دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مواد
گرایش شناسایی، انتخاب و روش ساخت مواد مهندسی

عنوان

تولید آلیاژ NiTiCu نانو ساختاری به روش آلیاژ سازی مکانیکی و ارزیابی رفتار حافظه داری و خواص مکانیکی آن

استاد راهنما:

پروفسور علی شکوه فر

نگارش:

مرتضی قدیمی

تابستان ۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به

مادرم

که تمامی وجودم و همه‌ی هستی من بود...

تاییدیه هیئت داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان:

تولید آلیاژ NiTiCu نانو ساختاری به روش آلیاژ سازی مکانیکی
و ارزیابی رفتار حافظه داری و خواص مکانیکی آن

توسط آقای **مرتضی قدیمی** صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته: مهندسی مواد گرایش: شناسایی، انتخاب و روش ساخت مواد مهندسی، مورد تأیید قرار می دهد.

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا موسسه	امضا
۱	استاد راهنما	پروفسور علی شکوه فر	استاد	دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	
۲	استاد ممتحن داخلی	دکتر محمد حسین سیادتی	استادیار	دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	
۳	استاد ممتحن داخلی	دکتر رضا اسلامی فارسانی	استادیار	دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	
۴	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمد حسین سیادتی	استادیار	دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	

تاییدیه صحت و اصالت نتایج

موضوع پایان نامـه: **تولید آلیاژ NiTiCu نانو ساختاری به روش آلیاژ سازی مکانیکی و ارزیابی رفتار حافظه داری و خواص مکانیکی آن**

استاد راهنما: پروفسور علی شکوه فر

دانشجو: مرتضی قدیمی

شماره دانشجویی: ۸۸۰۲۵۲۴

اینجانب مرتضی قدیمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی مواد گرایش شناسـایی، انتخـاب و روش ساخت مواد مهندسی، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صـنعتی خواجـه نصـیرالدین طوسـی گواهی می نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تأیید می باشد و در موارد استفاده از کار دیگر محققان بـه مرجـع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه، گواهی می نمایم که مطالب منـدرج در پایـان نامـه تـاکنون برای دریافت هیچ مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشـده اسـت و در تدوین متن پایان نامه چارچوب مصوب دانشگاه به طور کامل رعایت شده است.

نام و نام خانوادگی: مرتضی قدیمی

امضا و تاریخ:

فرم حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱. حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری بـه صـورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد. ضمنا متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲. کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی می باشد و بـدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تقدیر و تشکر

در راستای اجرای مراحل تحقیقاتی این پژوهش طی یک سال گذشته، نگارنده لازم می دارد تا مراتب تشکر و قدردانی عمیق خود را از جناب آقای پروفسور علی شکوه فر به پاس حمایت ها و راهنمایی های خردمندانه، گرانقدر و راهگشای ایشان ابراز دارد. هم چنین از کلیه دوستان گرامی و کارشناسان محترم آزمایشگاه های تحقیقاتی مواد پیشرفته و نانو تکنولوژی، علم مواد و میکروسکوپ الکترونی نیز بابت تلاش های خالصانه شان سپاسگزاری می گردد.

چکیده

در این پژوهش آلیاژ حافظه دار NiTiCu نانو بلوری به طور موفقیت آمیزی توسط روش آلیاژسازی مکانیکی و عملیات حرارتی تابکاری سنتز شد. نتایج آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) مشخص نمود که آسیاب کاری مخلوط پودرهای با خلوص بالای اولیه و حاوی درصدهای گوناگونی از عنصر مس در دستگاه آسیاب مکانیکی به مدت ٦٠ ساعت، منجر به انحلال مس در شبکه آستنیت (B2) و تشکیل ترکیب بین فلزی NiTi می شود. تابکاری مخلوط پودرها در دمای ۱۱۷۳ کلوین و برای مدت زمان ۹۰۰ ثانیه، منجر به تشکیل فاز NiTiCu، وقوع پدیده رشد دانه و رهایش کرنش های داخلی می گردد. جهت ارزیابی ریز ساختاری محصولات از مشاهدات با میکروسکوپ های الکترونی روبشی (SEM) و عبوری (TEM) سود جسته شد. نتایج بررسی ها دلالت بر مورفولوژی مناسب و توزیع همگن عناصر آلیاژی در ترکیبات سنتز شده را داشته است. ایجاد ساختار نانومتری به دلیل کاهش چشمگیر هیسترزیس حرارتی منجر به بهبود رفتار ترمو الاستیسیته و حافظه داری آلیاژ گردیده است. مقایسه خواص مکانیکی میان ترکیب سنتز شده با نمونه های هم نوع تولید شده با روش های مرسوم، حاکی از افزایش قابل ملاحظه سختی در نمونه نانو بلوری به دلیل کاهش اندازه بلورک ها و افزایش عیوب شبکه ای بوده است.

کلمات کلیدی: آلیاژ NiTiCu، حافظه داری، تابکاری، پراش اشعه ایکس، نانو ساختار

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

۱-۱. مقدمه..... ٤

۱-۲. اهداف پروژه..... ۸

فصل دوم: مروری بر منابع

۲-۱. پدیده حافظه داری..... ۱۱

۲-۲. دگرگونی مارتنزیتی..... ۱۵

۲-۳. سوپرالاستیسیته..... ۱۷

۲-٤. تعیین دماهای دگرگونی..... ۱۸

۲-۵. دگرگونی های فازی در آلیاژهای حافظه دار..... ۲۱

۲-٦. خواص مکانیکی..... ۲۸

۲-۷. روش های تولید..... ۳٤

۲-۸. کاربردها..... ٤۰

فصل سوم: فرایندهای آزمایشگاهی

۳-۱. مواد مصرفی..... ٤۵

۳-۲. سنتز نمونه توسط دستگاه آسیاب مکانیکی..... ٤۵

۳-۳. ارزیابی ریز ساختاری و مورفولوژیکی..... ٤۸

۳-٤. ارزیابی رفتار حافظه داری..... ۵۰

۳-۵. مطالعه خواص مکانیکی..... ۵۱

فصل چهارم: نتایج و بحث

٤-۱. ارزیابی فازی و مطالعه مشخصه های ساختاری..... ۵٤

٤-۲. بررسی رفتار حافظه داری..... ٦٤

٤-۳. ارزیابی خواص مکانیکی..... ٦۷

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

مراجع..... ۷۰

دستاوردهای پژوهش..... ۷۷

فهرست شکل ها

شکل۲-۱. نمودار تعادلی آلیاژ NiTi ۷
شکل۲-۲. بخشی از نمودار تعادلی NiTi ۸
شکل۲-۳. طرحواره مکانیسم اثر حافظه داری ۸
شکل۲-٤. طرحواره دگرگونی مارتنزیتی در آلیاژ NiTi ۱۲
شکل۲-۵. دماهای دگرگونی تعیین شده با مطالعه کالریمتری روبشی تفاضلی (DSC) آلیاژ NiTiCu10. ..... ۱۵
شکل۲-٦. منحنی DSC آلیاژ NiTi غنی از نیکل تابکاری شده در دمای ۹۲۳ درجه سانتی گراد ۱۵
شکل۲-۷. میکروگراف الکترونی رسوبات Ti_3Ni_4 ..... ۱۷
شکل۲-۸. نمودار تعادلی سیستم NiTiCu در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد ۱۹
شکل۲-۹. منحنی DSC آلیاژ NiTiMo1 ..... ۲۱
شکل۲-۱۰. اثر افزودن عنصر آلیاژی سوم روی هیسترزیس تنشی آلیاژ حافظه دار NiTi ۲۱
شکل۲-۱۱. منحنی های سرمایشی و گرمایشی آلیاژ NiTiCu10 غنی از نیکل ۲۲
شکل۲-۱۲. منحنی های دما- انعطاف پذیری آلیاژ NiTiCu حاصل از چرخه های حرارتی تحت بار ثابت ۲۳
شکل۲-۱۳. منحنی DSC نوار NiTiCu25 تابکاری شده در دمای ٤۰۰ درجه سانتی گراد ۲٤
شکل۲-۱٤. منحنی DSC نوار NiTiCu25 تابکاری شده در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد ۲٤
شکل۲-۱۵. مقایسه منحنی سوپرالاستیسیته نوار آلیاژی NiTiCu در مقایسه با سیم آلیاژی NiTi ۲۵
شکل ۲-۱٦. منحنی تنش-کرنش آلیاژ هم اتمی نیکل- تیتانیم ۲٦
شکل ۲-۱۷. منحنی تنش-کرنش آلیاژ NiTi تابکاری شده در دمای ٤۰۰ درجه سانتی گراد ۲۷
شکل۲-۱۸. منحنی تنش-کرنش آلیاژ NiTiCu10 آبدهی شده از دمای ۱۱۲۳ کلوین ۲۷
شکل۲-۱۹. مقایسه منحنی تنش-کرنش آلیاژهای NiTi و NiTiCu ۲۸
شکل۲-۲۰. تصویر SEM مخلوط پودری نیکل، تیتانیم و مس آسیاب شده برای مدت ۵ ساعت ۳۳
شکل۲-۲۱. تصویر SEM مخلوط پودری نیکل،تیتانیم و مس آسیاب شده برای مدت ٤۸ ساعت ۳۳
شکل۲-۲۲. منحنی DSC آلیاژ NiTiCu3 تولید شده به روش متالورژی پودر و تف جوشی شده در دماهای مختلف ۳٤
شکل۲-۲۳. منحنی DSC آلیاژ NiTiCu20 تولید شده به روش متالورژی پودر و تف جوشی شده در دماهای مختلف ۳٤
شکل۲-۲٤. مقایسه مقاومت به خوردگی آلیاژ دوتایی NiTi با آلیاژهای سه تایی NiTiCu و TiMo ۳٦
شکل ۳-۱. دستگاه آسیاب مکانیکی مورد استفاده جهت سنتز ترکیب آلیاژی..... ٤۱
شکل ۳-۲. دستگاه جعبه دستکش..... ٤۱
شکل ۳-۳. درپوش جدید طراحی شده برای دستگاه آسیاب مکانیکی..... ٤۲
شکل ۳-٤. دستگاه پراش سنج اشعه ایکس مورد استفاده برای آنالیز فازی..... ٤۳
شکل ۳-۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی جهت ارزیابی های ریز ساختاری a. روبشی و b. عبوری..... ٤٤

شکل۳-٦. تصویر کوره مورد استفاده جهت انجام فرآیند تابکاری..... ٤٥
شکل ۳-۷. تصویر دستگاه گرماسنج روبشی تفاضلی مورد استفاده جهت تعیین دماهای دگرگونی..... ٤٦
شکل ٤-۱. الگوی پراش اشعه ایکس ترکیبات آسیاب کاری شده در مدت زمان های مختلف a. NiTiCu5، b. NiTiCu10 و c. NiTiCu20..... ٤٩
شکل ٤-۲. الگوی پراش اشعه ایکس ترکیب دو جزئی NiTi..... ٥١
شکل ٤-۳. منحنی تغییرات اندازه بلورک ها برحسب مدت زمان آسیاب کاری..... ٥٢
شکل ٤-٤. مورفولوژی پودرهای اولیه a. نیکل، b. تیتانیم و c. مس..... ٥٤
شکل ٤-٥. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه های آسیاب کاری شده برای مدت ۱۰ ساعت a . NiTiCu5، b. NiTiCu10 و c. NiTiCu20. ..... ٥٥
شکل ٤-٦. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه های آسیاب کاری شده برای مدت ٦۰ ساعت a. NiTiCu5، b. NiTiCu10 و c. NiTiCu20. ..... ٥٦
شکل ٤-۷. تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نمونه های آسیاب کاری شده برای مدت ٦۰ ساعت a. NiTiCu5، b. NiTiCu10 و c. NiTiCu20. ..... ٥٧
شکل ٤-۸. الگوی پراش نمونه های آسیاب کاری و تابکاری شده در دمای ۹۰۰ کلوین برای مدت ۹۰۰ ثانیه a. NiTiCu5، b. NiTiCu10 و c. NiTiCu20. ..... ٥٩
شکل ٤-۹. منحنی گرماسنجی روبشی تفاضلی روبشی (DSC) نمونه حاوی ۱۰ درصد اتمی مس. ٦٢
شکل ٤-۱۰. منحنی تغییرات سختی برحسب مدت زمان آسیاب کاری مکانیکی. ٦٣
شکل ٤-۱۱. رابطه میان سختی و اندازه بلورک ها. ٦٣

فهرست جدول ها

جدول ۱-۱. پیشرفت های صورت گرفته در آلیاژهای حافظه دار ۳
جدول۲-۲. ثوابت فاز مارتنزیت در آلیاژ NiTi غنی از نیکل ۱۰
جدول۲-۳. داده های بلورشناسی فاز مارتنزیت در آلیاژ NiTi ۱۱
جدول ۲-٤. دماهای دگرگونی به صورت تابعی نسبت به ترکیب شیمیایی Cu ۱۹
جدول ۳-۱. مشخصه های پودرهای اولیه جهت انجام آسیاب کاری ٤۰
جدول ۳-۲. مشخصات نمونه های سنتز شده ٤۲
جدول ٤-۱. نتایج آنالیز طیف سنجی عنصری (EDS) ترکیبات آسیاب کاری شده برای مدت زمان های ۱۰ و ٦۰ ساعت ۵۳
جدول ٤-۲. اندازه بلورک و کرنش شبکه نمونه های تابکاری شده حاوی درصدهای مختلف از عنصر مس ٦۰

فصل اول

مقدمه

مقدمه

پیشرفت روزافزون بشر استفاده از فلزات را به امری اجتناب ناپذیر و غیر قابل انکار بدل نموده است. امروزه دیگر فلزاتی نظیر آهن و مس نمی توانند به تنهایی پاسخگوی نیازهای بشر باشند و در نتیجه رفع این نیازها مستلزم تمرکز بیش تر بر تحقیق و بررسی در زمینه آلیاژهای جدید می باشد. به طورکلی مواد و آلیاژهایی از این قبیل را مواد پیشرفته می نامند و همان گونه که از نامشان پیداست، کاربردهای پیشرفته ای دارند [۱-۳]. از جمله این آلیاژها می توان Ti-6Al-4V را ذکر کرد که در هواپیماهای امروزی کاربردهای بسیاری دارند. در این میان آلیاژهای حافظه دار (SMA) از جایگاه ویژه ای برخوردار می باشند. کاربرد گسترده این آلیاژها در صنعت و پزشکی، این دسته از مواد پیشرفته را به بخشی جدایی ناپذیر از صنعت مبدل نموده است [٤].

آلیاژهای حافظه دار به گروهی از مواد پیشرفته اطلاق می گردد که خواص متمایز و برتری نسبت به سایر آلیاژها دارند. عکس العمل شدید این آلیاژها نسبت به برخی پارامترهای مکانیکی و ترمو مکانیکی و قابلیت بازگشت به شکل اولیه در اثر اعمال پارامترهای مذکور به گونه ای است که رفتار موجودات زنده را تداعی می کند. هنگامی که یک آلیاژ معمولی تحت بار خارجی بیش از حد کشسان قرار می گیرد تغییر شکل می دهد. در حالی که آلیاژهای حافظه دار رفتار متفاوتی از خود ارائه می نمایند. در دمای پایین یک نمونه حافظه دار می تواند تغییرشکل مومسان چند درصدی را تحمل کند و سپس به صورت کامل به شکل اولیه در دمای بالا بازگردد که این حالت صرفا با افزایش دمای نمونه امکان پذیر می باشد [۵-۷]. این فرآیند نخستین بار در سال ۱۹۳۸ مشاهده شد و برای مدت زمان طولانی در حد کنجکاوی آزمایشگاهی باقی ماند. در سال ۱۹٦۲ کشف اثر حافظه داری در آلیاژ نیکل-تیتانیم با درصد اتمی برابر نظر دانشمندان و محققین را به خود جلب نمود. از آن پس آلیاژهای حافظه دار به صورت قابل ملاحظه ای توسعه یافتند و کشف مزایای اساسی و علمی آن ها به طور روزافزون افزونی یافت [۷]. در جدول ۱-۱ تاریخچه و پیشرفت های صورت گرفته در زمینه آلیاژهای حافظه دار نگاشته شده است.

جدول ۱-۱. پیشرفت های صورت گرفته در آلیاژهای حافظه دار [۱-۹].

سال / دهه	پیشرفت صورت گرفته
۱۹۳۸	کشف پدیده حافظه داری در آلیاژ Au-Cd
۱۹٤۹	کشف اثر حافظه داری در آلیاژ Cu-Al
۱۹٥۷	کشف اثر حافظه داری در آلیاژ Cu-Al-Ni
۱۹٦۲	کشف اثر حافظه داری در آلیاژ NiTi هم اتمی
۱۹۷۰	توسعه آلیاژ NiTi در صنایع هوافضا
۱۹۷٥	توسعه آلیاژ NiTi در صنایع پزشکی
۱۹۸۰	تولید برنج های حافظه دار
۱۹۹۰	تولید آلیاژهای حافظه دار چند تایی پایه NiTi
۲۰۰۰	ساخت آلیاژهای حافظه دار نانو بلوری پایه مسی
۲۰۰٤	تولید آلیاژ حافظه دار NiTi نانو ساختاری
۲۰۰۸	سنتز آلیاژهای حافظه دار نانومتری چند جزئی پایه NiTi با ریزساختار نانومتری

اهداف پروژه

۱. تولید ترکیب حافظه دار NiTiCu با ریزساختار نانومتری به روش آلیاژسازی مکانیکی.

۲. بررسی پارامترهای فرآیند تولید روی خواص ساختاری ترکیب سنتز شده.

۳. ارزیابی دماهای دگرگونی آلیاژ حافظه دار.

٤. تعیین و مطالعه خواص مکانیکی (سختی) آلیاژ تولید شده.

در اینجا لازم است که نسبت به تعیین اهداف فوق توضیحاتی داده شود . علت انتخاب مس به عنوان عنصر سوم جهت افزودن به آلیاژ دوتایی NiTi اثرات جالب توجهی است که این عنصر ایجاد می نماید که از جمله آن ها می توان به کاهش هیسترزیس های حرارتی و تنشی و افزایش شکل پذیری و مقاومت به خستگی اشاره داشت. در دسترس و ارزان بودن پودر مس و هم چنین راحتی کار با این عنصر در ترکیب آلیاژی مورد نظر در فرآیند آسیاب کاری از دیگر عوامل مورد توجه جهت انتخاب این ماده می باشد. جهت تولید ترکیب بین فلزی باید روشی را انتخاب نمائیم که قابلیت ساخت آن

را داشته باشد. برای تولید ترکیبات بین فلزی از روش های متعددی استفاده شده است. استفاده از هر کدام از این روش ها دارای معایب و مزایایی می باشد. به عنوان مثال استفاده از تکنیک های مختلف ریخته گری به علت بالا بودن دما، عدم توزیع یکنواخت ذرات، فعالیت زیاد عناصر و احتمال اکسیداسیون در نهایت باعث کاهش خواص مکانیکی محصول می شود. هزینه بالای تجهیزات در سایر روش ها نیز از جمله معایب این روش ها برای ساخت ترکیبات بین فلزی می باشد. از جمله روش هایی که امروزه برای ساخت ترکیبات بین فلزی استفاده می شود می توان به روش آلیاژسازی مکانیکی اشاره نمود. تولید محصولی با ساختار نانو از موارد مهمی است که امروزه بسیار مورد توجه می باشد. اگر از طریق فرآیند آلیاژ سازی مکانیکی بتوانیم محصول نانو ساختار تولید کنیم، به یک ترکیب بین فلزی کاربردی دست خواهیم یافت که تولید آن با سایر روش های ساخت ترکیبات بین فلزی بسیار مشکل می باشد. با توجه به توضیحات مذکور در صورتی که قادر باشیم محصولی ایجاد نماییم که اندازه ذرات آن در حد نانومتر باشند قطعاتی که از این پودرها تهیه خواهند شد دارای خواص مکانیکی قابل توجهی خواهند بود. بنابراین می توان با توجه به محصول به دست آمده عوامل موثر آلیاژ سازی مکانیکی را تغییر داد تا شرایطی به دست آید که محصول نهایی از نظر شکل ظاهری و ریز ساختار در شرایط مطلوبی قرار داشته و شرایط بهینه جهت تولید این ترکیب بین فلزی با توجه به عوامل موجود معرفی گردند.

فصل دوم

مروری بر منابع

۲-۱. مواد محرک و پدیده حافظه داری

موادی که باعث می شوند سازه ها با محیط خود سازگار شوند مواد محرک نامیده می شوند. این مواد می توانند شکل، سفتی، مکان، بسامد طبیعی و سایر مشخصات مکانیکی را در پاسخ به دما و یا میدان های الکترومغناطیسی تغییر دهند. امروزه چهار نوع محرک به طور عمده مورد استفاده واقع می شوند که شامل آلیاژهای حافظه دار، سرامیک های پیزو الکتریک، مواد مغناطیسی سخت و سیالات الکترو رئولوژیکی و مگنتو رئولوژیکی می باشند [۸].

نیتینول به عنوام مهم ترین ماده محرک و حافظه دار به آلیاژی اطلاق می گردد که حاوی تقریبا ۵۰ درصد اتمی نیکل و ۵۰ درصد اتمی تیتانیم باشد. تغییرات کوچک در ترکیب حول این نسبت باعث تغییرات قابل توجهی در ویژگی های کاربردی این آلیاژ می گردد که با توجه به نمودار تعادلی این آلیاژ که در شکل های ۲-۱ و ۲-۲ نشان داده شده است این موضوع کاملا مشخص می باشد [۷].

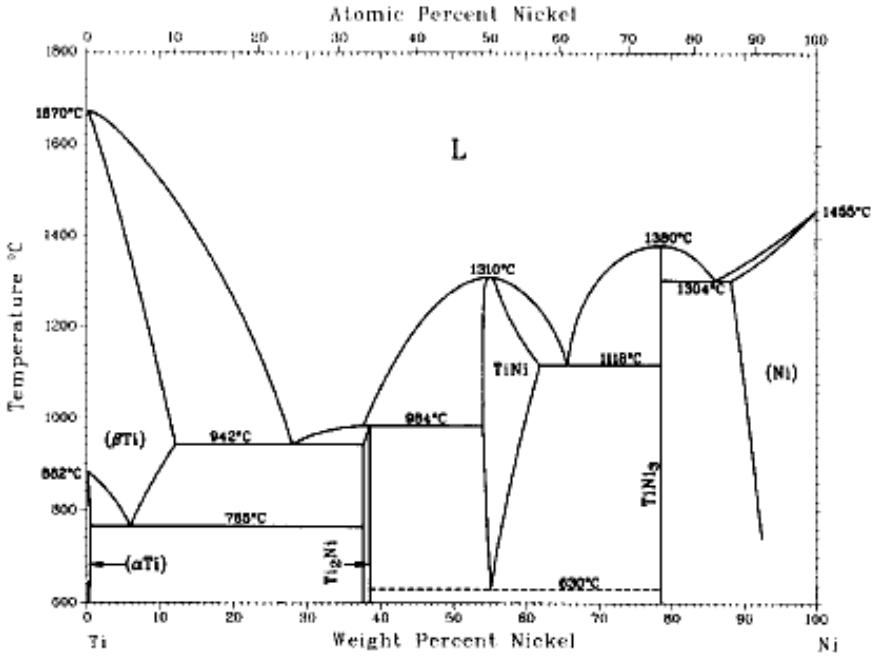
حافظه داری خاصیت بازیافت شکل اولیه ماده پس از ایجاد تغییر شکل می باشد. آلیاژ NiTi به طور ذاتی فقط شکل فاز آستنیتی (دمای بالا) را حفظ می کند، ولی در حالت مارتنزیتی (دمای پایین) به دلیل وجود گونه های مختلف مارتنزیت شکل خاصی ندارد. به این خاصیت حافظه داری یک طرفه اطلاق می گردد. در شکل ۲-۳ مکانیسم اثر حافظه داری به صورت ساده ای ترسیم شده است. بنابراین شکل حافظه یک جهتی حاصل از انجام عملیات ترمو مکانیکی بر روی فازآستنیت به صورت زیر می باشد:

۱. سردکردن نمونه تا درجه حرارت زیر M_f

۲. اعمال تنش σ و حذف آن در حالت مارتنزیتی

۳. گرم کردن نمونه تا درجه حرارتی بالاتر از A_f تحت تنش صفر.

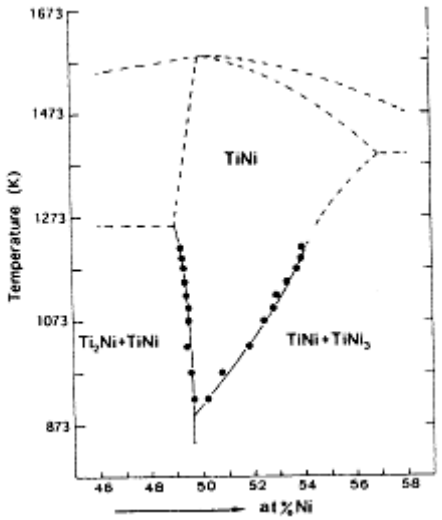
در مرحله اول دگرگونی مارتنزیتی کامل است. در مرحله دوم آلیاژ کاملا مارتنزیتی همراه با تغییرشکل مومسان نسبت به حالت اولیه آستنیتی می باشد. در مرحله پایانی نیز دگرگونی عکس آستنیت به مارتنزیت روی می دهد [۷].



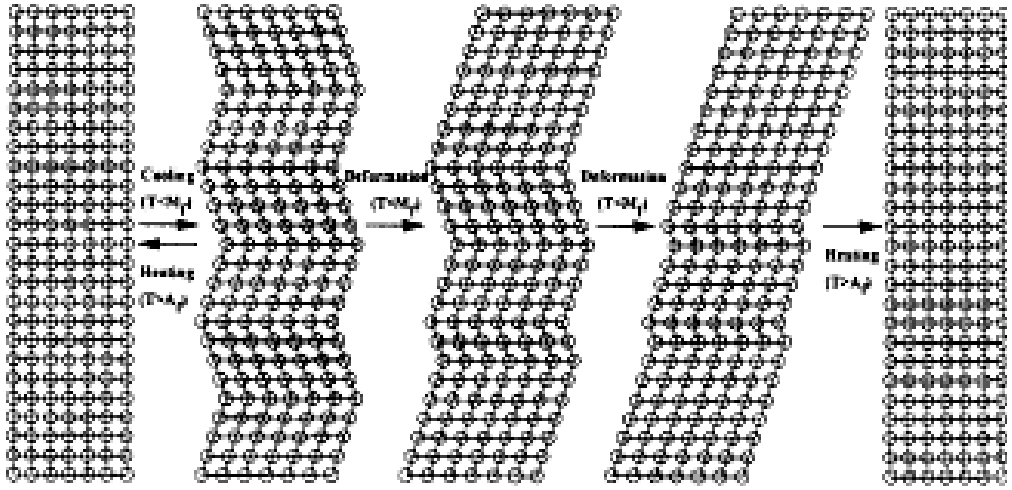
Phase	Composition, wt % Ni	Pearson symbol	Space group
(βTi)	0 to 12	*cI*2	$Im\bar{3}m$
(αTi)	0 to 0.3	*hP*2	$P6_3/mmc$
ω(a)	~10	*hP*3	$P6/mmm$ or $P\bar{3}m1$
Ti_2Ni	38.0	*cF*96	$Fd\bar{3}m$
TiNi′(a)	~54 to 58	*mP*4	$P2_1/m$
TiNi	54.6 to 62	*cP*2	$Pm\bar{3}m$
γ″$TiNi_3$(a)	~77	*hR*21	$R\bar{3}m$
$TiNi_3$	79	*hP*16	$P6_3/mmc$
γ′$TiNi_3$(a)	~86 to 90	*cP*4	$Pm\bar{3}m$
(Ni)	88.4 to 100	*cF*4	$Fm\bar{3}m$

(a) Metastable

شکل۲-۱. نمودار تعادلی آلیاژ NiTi [۷].



شکل۲-۲. بخشی از نمودار تعادلی NiTi [۱۰].



شکل۲-۳. طرحواره مکانیسم اثر حافظه داری [۱۱].

چنان چه آلیاژ در فاز آستنیتی یک شکل و در فاز مارتنزیتی شکل دیگری داشته باشد، در اثر تغییرات دمایی قادر است دو شکل مذکور را به خاطر بسپارد که به آن حافظه داری دو طرفه گفته می شود. خاصیت حافظه داری دو طرفه اولین بار توسط بولر و همکارانش توصیف شد. در ابتدا تصور می شد که حافظه داری دو طرفه پس از تغییر شکل مومسان غیر همگن ایجاد می شود که به دلیل