمیایی مواد همانند خوردگی ، تخلخل پذیری سطح ، تأثیرات سمی و عناصر موجود در مواد به منظور پذیرش مواد مذکور در بدن افراد باید مورد بررسی قرار گیرند .

تحقیقات متعددی در مورد تولید و بکارگیری آلیاژهای حافظه دار با کاربرد پزشکی با پایه عنصری Ni-Ti انجام پذیرفته است . این تحقیقات نشان می دهد که آلیاژ Ni-Ti در کاربرد و استفاده، نسبت به بقیه آلیاژها از موقعیت خوبی برخوردار است .

تحلیل خواص آلیاژ Ni-Ti با بررسی خواص جداگانه نیکل و تیتانیوم امکان پذیر است . نیکل رنگ سفید نقره ای براق دارد و فلزی است سمی ، شکننده که از قابلیت پولیش خوبی برخوردار است این فلز جزء فلزات غیر آهنی سنگین با جرم مخصوص  $9/8 \text{ Kg/dm}^3$  و نقطه ذوب  $1455^\circ \text{C}$  می باشد و در مقابل خوردگی بسیار مقاوم بوده و به وسیله آهن ربا جذب می شود. همچنین در مقابل حرارت و ضربه مقاومت خوبی نشان می دهد موارد استفاده آن شامل پوشش محافظ در آبکاری فلزات ، تولید فولادهای آلیاژی و غیره می باشد .

تیتانیوم فلزی است نقره فام مایل به خاکستری و جزء فلزات غیر آهنی سبک است و جرم مخصوص آن  $5/4 \text{ Kg/dm}^3$  و نقطه ذوب آن  $1670^\circ \text{C}$  می باشد. مقاومت در مقابل خوردگی و سایش و استحکام زیاد آن موجب کاربرد در ساخت قطعات هواپیما ، سفینه فضایی ، لوازم نظامی و جراحی شده است. آلیاژهای تیتانیوم دار فلز اصلی ساختمان هواپیمای مافوق صوت را تشکیل می دهد . تیتانیوم بر خلاف نیکل در پزشکی بسیار مؤثر عمل می کند ، علاوه بر این با توجه به خواص بسیار خوب مکانیکی برای اصلاح دندان های کج و همچنین ترمیم استخوان های آسیب دیده کاربرد فراوان دارد .

بررسی تحقیقات خواص بالینی آلیاژ Ni-Ti چگونگی کنترل مقاومت در مقابل خوردگی و عوامل خارجی مؤثر بر این آلیاژ را نشان می دهد .

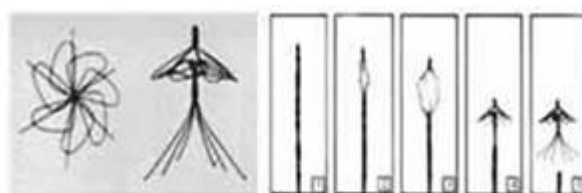
## ۸- موارد استفاده پزشکی از آلیاژ: Ni-Ti

الف) کاربردهای مربوط به قلب و عروق

فیلتر سیمون نسل جدیدی از وسایل استفاده شده برای جلوگیری از انسداد جریان خون می باشد افرادی که قادر به استفاده از داروهای ضد انعقاد خون نمی باشند، استفاده کننده های اصلی این فیلتر می باشند. هدف

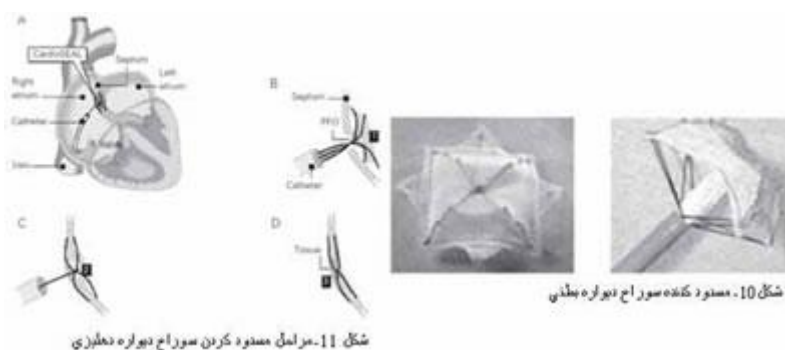
استفاده از این وسیله تصفیه خون داخل رگ می باشد و فیلتر سیمون کمک می کند لخته های بوجود آمده در خون حل شود .

اما نصب فیلتر در داخل بدن اشخاص با به کار گیری از تأثیرات آلیاژهای حافظه دار امکان پذیر است برای این منظور فیلتر را با تغییر شکل برروی سوند قرار می دهند. جریان محلول نمکی در داخل سوند موجب تثبیت دمای فیلتر با درجه حرارت معمولی می شود و زمانی که فیلتر در محل تعیین شده قرار گرفت با توقف جریان محلول نمکی در داخل سوند درجه حرارت بالا می رود و فیلتر تغییر شکل داده شده به شکل اصلی (اولیه) خود بر می گردد در این زمان فیلتر از نوک سوند نیز جدا شده است .



شکل 9الف) شکل اصلی فیلتر (ب) مراحل بازگشت شکل اولیه و جدایی از Catheter

مسدودکننده سوراخ دیواره دهلیزی: از این وسیله برای مسدود کردن سوراخ دیواره دهلیزی که بین دو دهلیز چپ و راست ایجاد می شود استفاده می گردد .



شکل 11- مراحل مسدود کردن سوراخ دیواره دهلیزی

باید توجه داشت وجود این سوراخ غیر عادی است و امید ادامه زندگی را برای افراد کاهش می دهد در روش جراحی معمول ، رفع این عیب مستلزم شکافتن سینه بیمار و سپس عمل بخیه کردن سوراخ صورت می گیرد، که به طور طبیعی خطرات ناشی از عمل جراحی و همچنین امکان بروز حوادث غیر منتظره در حین جراحی اجتناب ناپذیر بوده و راه حل آن استفاده از اثر آلیاژهای حافظه دار می باشد. این وسیله از سیم هایی با خاصیت حافظه داری و فیلم ضد آب که روی آن نصب شده است، تشکیل می شود. برای نصب این وسیله در داخل قلب ابتدا نیمه اول آن وارد بطن چپ شده و به شکل اولیه خود بر می گردد و در ادامه نیمه دوم که در بطن راست قرار می گیرد تغییر شکل یافته ، به شکل اولیه خود بر می گردد. در انتها هر دو نیمه به دیواره بطنی متصل شده اند . به طوری که از ورود جریان خون از دو بطن به یکدیگر جلوگیری می شود .

استنت های باز شونده خودکار نیز از جمله وسایل مهمی است که در حفظ قطر داخلی رگ های تنگ شده و کاهش قطر و بسته شدن آنها کاربرد دارد . استنت ها به شکل استوانه های توری ساخته می شوند و متناسب بانوع و محل کاربرد دارای اقطار متفاوتی می باشند(شکل ۱۲).



شکل ۱۲ - استنت های با اندازه های متفاوت

از جمله محل های مورد استفاده از استنت ها سرخرگ ، سیاهرگ ، رگ های خونی ، مجاری ، صفراوی و مری می باشد. برای نصب در داخل عروق ابتدا فاز مارتنزیتی از شکل اصلی به حالت متراکم شده تبدیل و پس از قرار دادن در محل مورد نظر به شکل خود بر می گردد .

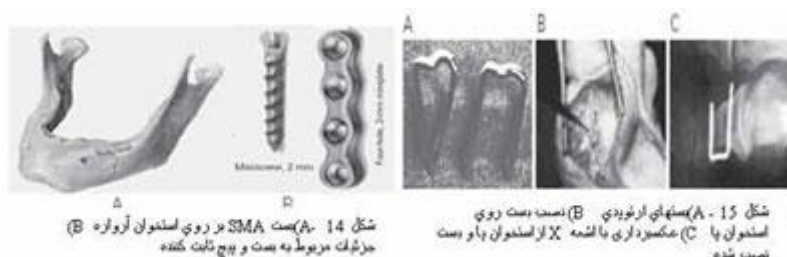
(ب) کاربردهای ارتوپدی

از آلیاژهای حافظه دار (SMA) به عنوان فضا گیر یا spacer بین مهره های ستون فقرات در حین عمل جراحی استفاده می شود که موجب استحکام ما بین دو مهره در حین بهبودی بعد از تغییر شکل ایجاد شده در جراحی اسکولیدز می شود. در شکل ۱۳B سمت چپ مهره تغییر شکل یافته در فاز مارتنزیتی است که پس از جایگزینی در محل مورد نظر به حالت سمت راستی (شکل اولیه ) بر می گردد .



شکل ۱۳ - (A) ستون فقرات (B) سمت چپ مهره فشرده شده و سمت راست شکل اولیه مهره

ترمیم و بهبود شکستگی استخوان از دیگر کاربردهای ارتوپدی آلیاژهای حافظه دار می باشد. انواع مختلفی از بست های با خاصیت حافظه داری در ترمیم شکستگی یا ترک استخوان ساخته شده است. بست ها به صورت باز شده در محل شکستگی یا ترک معمولاً پیچ شوند. با کمک گرما بست ها به گونه ای تغییر شکل می یابند که دو طرف شکستگی یا ترک را با هم یکی کرده و می فشردند. گرمای ایجاد شده را می توان به کمک یک وسیله خارجی به آلیاژ منتقل کرد. نیروی ایجاد شده در اثر تغییر شکل آلیاژ به بهبود سریعتر شکستگی یا ترک می انجامد (شکل ۱۴ و ۱۵).



عموماً از این بست ها در مواقعی استفاده می شود که محل شکستگی یا ترک را نتوان گچ گرفت، مانند نواحی صورت شامل، بینی، فک و حفره چشم از جمله محل های مورد کاربرد می باشند . از دیگر کاربردهای ارتوپدی اثرات آلیاژهای حافظه دار در فیزیوتراپی عضلات ضعیف می باشد . تصویر ۱۶ دستکشی را نشان می دهد که سیم هایی با خاصیت حافظه داری بر روی ناحیه انگشتان دستکش واقع شده است. که موجب تقویت حرکت عضلات و برقراری دامنه مناسب حرکات مفصلی با استفاده از خاصیت حافظه داری سیم های دستکش استفاده می شود به طوریکه با گرم کردن سیم طول سیم ها کوتاه شده و انگشتان به داخل خم می شوند و با سرد کردن طول سیم ها زیاد شده و انگشتان کاملاً کشیده می شوند . این پدیده برای به کار انداختن مفاصل نیمه ثابت استفاده می شود .

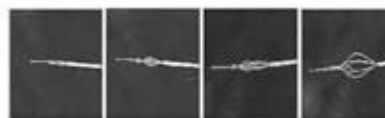


(ج) کاربرد آلیاژهای حافظه دار در وسایل جراحی در راستای تولید وسیع ابزارهای جراحی در سال های اخیر ابزارهای جراحی حافظه دار قابل توجهی تولید شده است که به شرح تعدادی از آنها پرداخته می شود.

سبد حافظه دار برای خارج کردن سنگ های مثانه و صفراوی مورد استفاده قرار می گیرد. مراحل نصب آن شبیه فیلتر سایمون می باشد که در شکل ۱۷ آورده شده است .



شکل ۱۸ - پمپ بالونی برای جلوگیری از انسداد رگ خون آنژیو گرافی



شکل ۱۷ - مراحل بازپایی شکل اولیه سبد ساندن شده با آلیاژ حافظه دار برای جمع آنژیو سنگ مثانه

کاربرد پمپ بالونی داخل آنورت شکل ۱۸ برای جلوگیری از مسدود شدن رگ های خونی در هنگام آنژیوپلاستی می شود این وسیله دارای تیوب با اثر حافظه داری است و عملکرد آن با مواد پلی مری که خاصیت ارتجاعی دارند قابل مقایسه است.

شکل ۱۹ انواع انبرک های شامل انبرک های قیچی دار و پنس مورد استفاده در لاپاراسکوپی را نشان می دهد. دقت و نرمی در حرکت از جمله خصوصیات این ابزار می باشد .

۹- نتیجه گیری:

۱) تغییر حالت مارتنزیتی به طریقه دوم تغییر حالت متالورژیکی جامدات مربوط بوده و در آن تغییر آرایش اتمی بدون هیچ وابستگی به زمان و تغییری در ترکیب شیمیایی فاز جدید، به صورت هماهنگ و وابسته به دما انجام می گیرد.

۲) رفتار حافظه دار شدن با تغییر مکان به صورت شبه برشی امکان پذیر می باشد که در آن اتم ها به صورت هماهنگ و گروهی جابجا می شوند.

۳) مکانیزم دوقلوپی در برش ناهمگن توجیه کننده چگونگی حافظه دار شدن آلیاژنمونه بدون تغییر در حجم نمونه اولیه است.

۴) در رفتار ارتجاعی کاذب، آلیاژ خاصیت کشسانی نامحدودی پیدا می کند.

۵) اثر حافظه داری به دو صورت یک طرفه و دو طرفه در آلیاژهای حافظه دار قابل بررسی است.

۶) آلیاژهای حافظه دار به دو روش ۱-روش ذوب و ریخته گری ۲- متالورژی پودر ساخته می شوند.

۷) آلیاژهای NiTi به دلیل داشتن ویژگی هایی همچون مقاومت در مقابل خوردگی ، سازگاری زیستی بالا، قابلیت تولید در اندازه های خیلی کوچک ، خاصیت ارتجاعی بالا و تولید نیرو در تجهیزات مهندسی پزشکی کاربرد فراوان دارند.



منابع:

- 1-SHAPE MEMORY ALLOYS, Darel E. Hodgson, Shape Memory Applications, Inc., Ming H. Wu, Memry Technologies, and Robert J. Biermann, Harrison Alloys, Inc
- 2-. Medical applications of SHAPE MEMORY ALLOYS, L.G. Machado<sup>1</sup> and M.A. Savi<sup>2</sup>
- 3- <http://database.cs.ualberta.ca/>
- 4- <http://www.nmtmedical.com>
- 5- Duerig TM, Pelton A & Stöckel D (1999). An overview of nitinol medical applications. *Materials Science and Engineering A*, 273-275:149-160.
- 6- <http://smet.tomsk.ru/>
- 6- Shabalovskaya SA (1995) Biological aspects of TiNi alloys surfaces. *Journal de Physique IV*, 5: 1199-1204.

---

آلیاژهای حافظه دار : جزء گروهی از آلیاژهای فلزی هستند که این توانایی را دارند که اگر آنها را تا بالای دمای ویژه ای گرم کنیم ؛ قادر به بازیابی شکل اولیه خود خواهند بود.

علوم و تکنولوژی در قرن آینده به طور قطع تاثیر زیادی از مواد جدید خواهد گرفت . آلیاژ های حافظه دار یکی از این مواد نو هستند . اولین مشاهده ثبت شده در مورد پدیده حافظه داری در سال ۱۹۳۲ مشاهده شد ، اما تا سال ۱۹۶۰ هیچ تحقیق جدی در این زمینه انجام نشد . در سال ۱۹۶۲ در آزمایشگاه نیروی دریایی ایالات متحده آمریکا در حین عملیات حرارتی یک میله از جنس Ni.Ti پدیده حافظه داری در این آلیاژها کشف شد .

آلیاژهای حافظه دار ، آلیاژهایی هستند که دو مشخصه بی همتا از خود نشان می دهند :

۱- Shape Memory Effect ( رفتار حافظه ای )

۲- Pseudoelastic Behavior ( رفتار شبه الاستیک )

**آلیاژهای حافظه دار :** جزء گروهی از آلیاژهای فلزی هستند که این توانایی را دارند که اگر آنها را تا بالای دمای ویژه ای گرم کنیم ؛ قادر به بازیابی شکل اولیه خود خواهند بود.

علوم و تکنولوژی در قرن آینده به طور قطع تاثیر زیادی از مواد جدید خواهد گرفت . آلیاژ های حافظه دار یکی از این مواد نو هستند . اولین مشاهده ثبت شده در مورد پدیده حافظه داری در سال ۱۹۳۲ مشاهده شد ، اما تا سال ۱۹۶۰ هیچ تحقیق جدی در این زمینه انجام نشد . در سال ۱۹۶۲ در آزمایشگاه نیروی دریایی ایالات متحده آمریکا در حین عملیات حرارتی یک میله از جنس Ni.Ti پدیده حافظه داری در این آلیاژها کشف شد .

آلیاژهای حافظه دار ، آلیاژهایی هستند که دو مشخصه بی همتا از خود نشان می دهند :

۱- Shape Memory Effect ( رفتار حافظه ای )

۲- Pseudoelastic Behavior ( رفتار شبه الاستیک )

ویژگی های دیگر این آلیاژها عبارت است از : مقاومت به خوردگی بالا ، مقاومت ویژه الکتریکی نسبتا بالا، خواص مکانیکی نسبتا خوب ، خستگی طولانی ، شکل پذیری بالا و قابلیت انطباق با بدن . مهمترین کاربرد این آلیاژها در صنایع هوا فضا و صنایع پزشکی است.

این آلیاژها در بیشتر موارد شامل Ni-Ti ، Cu-Zn-Al ، Cu-Al-Ni هستند که در این مقاله آلیاژ Ni-Ti مورد بحث است . که این آلیاژ با نامهای Tee-Nee ، Ti-Ni ، Nitinol معروف است . این آلیاژها در فارسی نیز با نام های آلیاژ حافظه دار ، آلیاژ خود شکل و آلیاژ با حافظه شکلی ترجمه شده است . آلیاژهای حافظه دار به اختصار SMA هم خوانده می شوند.

**کاربرد های آلیاژهای حافظه دار :**

۱- کاربرد با بازیابی آزاد ( استفاده از حرکت ) : آلیاژهای حافظه دار در حین سرد و گرم شدن شکل اولیه خود را بازیابی می کنند . بدون اینکه تنش بیرونی از این کار ممانعت به عمل آورد . مثل آنتن های سفینه فضایی

۲- کاربرد با بازیابی مقید ( استفاده از نیرو ) : به کاربردهایی اطلاق می شود که در آنها یک نیروی خارجی جلوی بازیابی کرنش در آلیاژ را می گیرد . در این حالت هیچ کرنشی بازیابی نمی شود . ولی مقدار زیادی تنش ایجاد می شود . مثل چفت و بست ها

۳- کاربردهایی با بازیابی تحت فشار ( استفاده از کار ) : هم تنش و هم کرنش حین گرم شدن بازیابی می شوند و کار مکانیکی ایجاد می شود

۴- کاربردهای ابر کشسانی ( ذخیره انرژی مکانیکی ) : رفتار الاستیک ۱۵ برابر فولادهای فنر است

۵- خاصیت میرا کنندگی ارتعاشات : مهار ارتعاشات در سازه هایی که تحت ارتعاشات شدید هستند . مثل صفحات آزاد میرا کننده ارتعاشات در سفینه های فضایی

### ساختار آلیاژهای حافظه دار

خاصیت حافظه داری در این آلیاژها به وسیله تغییر موقعیت فاز جامد است . که در آن چیدمان مجدد مولکولی رخ می دهد . آلیاژهای حافظه دار دارای دو فاز ثابت هستند . فاز در دمای بالا که آستنیت ( Austenite ) نامیده می شود . که ساختمان آن مکعبی بوده و به علت دارا بودن تقارن بالا محکم تر است . فاز با دمای پایین که مارتنزیت ( Martensite ) نامیده می شود ؛ که می تواند به حالت دوقلویی و غیر دوقلویی موجود باشد . شکل آن منوکلینیک بوده و نسبت به آستنیت تقارن کمتری دارد . فاز مارتنزیت از نوع فاز ترموالاستیک بوده که دو خصوصیت لغزنده بودن و انرژی کم فصل مشترک را دارا است . که با تغییر کوچک دما و تنش تغییر می کند. بمحض سرد کردن آلیاژ در نبود بارگذاری تغییر فاز از آستنیت به مارتنزیت صورت می پذیرد که نتیجه این تغییر فاز قابل مشاهده میکروسکوپی نیست . بمحض گرم کردن ماده در فاز مارتنزیت ، برگشت فاز اتفاق می افتد . در نمودار تغییر فاز چهار نقطه اختصاصی مشخص شده است ؛ دمای آغاز مارتنزیت ( $M^{os}$ ) که در آن دما بسته های مارتنزیت شروع به بزرگ شدن می کنند. دمای پایان مارتنزیت ( $M^{of}$ ) که در این دما تغییر فاز از آستنیت به مارتنزیت به طور کامل صورت گرفته است و ما مارتنزیت داریم. دمای شروع آستنیت ( $A^{os}$ ) که دمای شروع تغییر فاز از آستنیت به مارتنزیت است ؛ و دمای پایان آستنیت ( $A^{of}$ ) که در آن تغییر فاز مارتنزیت به آستنیت کامل شده است.

Temperature-induced phase transformation of an SMA without mechanical loading.

اگر بارگذاری مکانیکی روی آلیاژ در فاز مارتنزیت دوقلویی انجام شود ، مارتنزیت از حالت دوقلویی خارج شده و تغییر شکل می دهد . به محض برداشتن بار ، مارتنزیت به همان حالت باقی می ماند . با گرم کردن آلیاژ بالا تر از دمای ( $A^{of}$ ) فاز مارتنزیت به آستنیت تغییر می یابد . در نتیجه این تغییر فاز ، آلیاژ شکل اولیه خود را باز می یابد . آنچه در اینجا شرح داده شد به عنوان Shape Memory Effect شناخته می شود . اگر بارگذاری در فاز آستنیت انجام شود و ماده سرد شود ، تغییر فاز آستنیت به مارتنزیت دوقلویی نشده مشاهده می شود . که نتیجه آن یک کرنش ( در حدود ۵-۸ % ) است . ولی با گرمای مجدد و تغییر

فاز معکوس ، آلیاژ به شکل قبلی خود باز می گردد . چهار نقطه اختصاصی که در نمودار تغییر فاز - دما موجود هستند به عنوان دمای انتقال شناخته می شوند . این نقاط وابسته به شدت بارگذاری بوده و یک رابطه خطی بین دمای انتقال و شدت بارگذاری موجود است . Shape Memory Effect of an SMA.

ما همچنین می توانیم تغییر فاز در آلیاژ را فقط با بارگذاری مکانیکی ایجاد کنیم که نتیجه این عمل مارتنزیت دوقلوپی نشده به همراه مقدار زیادی کرنش است . حال اگر دمای آلیاژ بالای  $A^{of}$  باشد ؛ به محض عدم بارگذاری ، آلیاژ به شکل اول خود باز می گردد. بنابر این رفتار ماده به نوعی الاستیک خواهد بود . از این خاصیت به عنوان Pseudoelastic Behavior نام برده می شود .

#### PROPERTIES OF NITINOL

Density	6.45 gm/cm <sup>3</sup>
Thermal Conductivity	10 W/m <sup>o</sup> K
Specific Heat	322 j/kg <sup>o</sup> K
Latent Heat	24,200 J/kg
Ultimate Tensile Strength	750-960 MPa
Elongation to Failure	15.5%
Yield Strength (Austenite)	560 MPa
Young's Modulus (Austenite)	75 GPa
Yield Strength (Martensite)	100 MPa
Young's Modulus (Martensite)	28 GPa

#### آلیاژهای حافظه دار(۱) :

علوم و تکنولوژی در قرن آینده به طور قطع تاثیر زیادی از مواد جدید خواهد گرفت . آلیاژهای حافظه دار یکی از این مواد نو هستند. این آلیاژها جزء گروهی از آلیاژهای فلزی هستند که این توانایی را دارند که اگر آنها را تا بالای دمای ویژه ای گرم کنیم ؛ قادر به بازیابی شکل اولیه خود خواهند بود. درواقع آلیاژهای حافظه دار یا SMA(Shape Memory Alloy)ها موادی هستند که خصوصیات حافظه پذیری دارند. چنانچه یک آلیاژ حافظه دار مقداری تغییر شکل دهد و سپس تا دمایی بالاتر از دمای تغییر شکلش گرم شود، می تواند به شکل اولیه خود باز گردد.



دمای تغییر فرم، دمای تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت و بالعکس است. این دو فاز، دارای خواص کاملاً متفاوتی هستند. اولین گام‌های گزارش شده به سمت کشف اثر حافظه‌پذیری به سال ۱۹۳۰ بر می‌گردد. اولاندر و همکارانش رفتار سوپرالاستیک آلیاژ  $Au-Cd$  را در سال ۱۹۳۲ کشف کردند. مورادین و گرینگر در سال ۱۹۳۸، تشکیل و ناپدید شدن فاز مارتنزیت را با کاهش و افزایش دمای آلیاژ  $Cu-Zn$  مشاهده کردند. پدیده اصلی اثر حافظه‌پذیری که با رفتار ترموالاستیک فاز مارتنزیتی کنترل می‌شود، به‌طور گسترده‌ای در یک دهه بعد توسط کردجامو در سال ۱۹۴۹، ونیز توسط چانگ و رید در سال ۱۹۵۱، گزارش شد.

در سال ۱۹۶۱ اثر حافظه داری شکل در آلیاژ نیکل تیتانیوم با درصد اتمی مساوی (۵۰٪/۵۰٪) توسط بوهرلر و در آزمایشگاه ناول اوردانانس (Naval Ordnance Lab) کشف و تحت نام نیتینول (Nitinol) مشهور شد. دو حرف اول نیتینول در ارتباط با نیکل، دو حرف بعدی مربوط به عنصر تیتانیوم و سه حرف آخر در رابطه با آزمایشگاه ناول اوردانانس می‌باشد. از اوایل سال ۱۹۸۰ استفاده از آلیاژهای حافظه دار در بین محققان و مهندسان مورد توجه قرار گرفت و این آلیاژ هوشمند در زمینه‌های وسیعی از جمله تعدیل رفتار آئروالاستیسیته آنتن ماهواره‌ها، کنترل ارتعاش سازه‌های فضایی، کنترل ارتعاش سطوح کنترلی هواپیماها و حتی در شبیه‌سازی‌های پزشکی مورد استفاده قرار گرفته است و کشف مزایای اصلی و علمی آن هر روز افزایش یافته است.

درواقع آلیاژهای حافظه‌دار یا SMA (Shape Memory Alloy) مواد هستند که خصوصیات حافظه‌پذیری دارند. چنانچه یک آلیاژ حافظه‌دار مقداری تغییر شکل دهد و سپس تا دمایی بالاتر از دمای تغییر شکلش گرم شود، می‌تواند به شکل اولیه خود باز گردد. موادی که باعث سازگاری سازه با محیط خود می‌شوند، مواد محرک نامیده می‌شوند. این مواد می‌توانند شکل، سفتی، مکان، فرکانس طبیعی و سایر مشخصات مکانیکی را در پاسخ به دما و یا میدان‌های الکترومغناطیسی تغییر دهند. امروزه پنج نوع ماده محرک به‌طور عمده استفاده می‌شود که شامل آلیاژهای حافظه دار، سرامیک‌های پیزوالکتریک، مواد مغناطیسی سخت و مایعات الکترورنولوژیکال و مگنتورنولوژیکال می‌باشند. این مواد از زمره مواد هوشمند

محرک می باشند. مواد هوشمند آن دسته از موادی هستند که می توانند به تغییرات محیط به بهترین شکل ممکن پاسخ داده و رفتار خود را نسبت به تغییرات تنظیم نمایند .

❖ درواقع آلیاژهای حافظه دار ، آلیاژهایی هستند که دو مشخصه بی همتا از خود نشان می دهند.

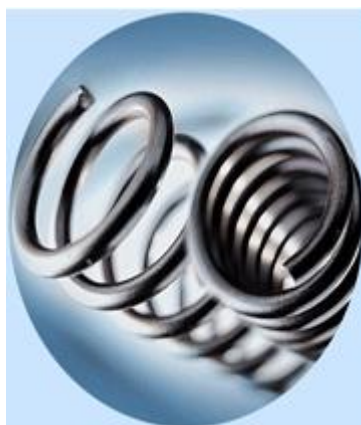
۱- رفتار حافظه ای (Shape Memory Effect)

۲- رفتار شبه الاستیک (Pseudoelastic Behavior)

ویژگی های دیگر این آلیاژها عبارت است از : مقاومت به خوردگی بالا ، مقاومت ویژه الکتریکی نسبتا بالا، خواص مکانیکی نسبتا خوب ، خستگی طولانی ، شکل پذیری بالا و قابلیت انطباق با بدن . مهمترین کاربرد این آلیاژها در صنایع هوا فضا و صنایع پزشکی است .

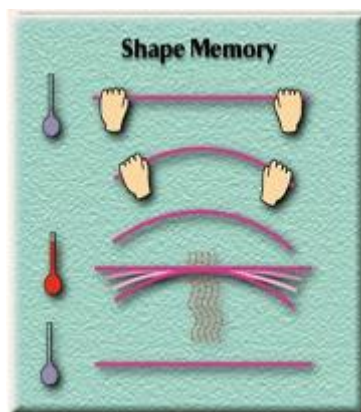
**معرفی آلیاژهای حافظه دار :**

آلیاژهای حافظه دار عنوان گروهی از مواد محرک می باشند که خواص متمایز و برتری نسبت به سایر آلیاژها دارند. عکس العمل شدید این مواد نسبت به برخی از پارامترهای ترمودینامیکی و مکانیکی و قابلیت بازگشت به شکل اولیه در اثر اعمال پارامترهای مذکور به گونه ای است که می تواند رفتار سیستم را بهبود بخشد. وقتی یک آلیاژ معمولی تحت بار خارجی بیش از حد الاستیک قرار می گیرد؛ تغییر شکل می دهد. این نوع تغییر شکل بعد از حذف بار باقی می ماند. اما آلیاژهای حافظه دار، من جمله آلیاژهای  $\text{Cu Zn}$  ،  $\text{Ni Ti}$  ،  $\text{Cu Zn Al}$  ،  $\text{Cu Zn Ga}$  ،  $\text{Cu Zn Sn}$  ،  $\text{Cu Zn Si}$  ،  $\text{Cu Al Ni}$  ،  $\text{Cu Au Zn}$  ،  $\text{Cu Sn}$  ،  $\text{Au Cd}$  ،  $\text{Ni Al}$  ،  $\text{Fe Pt}$  و... رفتار متفاوتی از خود ارائه می نمایند. در دمای پایین، یک نمونه حافظه دار می تواند تغییر شکل پلاستیک چند درصدی را تحمل کند و سپس به صورت کامل به شکل اولیه خود در دمای بالا برگردد. در فرآیند برگشت به شکل اولیه، آلیاژ می تواند نیروی زیادی تولید کند که این نیرو برای تحریک مفید می باشد .



مکانیزم اصلی که خواص آلیاژهای حافظه دار را کنترل می کند در رابطه با تغییر کریستالی آلیاژ است. به این معنی که ساختار مارتنزیتی در دمای پایین با افزایش دما به ساختار آستنیتی تبدیل می شود و در هنگام سرد کردن؛ فرآیند عکس رخ خواهد داد. بسیاری از مواد، استحاله مارتنزیتی دارند اما برتری که

آلیاژهای حافظه دار را نسبت به آلیاژهای دیگر متمایز می نماید قابلیت دو قلو شدن این آلیاژ در فاز مارتنزیت می باشد. در حالیکه مواد دیگر به وسیله لغزش و حرکت نابجائیها تغییر شکل می یابند، آلیاژهای حافظه دار به وسیله تغییر جهت ساده ساختار کریستالهای خود و از طریق مرزهای دو قلوئی به تنشهای اعمال شده، عکس العمل نشان می دهند .



اگر در این آلیاژها در دمای پائین، هنگامیکه فاز مارتنزیت حاکم است، تغییر فرم پلاستیکی روی دهد، ساختار کریستالی دو قلو شده ای برای آلیاژ ایجاد می شود که ناشی از تغییر فرم پلاستیک می باشد. با گرم کردن آلیاژ تغییر فرم یافته تا دمای شروع فاز آستنیت می توان شکل اولیه را بازگرداند. این توانائی بعنوان اثر حافظه شکل خوانده می شود و حاصل از تغییر فاز مارتنزیت در دمای پائین به فاز آستنیت در دمای بالا می باشد. در اثر خم کردن میله حافظه دار در دمای پایین و جایی که فاز مارتنزیت حاکم است، تغییر فرم پلاستیک در میله رخ داده و طول آن زیاد می شود. حال اگر میله خم شده، گرم شود و فاز آستنیت حاکم گردد، میله به بهینه ترین حالت به شکل اولیه خود بر می گردد. وقتی هم که میله سرد شود و به فاز مارتنزیت برگردد، نیز کرنشهای پلاستیک کاملاً حذف شده اند و به حالت اولیه درخواهد آمد. در حقیقت در اثر فرآیند برگشت به شکل اولیه، تنشهایی در آلیاژ تولید میشود که این تنش باعث تحریک میشود. این تنشهای حاصل شده، تنش بازیافتی خوانده می شود و بهبود توزیع تنش و کرنش، بهبود خواصی چون مدول یانگ و تنش تسلیم و توانائی کنترل رفتار سیستم، از جمله آثار مفید تنشهای بازیافتی می باشد. بعنوان مثال اگر در نوعی از این آلیاژ کرنش ۸ درصدی رخ دهد، با گرم کردن می توان این کرنش را کاملاً از بین برد .

رفتار ترمودینامیکی آلیاژهای حافظه دار به دما، تنش و ترکیب شیمیایی و ساختار آلیاژ بستگی دارد. در فرآیند گرم کردن آلیاژ و در دمای پایین تر از دمای آغاز فاز آستنیت ماده ۱۰۰٪ در فاز مارتنزیت می باشد و در دمای پایان فاز آستنیت ماده ۱۰۰٪ در فاز آستنیت می باشد. و در فرآیند سرد کردن و در دمای بالاتر از دمای آغاز فاز مارتنزیت ماده ۱۰۰٪ در فاز آستنیت می باشد در حالیکه در دمای پایین تر از دمای پایان



فاز مارتنزیت ماده کاملاً در فاز مارتنزیت می باشد. اما در دمای مابین و همچنین دماهای و ماده بصورت دو فازی است و بخشی از آن در فاز مارتنزیت و بخشی از آن در فاز آستنیت می باشد. حالت ماده در دماهای مختلف توسط درصد حجمی فاز مارتنزیت بیان می شود که در دمای پایینتر از در فرآیند گرم کردن و دمای پایین تر از در فرآیند سرد کردن برابر مقدار ۱ می باشد و در دمای بالاتر از در فرآیند گرم کردن و بالاتر از در فرآیند سرد کردن برابر مقدار صفر می باشد. اما در دمای مابین دماهای تغییر فاز بسته به نوع فرآیند سرد و گرم کردن به دما وابسته می باشد. در دمای پایین و به ازای مدول الاستیسیته آلیاژ برابر با مدول فاز مارتنزیت و در دمای بالا و به ازای مدول الاستیسیته آلیاژ برابر به مدول فاز آستنیت می باشد. اما در دمای مابین دماهای تغییر فاز، تغییرات مدول الاستیسیته تابعی بر حسب دما می باشد. همچنین تنشهای بازیافتی تولید شده نیز به دما وابستگی دارد. بایستی توجه شود که تنشهای بازیافتی به مقدار کرنش اولیه بستگی داشته و در حالتی که آلیاژ تحت هیچگونه کرنش اولیه ای نباشد، در اثر تغییر فاز، تنش بازیافتی تولید نمی شود.



## آلیاژهای حافظه دار (۲) :

همان طور که در قسمت قبل بیان کردیم آلیاژهای حافظه دار عنوان گروهی از مواد محرک می باشند که خواص متمایز و برتری نسبت به سایر آلیاژها دارند. عکس العمل شدید این مواد نسبت به برخی از پارامترهای ترمودینامیکی و مکانیکی و قابلیت بازگشت به شکل اولیه در اثر اعمال پارامترهای مذکور به گونه ای است که می تواند رفتار سیستم را بهبود بخشد. در این قسمت ادامه ی مطالب مربوط به این آلیاژها را بیان می کنیم.

آلیاژهای حافظه دار تا حدودی الاستیک هستند. یعنی توانایی ذخیره سازی انرژی مکانیکی و آزادسازی آن را دارند. در این دسته از فلزات مولکول ها قابلیت چیدمان مجدد دارند. ساختار مولکولی در هر فاز عاملی است که سبب تغییر شکل فلز و بازگشت آن به حالت اولیه می شود. با توجه به این که این دسته از فلزات زیست سازگار هستند و سیستم ایمنی بدن در برابر آنها عکس العمل نشان نمی دهد و همچنین از ویژگی های فیزیکی قابل توجهی مانند مقاومت در برابر خوردگی برخوردار هستند. در ساخت ایمپلنت ها (کاشتنی

ها) در ارتوپدی و درمان شکستگی ها از آن استفاده می شود. در شکستگی های استخوان های صورت از صفحات ویژه ای استفاده می شود تا استخوان های صورت را در مدت زمان درمان شکستگی در کنار هم نگاه دارد.



در گذشته از صفحاتی از جنس استیل برای این کار استفاده می شد. اگر چه در ابتدا استخوان ها درست در کنار هم قرار می گیرند، اما به مرور این وضعیت تغییر می کند که سبب تاخیر در ترمیم شکستگی می شود. با ظهور آلیاژهای جدیدی که تحت عنوان مواد هوشمند بررسی می شوند و کاربرد آنها در ساخت این صفحات امروزه جراحان از فلزهای حافظه دار به جای استیل استفاده می کنند. برای این کار ابتدا فلز را کمی سرد می کنند و سپس آن را در محل مورد نظر نصب می کنند.

در اثر دمای بدن فلز کمی گرم می شود و به این ترتیب این صفحه فشار لازم برای کنار هم نگاه داشتن بخشهای شکسته شده را حفظ می کند و سبب می شود استخوان در کوتاه ترین زمان ممکن ترمیم شود. این آلیاژها کاربردهای گوناگون و بسیار مفیدی نیز در زمینه هایی همچون: هوا و فضا، صنایع خودروسازی، پزشکی، دندانپزشکی و... دارند.

#### کاربرد های آلیاژهای حافظه دار :

۱- کاربرد با بازیابی آزاد ( استفاده از حرکت) : آلیاژهای حافظه دار در حین سرد و گرم شدن

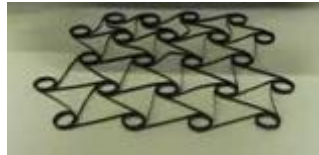
شکل اولیه خود را بازیابی می کنند. بدون اینکه تنش بیرونی از این کار ممانعت به عمل آورد. مثل آنتن های سفینه فضایی

۲- کاربرد با بازیابی مقید ( استفاده از نیرو) : به کاربردهایی اطلاق می شود که در آنها یک

نیروی خارجی جلوی بازیابی کرنش در آلیاژ را می گیرد. در این حالت هیچ کرنشی بازیابی نمی شود. ولی مقدار زیادی تنش ایجاد می شود. مثل چفت و بست ها

۳- کاربردهایی با بازیابی تحت فشار ( استفاده از کار) : هم تنش و هم کرنش حین گرم شدن

بازیابی می شوند و کار مکانیکی ایجاد می شود



۴- کاربردهای ابر کشسانی ( ذخیره انرژی مکانیکی) : رفتار الاستیک ۱۵ برابر فولادهای فنر است

۵- خاصیت میرا کنندگی ارتعاشات : مهار ارتعاشات در سازه هایی که تحت ارتعاشات شدید هستند . مثل صفحات آزاد میرا کننده ارتعاشات در سفینه های فضایی

ساخت آلیاژ های حافظه دار :

روش های اصلی ساخت آلیاژ های حافظه دار در دو گروه عمده قابل بررسی است:

(a) ساخت آلیاژ به طریقه ذوب و ریخته گری با استفاده از کوره های القایی و کوره های مقاومتی

(b) ساخت آلیاژ به طریقه متالورژی پودر

❖ برای تولید آلیاژ های حافظه دار در تناژهای بالا و تجارتي ، از روش ذوب و ریخته گری استفاده می شود.

### کاربرد آلیاژهای حافظه دار در مهندسی پزشکی:

کاربرد پزشکی آلیاژ های حافظه دار به عنوان یک عملگر با اثر باقیمانده در داخل بدن قابل بررسی است آلیاژی که در بدن افراد برای بهبود رفتار بالینی اعضای آنها بکار گرفته شده است نباید مولد هیچ گونه حساسیتی باشد علاوه بر آن آلیاژ بکارگرفته شده نباید به صورت ذراتی از یون آن ماده وارد خون شخص گیرنده این گونه آلیاژها شود. جنبه های متعددی شامل شاخص های مزاجی افراد همچون سن ، قوای بدن و سلامتی و خصوصیات شیمیایی مواد همانند خوردگی ، تخلخل پذیری سطح ، تأثیرات سمی و عناصر موجود در مواد به منظور پذیرش مواد مذکور در بدن افراد باید مورد بررسی قرار گیرند.



تحقیقات متعددی در مورد تولید و بکارگیری آلیاژهای حافظه دار با کاربرد پزشکی با پایه عنصری Ni-Ti انجام پذیرفته است. این تحقیقات نشان می دهد که آلیاژ Ni-Ti در کاربرد و استفاده، نسبت به بقیه آلیاژها از موقعیت خوبی برخوردار است. تحلیل خواص آلیاژ Ni-Ti با بررسی خواص جداگانه نیکل و تیتانیوم امکان پذیر است. نیکل رنگ سفید نقره ای براق دارد و فلزی است سمی ، شکننده که از قابلیت پولیش خوبی برخوردار است این فلز جزء فلزات غیر آهنی سنگین با جرم مخصوص  $9/8 \text{ Kg/dm}^3$  و نقطه ذوب ۱۴۵۵

می باشد و در مقابل خوردگی بسیار مقاوم بوده و به وسیله آهن ربا جذب می شود. همچنین در مقابل حرارت و ضربه مقاومت خوبی نشان می دهد موارد استفاده آن شامل پوشش محافظ در آبکاری فلزات ، تولید فولادهای آلیاژی و غیره می باشد. آلیاژهای حافظه دار عنوان گروهی از مواد محرک می باشند که خواص متمایز و برتری نسبت به سایر آلیاژها دارند. عکس العمل شدید این مواد نسبت به برخی از پارامترهای ترمودینامیکی و مکانیکی و قابلیت بازگشت به شکل اولیه در اثر اعمال پارامترهای مذکور به گونه ای است که می تواند رفتار سیستم را بهبود بخشد.



تیتانیوم فلزی است نقره فام مایل به خاکستری و جزء فلزات غیر آهنی سبک است و جرم مخصوص آن  $5/4 \text{ Kg/dm}^3$  و نقطه ذوب آن  $1670^\circ \text{C}$  می باشد. مقاومت در مقابل خوردگی و سایش و استحکام زیاد آن موجب کاربرد در ساخت قطعات هواپیما ، سفینه فضایی ، لوازم نظامی و جراحی شده است. آلیاژهای تیتانیوم دار فلز اصلی ساختمان هواپیمای مافوق صوت را تشکیل می دهد . تیتانیوم بر خلاف نیکل در پزشکی بسیار مؤثر عمل می کند ، علاوه بر این با توجه به خواص بسیار خوب مکانیکی برای اصلاح دندان های کج و همچنین ترمیم استخوان های آسیب دیده کاربرد فراوان دارد. بررسی تحقیقات خواص بالینی آلیاژ Ni-Ti چگونگی کنترل مقاومت در مقابل خوردگی و عوامل خارجی مؤثر بر این آلیاژ را نشان می دهد.

آلیاژهای حافظه دار به عنوان یکی از موادهوشمند و با ویژگی فعالسازی نقش مهمی را در نسل فعلی مواد در حال پیشرفت ایفا می کند آلیاژهای حافظه دار به توانایی برگشت به شکل یا اندازه اولیه از پیش تعریف شده طی یک چرخه حرارتی اطلاق می شود این آلیاژها گروهی جدیدی از مواد هستند که قابلیت تبدیل انرژی گرمایی را به انرژی مکانیکی را دارند و قادرند که با به خاطر سپاردن شکل اولیه بعد از تغییر شکل به شکل اولیه خود بازگردند اساس این پدیده در آلیاژهای حافظه دار مبتنی بر تغییر حالت مارتنزیتی است پدیده حافظه داری را بدین صورت می تون تعریف کرد که اگر نمونه در حالت کاملاً مارتنزیتی به مقدار معینی تغییر فرم داده شود با گرم کردن آن برگشت به حالت آستنیتی شکل نمونه به حالت اول باز میگردد.