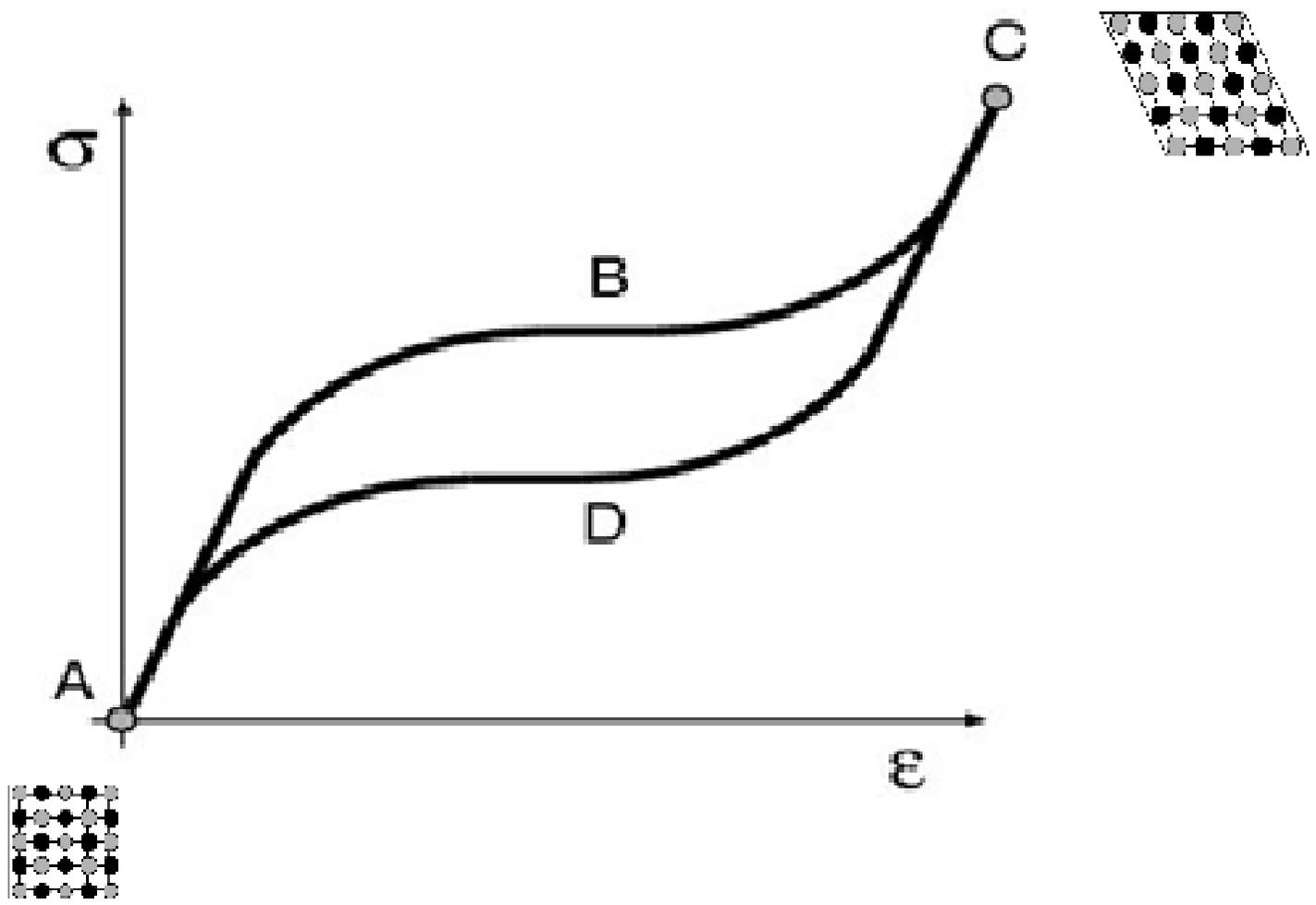
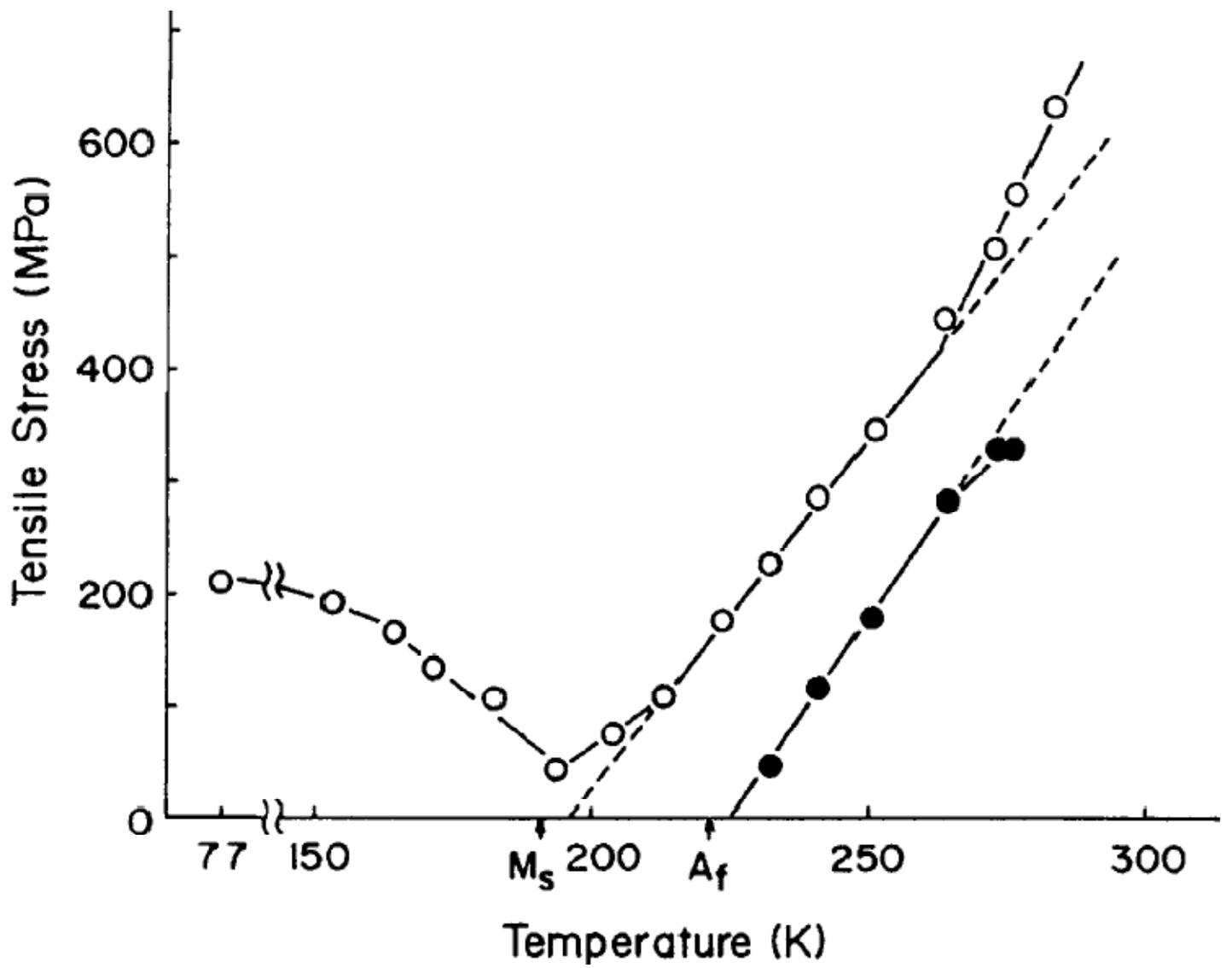
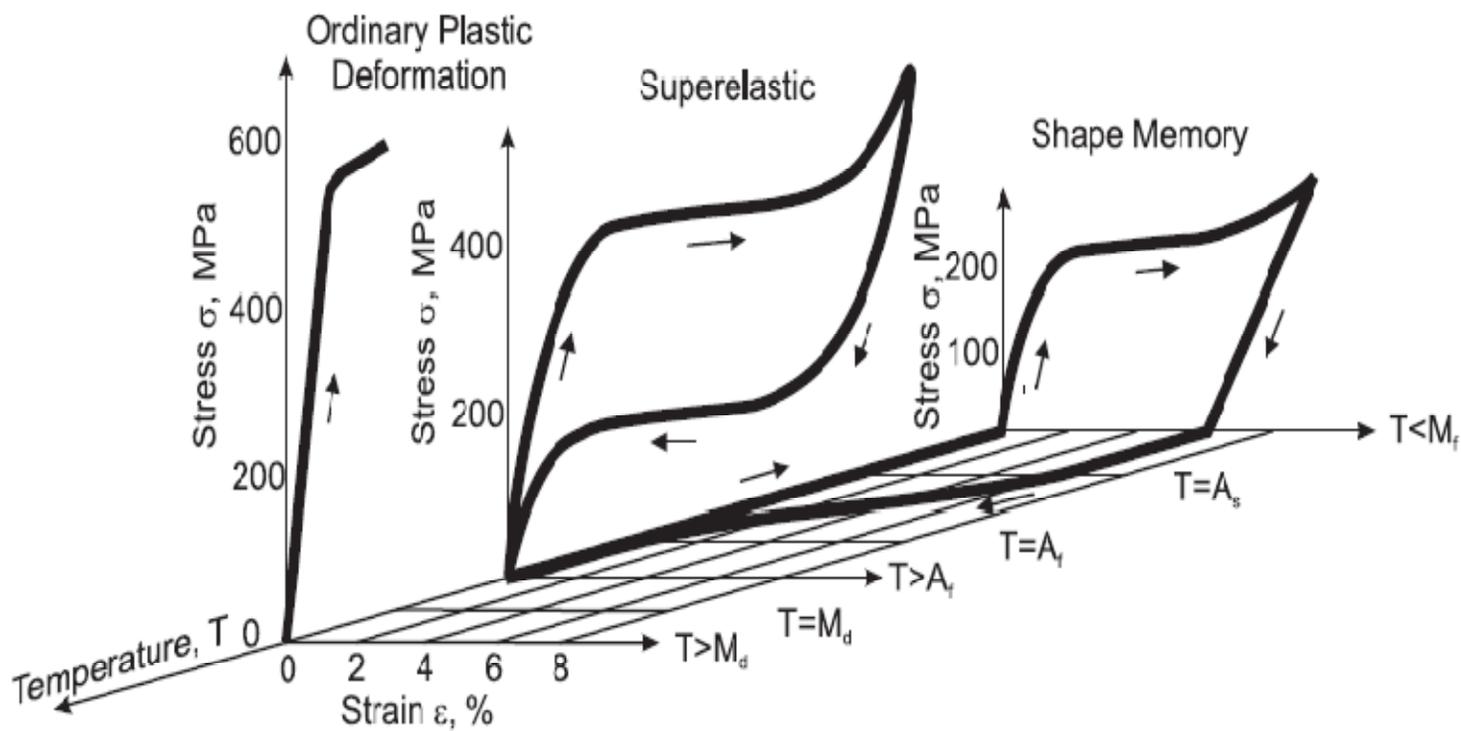


$$\frac{d\sigma_a}{dM_s} = -\frac{\Delta H}{T\varepsilon_0}$$







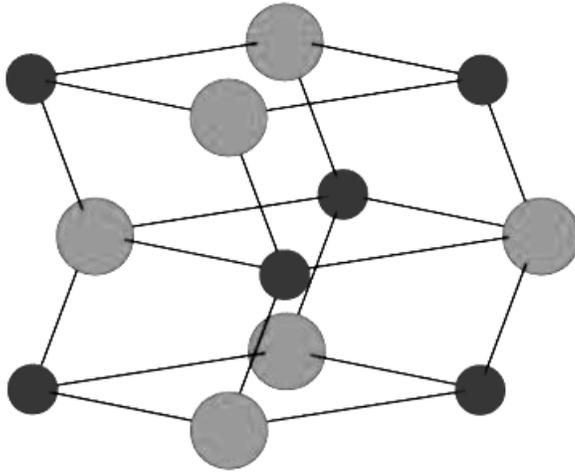
Property	NiTi	Stainless Steel
Recovered Elongation	8%	0.8%
Biocompatibility	Excellent	Fair
Effective Modulus	approx. 48 GPa	193 GPa
Torque ability	Excellent	Poor
Density	6.45 g/cm ³	8.03 g/cm ³
Magnetic	No	Yes
UTS	approx. 1,240 MPa	approx. 760 MPa
CTE	6.6 to 11.0 cm/cm/deg.C	17.3 x 10 ⁻⁶ cm/cm/deg.C
Resistivity (austenite)	100 μΩ*cm	72 μΩ*cm
Resistivity (martensite)	80 μΩ*cm	-----
Thermal Conductivity	10 W/m ⁰ K	-----
Thermal Conductivity(austenite)	0.18 W/cm* °C	-----
Thermal Conductivity(martensite)	0.086 W/cm* °C	-----
Specific Heat	322 j/kg ⁰ K	-----
Latent Heat	24,200 J/kg	-----
Coefficient of Thermal Expansion (austenite)	11.0 E-6 / °C	-----
Coefficient of Thermal Expansion (martensite)	6.6 E-6 / °C	-----
Ultimate Tensile Strength (fully annealed)	895 MPa	-----
Ultimate Tensile Strength (work hardened)	1900 MPa	-----
Elongation to Failure (fully annealed)	25-50 %	-----
Elongation to Failure (work hardened)	5-10 %	-----
Yield Strength (Austenite)	560 MPa	-----
Young's Modulus (Austenite)	75 GPa	-----
Yield Strength (Martensite)	100 MPa	-----
Magnetic Susceptibility	2.5-3.8 uemu/gm	-----
Melting Temperature	1240-1310 °C	-----
Elastic Modulus	28-75 GPa	-----
Poisson's Ratio	0.33	-----
Young's Modulus (Martensite)	28 GPa	-----

خاصیت	فاز آستنیت	فاز مارتنزیت
مقاومت الکتریکی ($\mu\Omega*cm$)	≈ 100	≈ 70
هدایت حرارتی ($W/m^{\circ}C$)	۱۸	۸.۵
مدول یانگ (GPa)	≈ 83	$\approx 28 - 41$
مقاومت تسلیم (MPa)	۱۹۵ - ۶۹	۱۴۰ - ۷۰
شبکه بلوری	مکعب مرکزدار	منوکلینیک

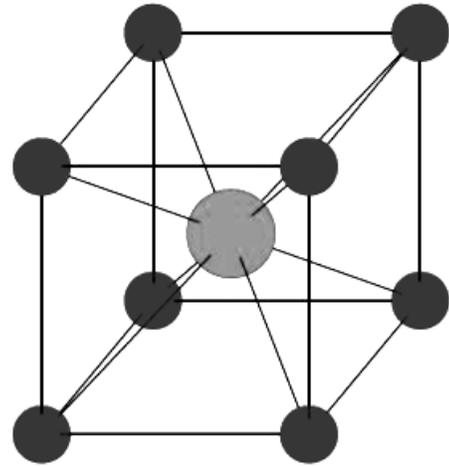
ساختار کریستالی

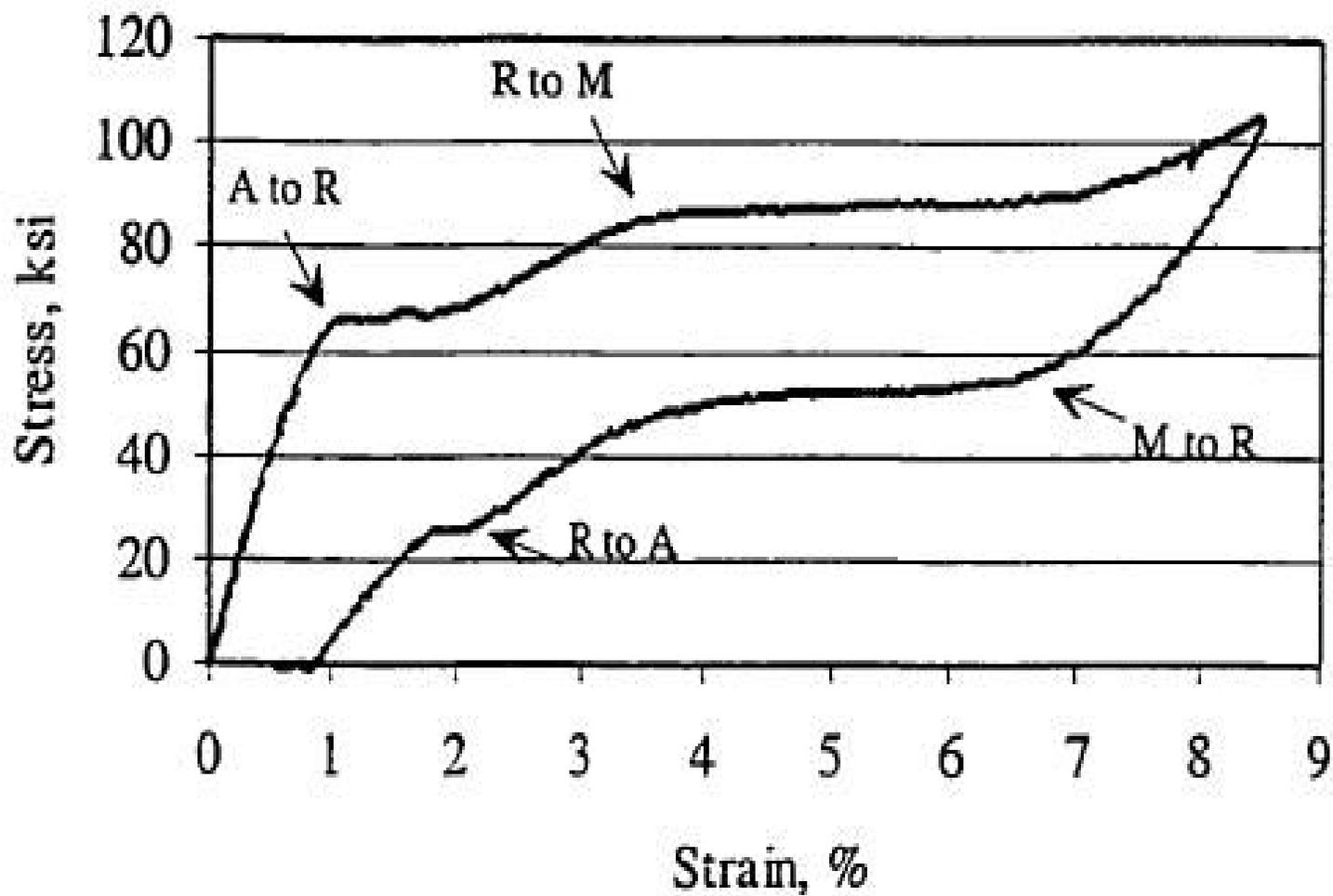
ترکیب بین فلزی $NiTi$ علاوه بر ساختار مونوکلینیک یعنی B_{19}' (یا مارتنزیت)، دارای ساختار رمبوهدرال (R) و ارتورومبیک B_{19} نیز هست. برای مثال در آلیاژهای مس دار نایتینول ($NiTiCu$)، مارتنزیت دارای شبکه‌ی اورتورومبیک است.

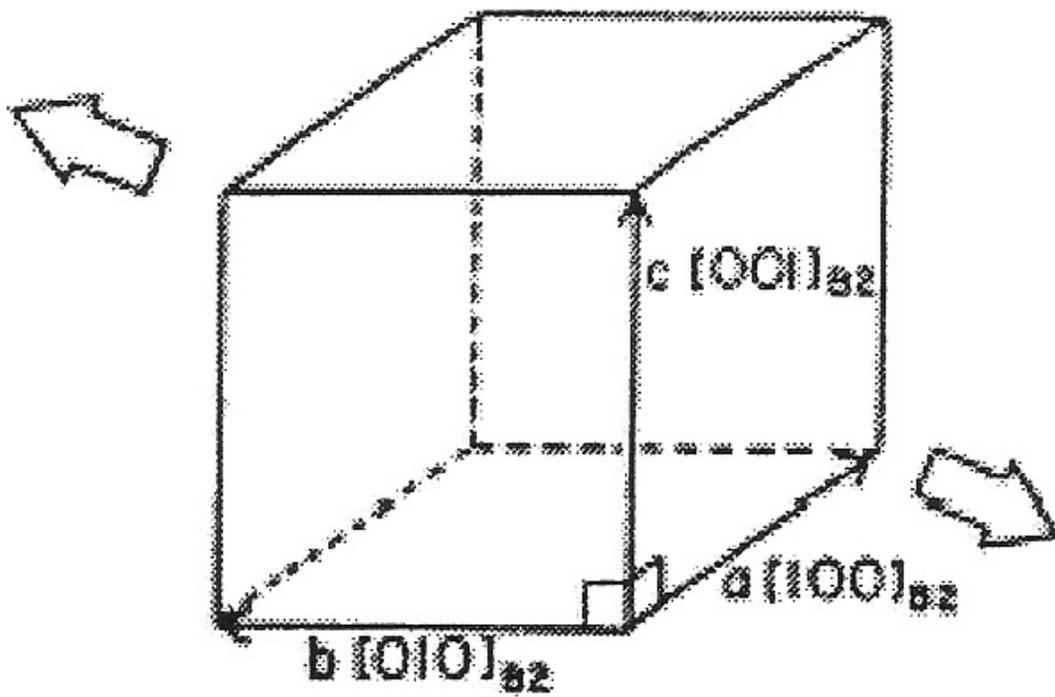
B_{19}'



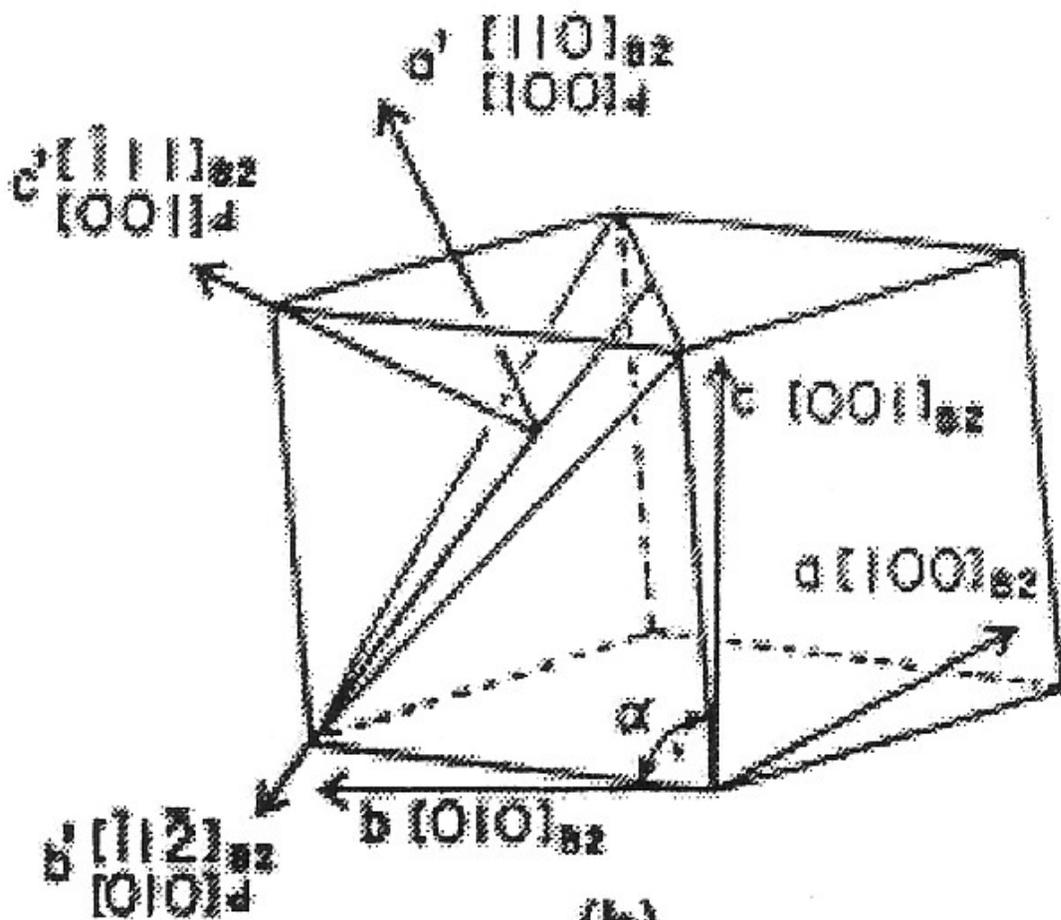
B_2



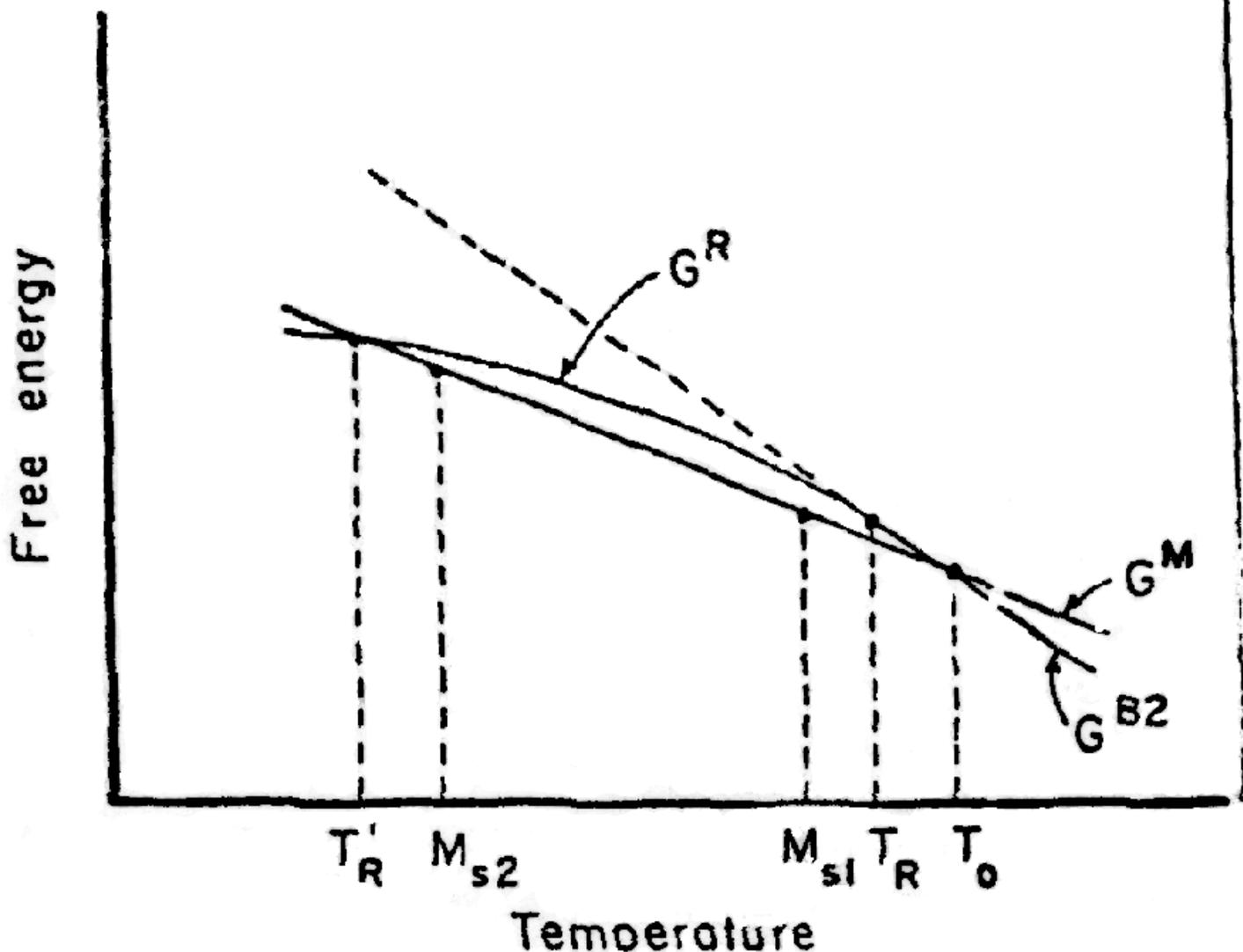




(a)



(b)



شرایط لازم برای ایجاد تغییر حالت R :

دو تغییر حالت آستنیت به رمبوئدرال R و آستنیت به مارتنزیت همواره در حال رقابت با یکدیگرند. بطوریکه با به تعویق انداختن تغییر حالت مارتنزیتی، تغییر حالت R را می توان ایجاد کرد. برای این کار سه راه وجود دارد:

- ۱- ایجاد نابجایی های ناشی از کار سرد^۱ که مثلاً^۲ از طریق آنیل^۳ در دمای ۴۰۰ - ۵۰۰ درجه سانتیگراد مرتب شده باشند.
- ۲- وارد کردن رسوب در زمینه بوسیله انجام عملیات پیرسازی در دمای ۴۰۰ - ۵۰۰ درجه سانتیگراد در آلیاژهایی که بیش از ۵۰٪ اتمی نیکل دارند.
- ۳- افزودن مقدار معینی عنصر سوم به نحوی که تشکیل مارتنزیت به تاخیر افتد و در عوض بر پایداری فاز R افزوده شود.

اگر تغییر حالت مارتنزیتی در دمای M_{S1} شروع شود، قبل از رسیدن به دمای T'_R می تواند کامل شود. در صورتی که اگر دمای M_S به دمای T'_R نزدیک باشد (مانند M_{S2}) فقط قسمتی از فاز R به فاز مارتنزیت متحول خواهد شد و باقیمانده فاز R در دماهای پایینتر از T'_R از مارتنزیت پایدارتر خواهد بود [۴۵].

یکی دیگر از نتایج تغییر حالت $B_2 \rightarrow R$ این است که مارتنزیت ممکن است از فاز B_2 یا از فاز R تشکیل شود که بستگی به دماهای M_S و T_R دارد.

افزایش مقاومت الکتریکی: یکی از پدیده های مرتبط با تغییر حالت $B_2 \rightarrow R$

در اثر تبدیل فاز آر به مارتنزیت: افت مقاومت الکتریکی

برای شناسایی فاز R راه های زیر قابل پیشنهاد است:

۱- در صورت وجود تنش پسماند در شبکه کریستالی آلیاژ، متناسب با مقدار این تنش فاز R در زمینه دیده می شود: این تنش پسماند بوسیله دستگاه جانبی متصل به میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) قابل تشخیص است.

۲- با توجه به این نکته که اصولاً برخلاف فولادها سختی فاز R از سختی فاز آستنیت کمتر است، پس می توان با تست میکرو هاردنس (ویکرز)، سختی فازها را بدست آورده و آنها را از هم تمیز داد.

۳- با استفاده از میکروسکوپ الکترونی تونلی (TEM) می توان به بررسی شبکه کریستالی مواد پرداخت که بر این اساس و با توجه به شبکه کریستالی فازها که آستنیت (مکعب مرکزدار BCC)، فاز R (رمبوندرال) و مارتنزیت (BCT) است این فازها شناسایی می شوند.

۴- با بررسی نمودار تغییر مقاومت الکتریکی بر حسب دما می توان به وجود فاز R پی برد چرا که با تشکیل فاز R، تنش در فاز مادر افزایش یافته و نتیجتاً مقاومت الکتریکی نیز زیاد می شود که بصورت قله ای کوتاه مشاهده می شود.

۵- وجود فازهای ناکافی (IC) که باعث ایجاد اعوجاج به مقدار کم و تغییرات بلورین و تغییراتی مانند افزایش تنش شبکه و تغییر حجم و ... می شود نیز می تواند موید وجود فاز R باشد.

۶- البته روش جدیدی برای شناسایی وجود دارد که با استفاده از اصل انعکاس و بازگشت صدا در اثر برخورد به موانع عمل می کند و این بازگشت متناسب است با تضعیف صوت در اثر جذب قسمتی از آن در اثر برخورد به مانع که مقدار آن برای فازهای مختلف متفاوت است. البته قدرت و شدت صوت ورودی در حد مگاهرتز است و با دریافت موج برگشتی و تفسیر آن می توان به وجود هر فاز و حتی مقدار آن بطور نسبی پی برد.

۷- تشکیل فاز R توأم با تغییرات حجمی منفی (انقباض) و ایجاد تنش کششی و تشکیل مارتنزیت با تغییرات حجمی مثبت (انبساط) و ایجاد تنش فشاری همراه است.

آلیاژ نایتینول با هیستریزس دمایی باریک

جایگزینی مس بجای نیکل در آلیاژهای هم اتمی $NiTi$ ، اثرات جالبی در رفتار تغییر حالت، شاخصه های حافظه داری و خواص دیگر دارد. آلیاژهای سه تایی $NiTiCu$ حساسیت کمتری به دمای شروع تغییر حالت مارتنزیتی نشان می دهند. هیستریزس دمایی تغییر حالت می تواند بطور چشمگیری از دمای بیشتر از $30K$ به کمتر از $10K$ کاهش یابد، ظرفیت میرایی می تواند به بیشتر از 10 افزایش یابد و اختلاف بیشتری بین چقرمگی فاز مادر و مارتنزیت ایجاد می شود. این حالات، آلیاژ سه تایی $Ti-Ni-Cu$ را به عنوان عامل فعال ساز برای سیستم های هوشمند مناسب می سازد.

البته با افزودن مس (از $7/5$ درصد اتمی تا 10 درصد اتمی) آلیاژ ترد می شود و هرچه میزان مس افزوده شده بیشتر باشد، آلیاژ ترد تر است.

آلیاژهای حافظه دار با هیستریزس دمایی وسیع

افزودن نایوبیم به آلیاژ $TiNi$ باعث تثبیت و توقف دمای M_s می شود و لذا می توان محدوده تغییر حالت مارتنزیت به آستنیت را تا $150K$ وسعت داد. آلیاژهای حافظه دار با هیستریزس دمایی وسیع در کاربردهای کوپلینگ و اتصال قطعات بسیار مناسب می باشند. آلیاژ $NiTiNb$ معمولترین و تجاری ترین نوع مورد استفاده در این گروه می باشند. در این آلیاژهای سه تایی میزان کمی نایوبیم درون زمینه آستنیت حل می شود و بیشتر آن به شکل فاز دوم غنی از نایوبیم - که بنظر عامل وسیع شدن هیستریزس تغییر حالت می باشد - رسوب می کند.

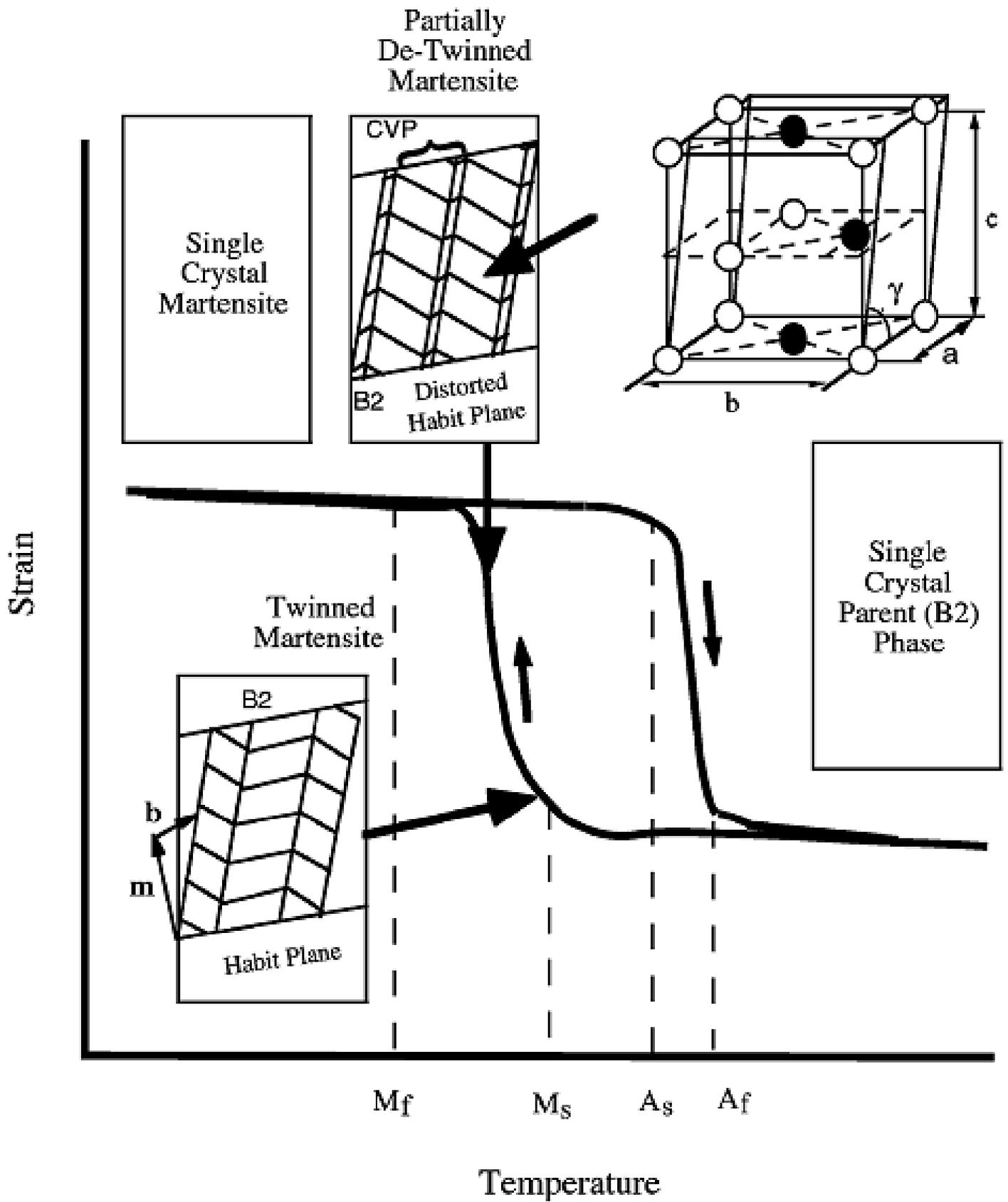
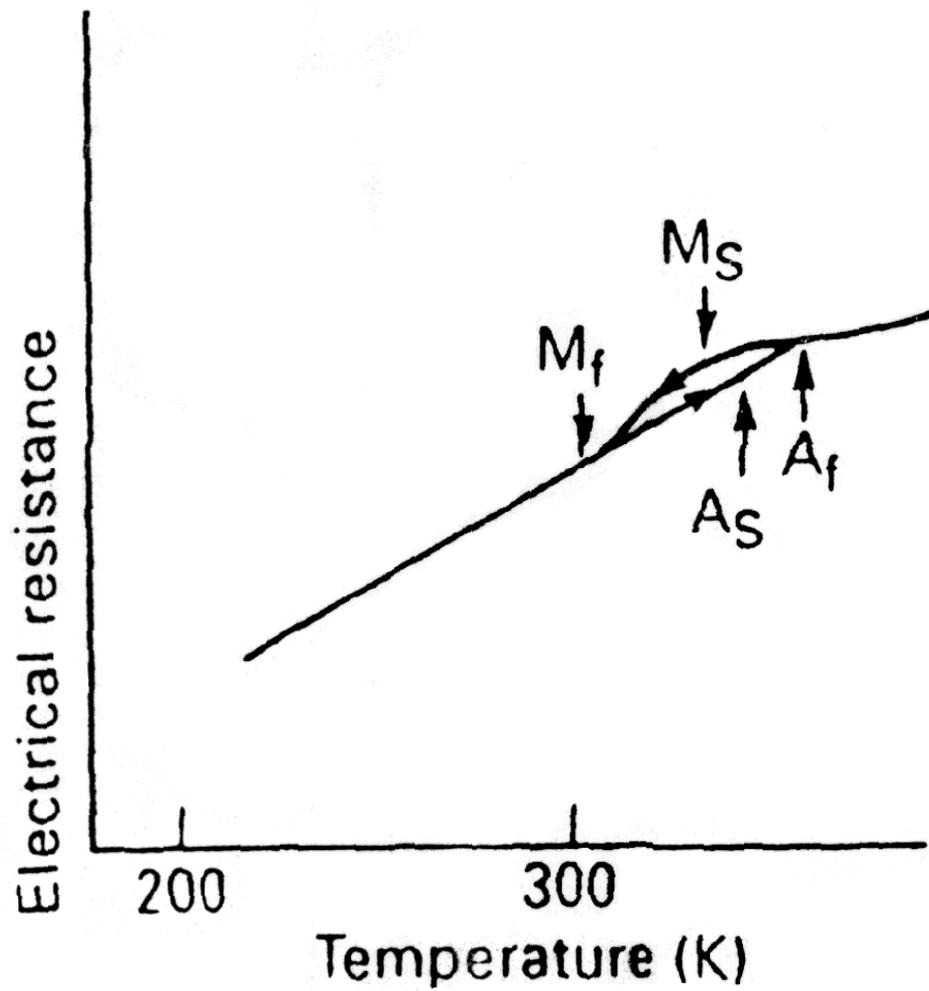


Fig. 1—Schematic of the transformation and detwinning processes during temperature cycling under tension.



شکل ۲۳- منحنی تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب درجه سانتیگراد [۴۲]

این رفتار ناشی از وجود میدان‌های تنش داخلی در اثر ایجاد رسوبات کوه‌رنت و یا ایجاد چگالی نابجایی در زمینه‌ی $NiTi$ است. این میدان‌های تنشی باعث ایجاد گونه‌های مارتنزیت با جهات مرجح، در حین عملیات سردسازی می‌شوند. چند روش برای ایجاد رفتار حافظه‌داری دوطرفه وجود دارد که عبارتند از:

- سرد کردن تا زیر M_f ، کارسرد تا بالای حد بازیابی کرنش، بالا بردن تا دمای A_f
- انجام عملیات بازیابی کرنش بر پایه‌ی رفتار حافظه‌داری یک‌طرفه به صورت سیکلی (بهتر است در دمای بالای A_f نمونه تحت بار باشد).
- بارگذاری و باربرداری بالای A_f و زیر M_d در حالت سوپرااستیک بصورت سیکلی.
- تغییر فرم بالای A_f و تشکیل مارتنزیت، سرد کردن زیر دمای M_f در حال بارگذاری و سپس بالا بردن دما برای بازگشت کرنش برای چندین بار. این روش اثرگذارترین روش برای ایجاد رفتار حافظه‌داری دوطرفه است.

تریت کردن آلیاژ برای حافظه داری دو طرفه:

القای تغییر فرم مناسب به فازهای آستنیت و مارتنزیت:

۱- قرار گرفتن تحت چرخه های $S.M.E$:

در این روش نمونه تا زیر دمای $T < M_f$ سرد شده و تغییر شکل داده می‌شود تا واریانت مرجح در حالت مارتنزیتی تشکیل شود

سپس نمونه تا بالای دمای خاتمه تغییر حالت آستنیتی $T > A_f$ حرارت داده می‌شود.

توجه: میزان تغییر شکل در هر مرحله نباید بیشتر از ۷-۸ درصد باشد

قابلیت بازیابی کرنش برای آلیاژ پلی کریستال می‌تواند به ۸٪ برسد و برای نوع تک کریستال تا ۱۰٪ هم میسر است.

³ Two- shape memory effect

۲- قرار گرفتن تحت چرخه های *S.I.M*:

برای این کار نمونه در دمایی بالاتر از دمای شروع تغییر حالت مارتنزیتی ($T > M_s$) تغییر شکل داده می شود تا مارتنزیت ناشی از تنش (*S.I.M*) تشکیل شود، سپس چرخه معکوس با برداشتن بارگذاری، بر روی نمونه اعمال می شود. در این روش نیز باید توجه داشت تا کرنش ایجاد شده در نمونه بیشتر از حلقه کامل فوق الاستیک در منحنی تنش-کرنش نشود.

پس از اعمال هر کدام از چرخه های فوق پدیده حافظه داری دو طرفه، در نمونه مشاهده خواهد شد و بسته به اینکه کدامیک از چرخه های فوق برای تربیت کردن نمونه انتخاب شود نام همان چرخه به نمونه اطلاق می شود.

نوع دیگری از رفتار حافظه داری دو طرفه وجود دارد که با پیر کردن نمونه های غنی از نیکل تحت بارگذاری^۴ ظاهر می شود که به آن اصطلاحاً اثر بارگذاری *All Round*^۵ گفته می شود. [۴۰]

۲-۱-۶- حافظه داری یک طرفه و دوطرفه

معمولاً حافظه داری به حالتی اطلاق شد که آلیاژ قابلیت برگشت به شکل اولیه خود پس از حرارت دادن از فاز مارتنزیت به آستنیت را دارد اما آلیاژ پس از سرد کردن مجدد به حالت تغییر فرم یافته خود باز نمی گردد که به آن حافظه داری یک طرفه اطلاق می گردد. در شرایطی و در برخی کاربردها لازم است که حافظه داری به صورت سیکلی باشد یعنی بدون اعمال نیروی خارجی در حین گرم و سرد کردن، آلیاژ از خود حرکت دو طرفه داشته باشد که به آن حافظه دارای دوطرفه اطلاق می گردد. برای حافظه داری دو طرفه روشهای متعددی وجود دارد که عبارتند از:

الف- توسط اعمال تنش پیشقدر *Biasing Stress* [۳۱]

^۴- Constrained Ageing

^۵- All Round Shape Memory Effect

تنش پیشقدر خارجی به مثابه وجود نیروی برگرداننده فنری شکل است که می‌تواند ماده تحول یافته را به حالت اولیه خود برگرداند. برای مشاهده حافظه داری دو طرفه، فاصله دمای کاری باید مابین دماهای تغییر فاز تحول مارتنزیتی مستقیم و معکوس باشد. در بسیاری از موارد تنش پیشقدر باید بیشتر از تنش بحرانی برای تغییر حالت مارتنزیتی و کمتر از تنش لغزشی آلیاژ باشد. این بدان معنی است که این تنش می‌تواند در فاز مارتنزیت تغییر فرم قابل ملاحظه‌ای ایجاد نماید اما در فاز آستنیتی تغییر فرم الاستیکی اندکی را به همراه آورد. در این حالت در طول سیکل‌های گرم و سرد کردن، حرکت لازم مابین فازهای مارتنزیت و آستنیت حاصل می‌گردد.

ب- حافظه‌داری دو طرفه به صورت ذاتی

حتی بدون اعمال تنش پیشقدر خارجی هم می‌توان حرکتهای سیکلی را در آلیاژ ایجاد نمود که خاصیت حافظه داری دو طرفه داشته باشد. اما تنش پیشقدر مورد نیاز توسط تنشهای داخلی ناشی از نواقص موجود در آلیاژ چون نابجایی‌ها و یا سطوح رسوبات ناشی می‌شود. در این حالت، مارتنزیت پس از سرد شدن، کاملاً به خود انطباقی نمی‌رسد اما آرایشی را می‌پذیرد که منطبق بر توزیع واریانت‌ها با جهات مختلف است. در نتیجه یک تغییر شکل سیکلی در حین سرد و گرم کردن ایجاد می‌شود.