بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
دانشکده مهندسی و علم مواد

آلیاژهای حافظه دار و مواد هوشمند

جلسه پنجم
(آلیاژهای حافظه دار – ۳)

دکتر رضا اسلامی فارسانی

آلیاژهای حافظه دار

فهرست مطالب

کریستالوگرافی مارتنزیتی

رفتار ترمودینامیکی آلیاژهای حافظه دار

مدلسازی ترمودینامیکی آلیاژهای حافظه دار

کاربردهای آلیاژ حافظه دار

Company Logo

آلیاژهای حافظه دار

کریستالوگرافی مارتنزیتی

بررسی بر روی تغییر حالت متالورژیکی نمونه جامد، تغییر آرایش اتم ها بدون هیچ گونه 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 اتم ها 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. در فرآیند حافظه شکلی، جابجایی به صورت جزئی و هماهنگ انجام می شود.

آلیاژهای حافظه دار

کریستالوگرافی مارتنزیتی

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

- ✓ حرکت و جابجایی اتم ها وابسته به درجه حرارت و زمان با تغییر در ترکیب شیمیایی فاز جدید نسبت به زمینه قبلی
- ✓ تغییر آرایش اتمی به صورت هماهنگ وابسته به دما و بدون وابستگی به زمان و عدم تغییر در ترکیب شیمیایی فاز جدید نسبت به زمینه قبلی.

آلیاژهای حافظه دار

کریستالوگرافی مارتنزیتی

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

- ✓ تغییر مکان به صورت شبه برشی می باشد و در آن اتم ها به صورت هماهنگ و گروهی جابجا می شوند.
- ✓ نفوذ 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.

آلیاژهای حافظه دار

کریستالوگرافی مارتنزیتی

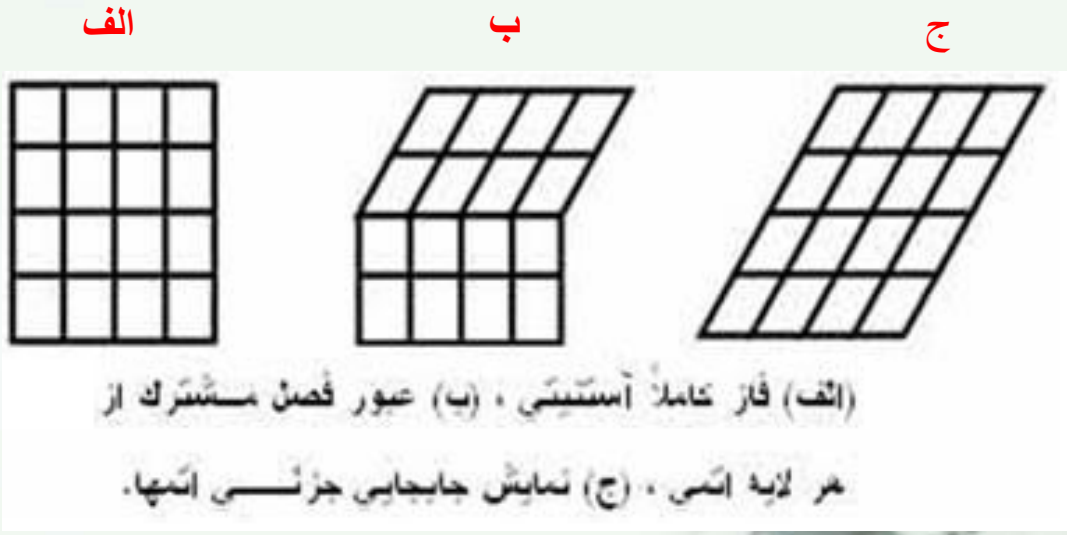
تغییر حالت تبدیل آستنیت به مارتنزیت از لحاظ کریستالوگرافی در سه مرحله قابل بررسی است :

- ✓ تغییر فرم شبکه ای
- ✓ برش ناهمگن
- ✓ دوران شبکه ای

آلیاژهای حافظه دار

کریستالوگرافی مارتنزیتی

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



(الف) فاز کاملاً آستنیتی ، (ب) عبور فصل مشترک از هر لایه اتمی ، (ج) نمایش جابجایی جزئی اتمها.

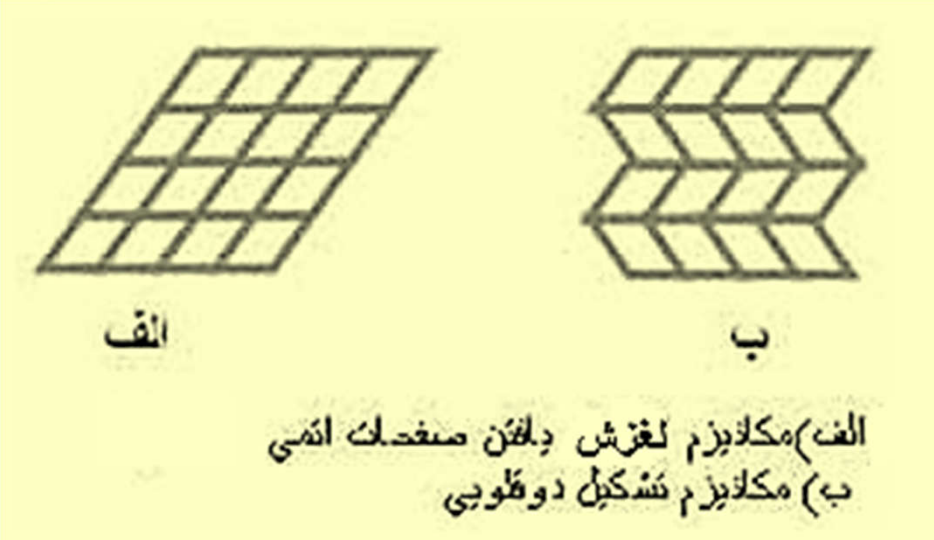
آلیاژهای حافظه دار

کریستالوگرافی مارتنزیتی

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 :

- ✓ مکانیزیم لغزش یافتن صفحات اتمی
- ✓ مکانیزیم تشکیل دوقلویی ها



الف)مکانیزم لغزش یافتن صفحات اتمی
ب) مکانیزم تشکیل دوقلویی

آلیاژهای حافظه دار

کریستالوگرافی مارتنزیتی

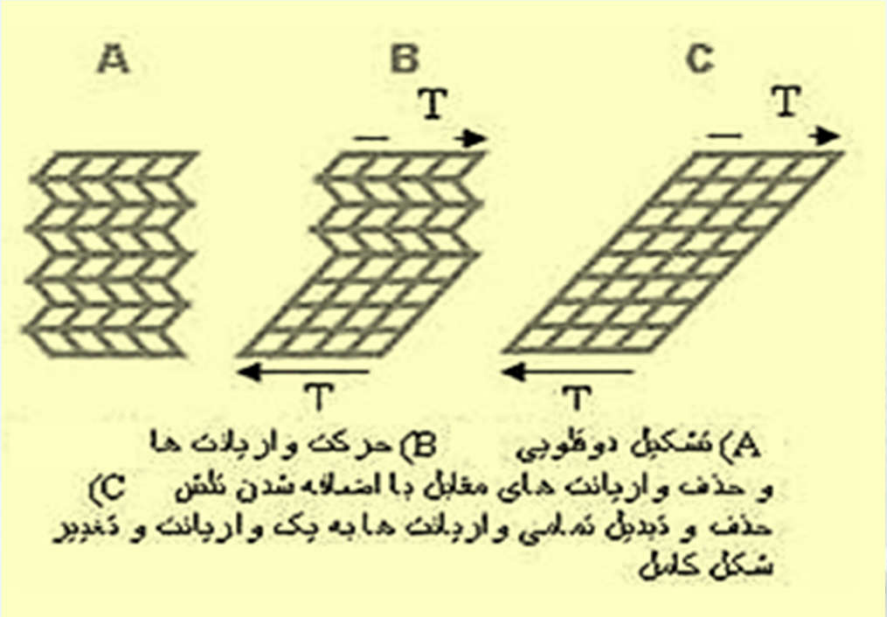
باید توجه داشت که لغزش صفحات اتمی به علت شکسته شدن باندهای اتمی به عنوان مکانیزم تغییر فرم پلاستیک دائم محسوب می شود، در صورتی که در مکانیزم دوقلویی به علت انرژی پایین مرز دوقلویی و برخورداری از تحرک و لغزندگی نسبی تغییر فرم، تغییر فرم غیردائم است.

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.

آلیاژهای حافظه دار

کریستالوگرافی مارتنزیتی

شکل زیر مرز دوقلویی را نمایش می دهد و هر یک از دوقلویی های دو طرف مرز دوقلویی یک وا ریانت را شامل می شود. در صورت وارد کردن تنش برشی به مرز دو قلویی باعث حرکت یکی از واریانت ها شده وواریانت دیگری حذف می شود. این روند می تواند تا تبدیل تمامی واریانت به یک واریانت واحد ادامه یابد.

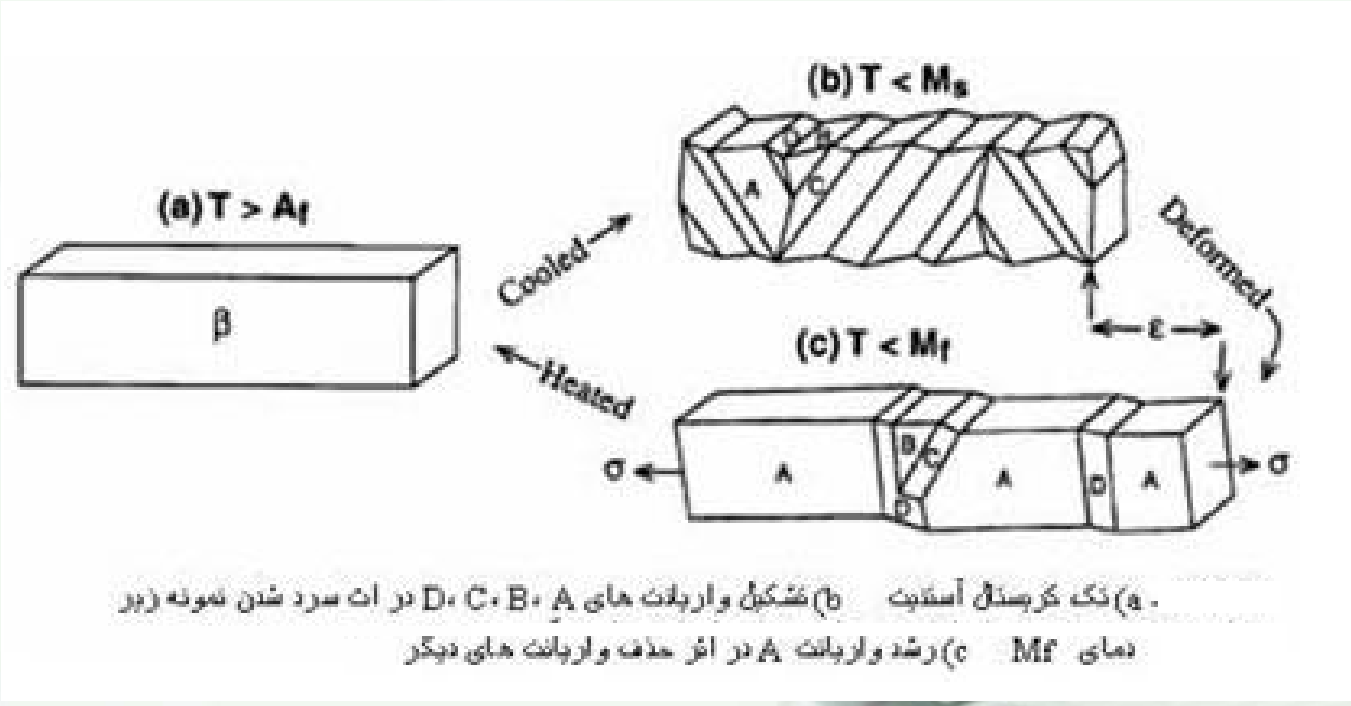


A) تشکیل دوقلویی B) حرکت واریانت ها و حذف واریانت های مقابل با اضافه شدن تنش C) حذف و تبدیل تمامی واریانت ها به یک واریانت و تغییر شکل کامل

آلیاژهای حافظه دار

کریستالوگرافی مارتنزیتی

پدیده حافظه داری در تک کریستال آستنیت در شکل زیر نمایش داده شده است .



a) تک کریستال آستنیت b) تشکیل واریانت های A، B، C و D در اثر سرد شدن نمونه زیر دمای Mf c) رشد واریانت A در اثر حذف واریانت های دیگر

آلیاژهای حافظه دار

کریستالوگرافی مارتنزیتی

- ✓ مرحله اول همان طور که از شکل پیداست، بعد از سرد کردن کریستال در زیر دمای M_f، واریانت های A، B، C و D تشکیل می شوند.
- ✓ مرحله دوم با وارد کردن تنش به کریستال، واریانت ها شروع به حرکت و حذف شدن می کنند تا واریانت واحد A تشکیل شود. حین تشکیل واریانت واحد A کرنش هایی در جهت واریانت A ذخیره می شوند.
- ✓ مرحله سوم مربوط به حرارت دادن کریستال نمونه برای تبدیل مارتنزیت به آستنیت می باشد. از آن جایی که 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.

آلیاژهای حافظه دار

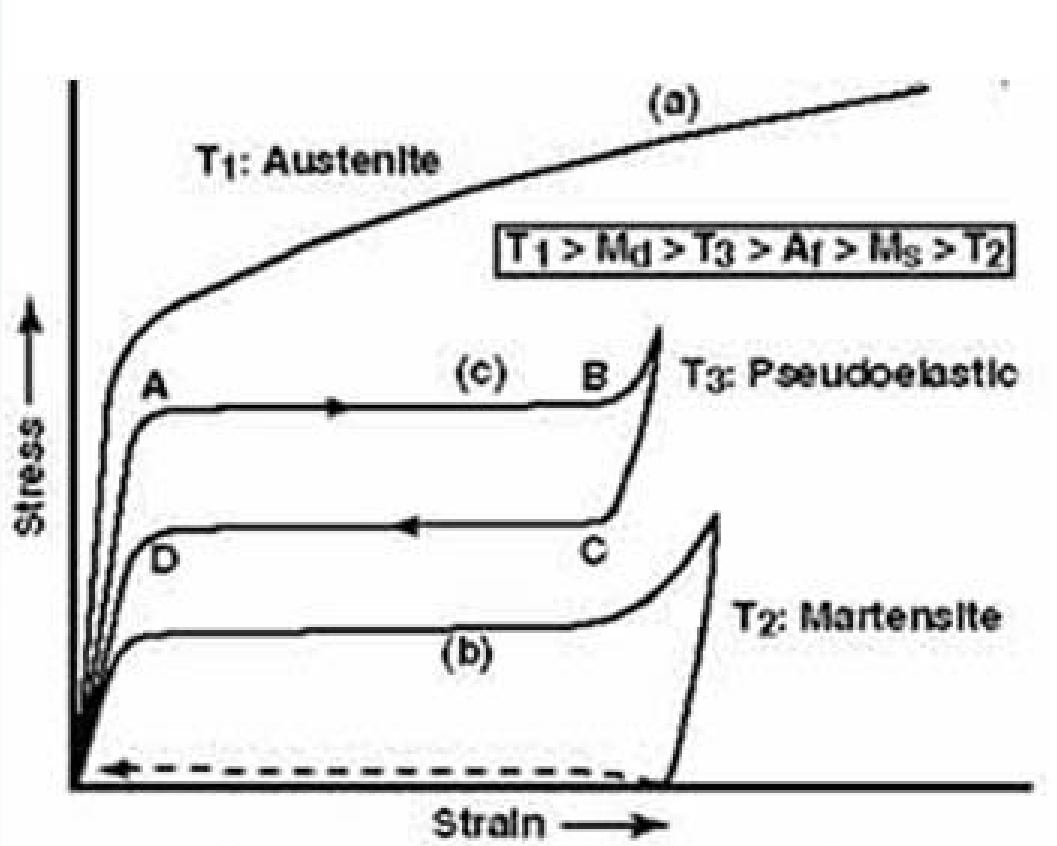
رفتار ترمومکانیکی

- ✓ آلیاژهای حافظه دار در درجه حرارت های مختلف دارای خصوصیات مکانیکی مختلفی می باشند.

- ✓ درادامه منحنی های ساده تنش کرنش برای آلیاژ تیتانیم- نیکل در دماهای مختلف نشان داده شده است. آلیاژ در دماهای پایین، متوسط و بالای دمای استحاله آزمایش شده است.

آلیاژهای حافظه دار

رفتار ترمومکانیکی



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

آلیاژهای حافظه دار

رفتار ترمومکانیکی

- ✓ تغییر شکل در مارتنزیت با چند درصد کرنش و تنش فشاری نسبتاً کم دیده می شود، در حالی که 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 چنان چه که مشاهده می شود در منحنی مربوط به آستنیت با برداشتن تنش و گرم کردن نمونه امکان برگشت پذیری وجود ندارد.

آلیاژهای حافظه دار

رفتار ترمومکانیکی

- ✓ رفتار ترمودینامیکی آلیاژهای حافظه دار به دما، تنش و ترکیب شیمیایی و همچنین 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.

- ✓ در فرآیند سرد کردن و در دمای بالاتر از دمای آغاز فاز مارتنزیت، ماده ۱۰۰٪ در فاز آستنیت می باشد، در حالی که در دمای پایین تر از دمای پایان فاز مارتنزیت، ماده کاملاً در فاز مارتنزیت می باشد. اما در دمای مابین، ماده به صورت دو فازی است و بخشی از آن در فاز مارتنزیت و بخشی از آن در فاز آستنیت است.

آلیاژهای حافظه دار

رفتار ترمومکانیکی

- ✓ خصوصیت جالب توجه درباره منحنی تنش کرنش درقسمت منحنی **C** دیده می شود. پس ازحرارت 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، تغییرشکل نیز به صورت یکنواخت افزایش می یابد (منحنی **AB**).
- ✓ در این هنگام رفتار تغییر شکل و تنش پایداری، مشاهده می شود که با کاهش تنش (منحنی **CD**) مارتنزیت به آستنیت تبدیل می شود. باید توجه داشت که برگشت پذیری انجام شده به خاطر تغییرحرارت نمونه نمی باشد و دلیل آن کاهش فشار است. این پدیده که موجب می شود آلیاژ خاصیت کشسانی نامحدود پیدا کند تحت عنوان خاصیت ارتجاعی کاذب نامیده می شود.

آلیاژهای حافظه دار

مدل های ترمودینامیکی آلیاژهای حافظه دار

- تنش در آلیاژ حافظه‌دار شامل سه قسمت می‌شود

$$(\sigma-\sigma_0) = D\,(\xi)\,(\varepsilon-\varepsilon_0) + \theta\,(T-T_0) + \Omega\,(\xi)\,(\xi-\xi_0)$$

- $D\,(\xi)\,(\varepsilon-\varepsilon_0)$: تنش مکانیکی
- $\theta\,(T-T_0)$: تنش حرارتی
- $\Omega\,(\xi)\,(\xi-\xi_0)$: تنش تبدیل فاز

- مدول یانگ آلیاژ حافظه‌دار به کسر حجمی مارتنزیت وابسته است.

$$D(\xi) = D_A + \xi(D_M - D_A)$$

- $\xi=0$: مدول فاز آستنیت
- $\xi=1$: مدول فاز مارتنزیت

$$\Omega(\xi) = -\varepsilon_L\, D(\xi)$$

ثابت تبدیل فاز

آلیاژهای حافظه دار

وابستگی کسر حجمی مارتنزیت به دما و تنش

❑ مدل تاناکا

$$\xi = 1 - \exp\{a_M(M_s - T) + b_M\sigma\}$$ تبدیل آستنیت به مارتنزیت

$$\xi = \exp\{a_M(A_s - T) + b_A\sigma\}$$ تبدیل مارتنزیت به آستنیت

❑ مدل لیانگ و راجرز

$$\xi = \frac{(1-\xi_A)}{2}\cos[a_M(T - M_f) + b_M\sigma] + \frac{(1+\xi_A)}{2}$$ تبدیل آستنیت به مارتنزیت

$$\xi = \frac{\xi_M}{2}\{\cos[a_A(T - A_s) + b_A\sigma] + 1\}$$ تبدیل مارتنزیت به آستنیت

❑ مدل برینسون

$$\xi = \xi_s + \xi_T$$

تفکیک کسر حجمی مارتنزیت به مارتنزیت ایجاد شده از تنش و دما

آلیاژهای حافظه دار

کاربردهای آلیاژهای حافظه دار

اگرچه تعداد زیادی از آلیاژها، اثر حافظه داری از خود نشان می دهند ولی در حال حاضر آلیاژهای با کاربرد گسترده تجاری شامل آلیاژهای نیکل-تیتانیم و آلیاژهای پایه مس نظیر Cu-Zn-Al و Cu-Al-Ni می باشند.

این آلیاژها از کاربردهای متعددی در لوازم خانگی، صنایع الکترونیک، تجهیزات پزشکی، هوانوردی، صنایع خودرو، روبوت ها و صنایع نظامی برخوردار هستند.

Company Logo

آلیاژهای حافظه دار

تقسیم بندی کاربردهای آلیاژهای حافظه دار

دسته اول

نوع کاربرد: قابلیت بازیابی آزاد شکل اولیه

عملکرد آلیاژ حافظه دار: ایجاد حرکت (یا کرنش). کاربردهایی که در آنها آلیاژ حافظه دار در حین سرد و گرم شدن و بدون اعمال تنش بیرونی، آزادانه شکل اولیه خود را بازیابی می کنند.

نمونه های کاربرد: قاب عینک، آنتن های خودبرافرازنده فضایی، فیلتر سیاهرگ، اسباب بازی و اشکال و مجسمه های فانتزی

Company Logo

آلیاژهای حافظه دار

تقسیم بندی کاربردهای آلیاژهای حافظه دار

دسته دوم

نوع کاربرد: قابلیت بازیابی شکل اولیه تحت شرایط مقید شده

عملکرد آلیاژ حافظه دار: ایجاد تنش (استفاده از نیرو)

نمونه های کاربرد: انواع کوپلینگ ها، گیره ها، پرچ های اتصال و بست ها، حلقه های فلزی جدار نازک جهت اتصال اجزای موشک ها و کلیپس مورد استفاده در جراحی

Company Logo

آلیاژهای حافظه دار

تقسیم بندی کاربردهای آلیاژهای حافظه دار

دسته سوم

نوع کاربرد: محرک های حرارتی و الکتریکی

عملکرد آلیاژ حافظه دار: ایجاد کار. کاربردهایی که در آنها هم تنش و هم کرنش در حین گرم کردن بازیابی شده و کار مکانیکی حاصل، استفاده می شود. این خاصیت در محرک ها بکار می رود.

نمونه های کاربرد: شیر قطع و وصل روغن در اتومبیل، موتورهای حالت جامد، بازوی روبات ها، بازوی بازکننده دریچه چراغ مه شکن، ترموستات شیر رادیاتورها، انواع محرک های لوله ای و پیچشی، بازوی هواکش گلخانه، میکروپمپ کلیه مصنوعی، کمک فنرهای ماشین

Company Logo

آلیاژهای حافظه دار

تقسیم بندی کاربردهای آلیاژهای حافظه دار

دسته چهارم

نوع کاربرد: قابلیت ابرکشسانی (رفتار سوپرالاستیسیته)

عملکرد آلیاژ حافظه دار: ایجاد کرنش زیاد. کاربردهایی که براساس خاصیت کشسانی یا بازگشت فنری بنیان نهاده شده و سبب ذخیره شدن انرژی مکانیکی می شوند.

نمونه های کاربرد: شیر فنرهای ذخیره انرژی سینتیکی، سیم های ارتودونسی در دندانپزشکی، فنرهایی با رفتار الاستیکی تا ۱۵ برابر فولادهای فنر

Company Logo

آلیاژهای حافظه دار

تقسیم بندی کاربردهای آلیاژهای حافظه دار

دسته پنجم

نوع کاربرد: قابلیت میرا کنندگی ارتعاشات

عملکرد آلیاژ حافظه دار: از این قابلیت برای مهار ارتعاشات در سازه هایی که تحت ارتعاشات شدید قرار دارند، استفاده می شود.

نمونه های کاربرد: صفحات آزاد میرا کننده ارتعاش در سفینه های فضایی، پی ساختمان برای میرا کردن ارتعاشات ناشی از زلزله

Company Logo