تاثیر چرخه های حرارتی – مکانیکی بر خواص حافظه داری دو طرفه در آلیاژ نایتینول

سید خطیب الاسلام صدر نژاد
استاد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، sadrnezh@sharif.edu
علی طوفانی
دانشجوی کارشناسی، دانشکده معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده
تغییر متناوب دما بدون اعمال تنشهای خارجی سبب تغییر شکل آلیاژ حافظه دار دو طرفه می شود. در هر دوره تناوب، تغییر شکل آلیاژ با گرم کردن تا دمایی بالاتر از دمای تشکیل فاز آستنیت (A_s) و سرد کردن تا دمایی پایینتر از دمای شروع تشکیل فاز مارتنزیت (M_s) آغاز می شود. آلیاژ های حافظه دار دو طرفه در کلید های قطع و وصلی استفاده شده در صنایع الکتریکی و الکترونیکی، محرکهای حساس دمایی و کاشتنی های طبی بازیافتی کاربرد دارند. در این تحقیق تاثیر چرخه های ترمومکانیکی بر ایجاد خاصیت حافظه داری دو طرفه در یک آلیاژ حافظه دار یک طرفه ساخته شده از جنس نیکل – تیتانیوم بررسی شده است.
کلید واژه ها: آلیاژ حافظه دار، دو طرفه، چرخه های ترمومکانیکی، نایتینول

مقدمه

آلیاژهای حافظه دار (SMA) در دمای نسبتاً پایین مثلا" دمای اطاق معمولا" نرم هستند و براحتی تغییر شکل می دهند. ولی پس از قرار گیری در معرض حرارت به شکل یا اندازه قبل از تغییر فرم سرد خود بر می گردند و پس از آن سفت می شوند. نوعی از این مواد که فقط در اثر گرم کردن به شکل اول بر می گردند را حافظه دار یک طرفه می نامند. آلیاژ حافظه دار دو طرفه هم وجود دارد. این نوع آلیاژها هم در اثر گرم کردن و هم در اثر سرد شدن، دچار تغییر شکل می شوند. تغییر شکل حاصل از گرم کردن با تغییر شکل در اثر سرد شدن فرق داشته و یادآور شکلهایی است که آلیاژ در اثر تکرار در گذشته به آنها خو کرده است.

در مقایسه با اثر حاظه داری یک طرفه که ذاتی است، اثر حافظه داری دو طرفه یک خاصیت اکتسابی است. ایجاد حافظه داری دو طرفه، با تولید عیوب دائمی در نتیجه اعمال تنشهای داخلی همراه است [۱]. فرآیند تربیت کردن باعث تشکیل واریانتهای مارتنزیتی مرجح و برگشتی می شود. تولید پی در پی عیوب سرانجام تنش داخلی دائمی تولید می کند که منجر به تشکیل واریانتهای مرجح حتی در غیاب نیروی خارجی می شوند [۱].

اثر دیگر تربیت کردن، توسعه ماکروسکوپی کرنش پلاستیک قابل مشاهده است. شدت این کرنش با شدت کرنش دگرگونی قابل بازیابی قابل مقایسه است. تربیت کردن همچنین منجر به اثرات ثانویه ای مثل تغییر در دماهای دگرگونی، تغییر در اندازه حلقه هیسترزیس و کاهش کرنش دگرگونی ماکروسکوپی می شود.

تحقیقات فراوانی درباره تاثیر روش ساخت [۲-۳] ، اعمال نیرو [۴] ، چرخه های حرارتی [۵-۸] و عملیات تربیت کردن [۹] بر خواص آلیاژ های حافظه دار در گذشته انجام شده و مقالات متعددی در باره خصوصیات و کاربردهای این آلیاژها به چاپ رسیده است [۱۰-۱۳]. در این مقاله به بررسی تاثیر عملیات تربیت کردن بر ایجاد حافظه داری دو طرفه و تغییرات حاصل در خواص آلیاژ نایتینول حاوی ۵۰ درصد اتمی تیتانیوم پرداخته شده است.

روش تحقیق

این تحقیق بر سیم حافظه دار حاوی 50 atom% Ti – 50 atom% Ni دارای قطر ۰/۲۵ میلی متر و طول موثر ۶۰ میلی متر انجام شده است. یک چرخه تربیت کردن از مراحل زیر تشکیل شده است:

- برای اطمینان از انجام تغییر فرم در حالت مارتنزیت، سیم را داخل وانی محتوی آب صفر درجه سانتیگراد قرار می دهیم.
- یک طرف سیم را به فک ثابت بسته و طرف دیگر آن را به فک متحرک می بندیم و سیم را می کشیم تا طول آن از ۶۰ میلی متر به ۶۳ میلی متر برسد (۵٪ کرنش).
- سیم را از فک متحرک آزاد کرده و داخل آب جوش با دمای حدود ۱۰۰ درجه سانتگراد قرار می دهیم. چون این دما از دمای A_f آلیاژ بالاتر است، سیم دچار دگرگونی شده و بازیابی مارتنزیت منقبض شده اتفاق می افتد و طول آلیاژ به مقدار اولیه تنزل می کند.
- سیم را دوباره در آب صفر درجه سانتیگراد قرار می دهیم تا طول آن برابر طول اولیه شود.

مراحل و ترتیب انجام عملیات در شکل ۱ آورده شده است.

اثر چرخه های ترمومکانیکی بر نسبت بازیابی حافظه داری دو طرفه η قابل تعیین است. η به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta = \frac{L_M - L_A}{L_M} \times 100$$

L_M طول سیم در حالت مارتنزیت و L_A طول سیم در حالت آستنیت است. بعد از القای ویژگی حافظه داری دو طرفه، آلیاژ تحت چرخه های حرارتی قرار می گیرد تا خاصیت دو طرفگی در آن تثبیت شود. نحوه انجام چرخه حرارتی تثبیت سازی در شکل ۲ آورده شده است.

نتایج

تاثیر تعداد چرخه های حرارتی بر نسبت بازیابی

جدول ۱تاثیر تعداد چرخه های ترمو مکانیکی انجام شده برای تربیت کردن آلیاژ را بر نسبت بازیابی دوطرفه بازگو می کند. همانطور که مشاهده می شود با افزایش تعداد چرخه ها تربیت کردن نسبت بازیابی افزایش یافته و وقتی تعداد چرخه های ترمومکانیکی به ۳۰۰ سیکل می رسد، نسبت اثر حافظه داری دو طرفه ۰/۹۲٪ می شود. بیشتر از ۳۰۰ سیکل، نسبت بازیابی تغییر چندانی نشان نمی دهد. تغییر درصد بازیابی در اثر افزایش تعداد چرخه های ترمومکانیکی در شکل ۳ به نمایش گذاشته شده است.

تاثیر چرخه های حرارتی بر اثر حافظه داری دو طرفه

جدول ۲ تاثیر تعداد چرخه های حرارتی انجام شده بر آلیاژ تربیت شده را بر نسبت بازیابی دوطرفه نشان می دهد. ملاحظه می شود که با اعمال چرخه های حرارتی، نسبت بازیابی کاهش می یابد. این کاهش در مراحل اولیه شدید است. اما با افزایش تعداد چرخه ها، به تدریج آهسته تر شده و وقتی تعداد چرخه ها به ۱۰۰۰ رسید، نسبت بازیابی اثر حافظه داری دو طرفه در ۳۳٪ ثابت باقی می ماند. شکل ۴ تغییرات اثر حافظه داری دو طرفه یک نمونه تربیت شده را در چرخه های مختلف نشان می دهد.

بحث

شکل ۵ نمونه ای از یک چرخه ترتیب کردن را نشان می دهد. آلیاژ در اثر سرد شدن افزایش طول داده و کرنش ε_m را بدست می هد. در گرم کردن یک قسمت از طول بازیابی می شود که برابر با کرنش پلاستیک ظاهری ε_{pp} است. مابقی کرنش در نمونه ذخیره شده و دیگر بازیابی نمی شود.

در طول چند چرخه، هر بار مقداری کوچک از کرنش ذخیره شده و بر مجموع کرنشهای بازیابی نشده می افزاید. بنابراین کرنش برگشت ناپذیر ε_p با افزایش تعداد چرخه ها بیشتر می شود. تشکیل و ظهور اثر حافظه داری دو طرفه نیازمند یک مقدار معین از کرنش برگشت ناپذیر به منظور تولید ویژگی ریز ساختاری (نابجایی) می باشد. تولید این ویژگی ها برای بدست آوردن واریانتهای مارتنزیتی یکنواخت در نتیجه تغییر شکل سیم با اعمال تنش و در نتیجه تغییر شکل ماکروسکوپی یکنواخت در هر چرخه ضروری است [۱۸].

شکل ۶ نمونه ای از یک چرخه دو طرفه کامل را نشان می دهد که بعد از فرآیند تربیت کردن بدست آمده است. کرنش قابل بازیابی ε_{2w}، کرنش دو طرفه نامیده شده و نسبت بازیابی را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۳ دیده می شود، نسبت بازیابی در چرخه های نخستین خیلی کم است. در چرخه های ابتدایی به خصوص در پنج چرخه اول، نمونه وقتی به حالت مارتنزیت تبدیل می شود بسیار نرم و انعطاف پذیر بوده و به شکلی مثل مو در داخل آب پیچ می خورد. ولی بعداً با افزایش تعداد چرخه ها این حالت از بین رفته سیم در حالت مارتنزیت نیز مثل حالت آستنیت به صورت مستقیم قرار می گیرد.

در دگرگونی فازی مارتنزیتی در یک نمونه تربیت نشده بدون تنش خارجی، تمایل به تشکیل تمام واریانتهای مارتنزیتی از نظر ترمودینامیکی و کریستالوگرافی یکسان است یعنی تغییر انرژی آزاد برای همه آنها برابر است. در اینجا احتمال شکل گیری واریانتها یکسان است و تعداد مساوی از آنها پس از

سـرد شـدن بوجـود مـی آینـد. آیـن واریانـتها وقتـی در چنیـن حالتـی منطـبق مـی شـوند هـیچ تغییـر فـرم ماکروسـکوپی ایجـاد نمـی شـود و بـه همیـن علـت سـیم در حالـت مارتنزیـت بـه راحتی خم شده و پیچ می خورد[۱۶،۱۸] .

در چـرخه هـای ابتدایـی در هـر دانـه همـزمان چندین جهت گیری مختلف مارتنزیتی وجود دارد و این جهـت گـیریهای واریانتـی مهم هستند و سیم اثر حافظه داری دو طرفه کمی نشان می دهد [۱۴]. بنابراین جهت گیریهای واریانتهای مارتنزیتی با نسبت بازیابی رابطه مستقیم دارد [۱۷].

بـا افـزایش تعـداد چـرخه هـا، تـنش اعمالی باعث کاهش تغییر انرژی آزاد در یک گروه از واریانتهای مارتنزیتـی مـی شـود. لـذا همـه واریانـتها از نظـر ترمودینامیکـی مانـند هـم نمی شوند. در نتیجه در حالت مارتنزیت تعدادی از واریانتهای مشخص که انرژی آزاد کمتری دارند، تشکیل می شود و جهت گیریهای مخـتلف واریانـتهای مارتنزیتـی کـم می شود [۱۶،۱۸] . نابجاییهای جهت دار توسط جهت گیری دوباره واریانتهای مارتنزیتی تولید می شوند که در توسعه اثر حافظه داری دو طرفه موثرند [۱۴-۱۷]. در نتیجه با افزایش تعداد چرخه ها، سیم در حالت مارتنزیت به شکل مستقیم در می آید.

بـا انجـام چرخه های ترمومکانیکی، اثر حافظه داری دو طرفه پیشرفت می کند و همانطور یکه در شکل ۳ دیده می شود این اثر پس از ۳۰۰ سیکل در نسبت بازیابی ۰/۹۲ ٪ ثابت باقی مانده و به یک حالت اشباع می رسد.

فرآیـند تربیـت کـردن ترمومکانیکـی شـامل دگرگونـی فازی بین آستنیت و مارتنزیت است [۱۵]. بین فرآیندهای تربیت کردن ساختار نابجاییهای ان ایزتروپ در زمینه آستنیتی توسعه می یابد. این نوع ساختار نابجایـی، یـک مـیدان تـنش ان ایزوترپ در زمینه ایجاد می کند که باعث تشکیل مارتنزیت و نتیجه تغییر شـکل ماکروسکوپی در طول چرخه های دگرگونی گرمایی می شود. نابجاییهای تولید شده توسط جهت گیریهای دوباره مارتنزیتی در توسعه اثر حافظه داری دوطرفه در زمینه موثر است[۱۵-۱۷]. تحت شرایط تغییـر فـرم نیافته، بشقابهای مارتنزیتی به خوبی "خود تطبیق" یافته اند. مرز بین دو بشقاب مارتنزیتی معمولاً مستقیم است و مرز دوقلویی بین دو بشقاب مارتنزیتی همسایه، دوقلوهای وابسته به هم نیستند[۱۵].

با افزایش تعداد چرخه ها و کرنش ایجاد شده، جهت گیریهای دوباره مارتنزیتی که تحت تنش کششی شـروع شـده بـود، از طریق حرکت مرزهای بشقابی پیوسته پیشرفت می کنند. در نتیجه بعضی از بشقابهای مارتنزیتی و نابجاییها در نواحی دوباره جهت گیری کرده تشکیل می شود [۱۵].

بـا تکـرار بیشـتر چـرخه هـا، بشـقابهای مارتنزیتی detwin می شوند. به علاوه عیوب شبکه ای که درون

بشقابها و نواحی مرزی القاء شده اند، هیچ ارتباطی با دوقلویی باقی مانده ندارند [۱۵]. نابجاییها در طول صفحه دوقلویی ذاتی جمع شده اند و با افزایش بیشتر چرخه ها، اکثر بشقابهای مارتنزیتی به طور کامل detwin شده و تعداد زیادی از نابجاییهای شبکه ای برای انطباق تغییر شکل تولید می شوند [۱۵]. همانطوریکه با افزایش چرخه ها کرنش بیشتری وارد می شود، مرزهای مارتنزیتی به وجود آمده از یک محل تمرکز تنش شکل می گیرد و با حرکت مرز بین مارتنزیت و زمینه رشد کششی مارتنزیت دوباره جهت گیری شده تحت تنش اتفاق خواهد افتاد و نابجاییها در داخل زمینه القاء خواهند شد[۱۵].

نتیجه این چرخه های تربیت کردن ترمومکانیکی، تشکیل نابجاییهای پیچیده ای است که در واریانتهای تربیت شده القایی تکراری دارای پایین ترین انرژی هستند [۱۴-۱۶]. با تکمیل جهت گیریهای دوباره بشقابهای مارتنزیتی، چگالی نابجاییها تا حد اشباع افزایش می یابد و واریانتهای تربیت شده مطلوب ترمودینامیکی نیز به مقادیر اشباع افزایش می یابد [۱۴-۱۶] . در نتیجه پایداری و دوام و تکرارپذیری اثر حافظه داری به مقدار اشباع در طول چرخه های تربیت کردن ترمودینامیکی می رسد [۱۴،۱۶].

با دقت در داده های جدول ۱ مشاهده می شود که طول سیم در چرخه های مختلف تربیت کردن هرگز به مقدار اولیه برنمی گردد. بلکه با هر چرخه تربیت کردن طول سیم کاهش می یابد. این پدیده به این نکته اشاره دارد که کرنش برگشت ناپذیر(ε_p) در سیم القاء شده و مقدار آن در طول چرخه های تربیت کردن با افزایش دانسیته نابجایها و واریانتهای با جهت گیری مطلوب افزایش می یابد [۱۴].این موضوع از شکل ۵ آشکار می شود.

مهمترین ویژگی اثر حافظه داری دو طرفه، شدت آن است. پس لازم است که اثر حافظه داری دو طرفه تکرار پذیر باشد. بدین معنی که شدت حافظه داری دو طرفه باید در چرخه های حرارتی پی در پی ثابت باقی بماند [۱۷]. اثر حافظه داری دو طرفه نسبت به تغییر ریز ساختار، حساس است [۱۷]. این اثر در طول چرخه های حرارتی به علت تغییرات ریز ساختاری دچار آسیب جدی می شود و در نتیجه باعث کاهش در نسبت بازاریابی می گردد. این کاهش اثر حافظه داری دو طرفه به علت القاء نابجاییها در طول حرکت تکراری مرز دانه مارتنزیت – فاز اولیه است [۱۴،۱۶] .

چرخه های حرارتی باعث نوآرایی و نابودی نابجاییهای موجود و همچنین القاء نابجاییهای اضافی می شوند. هر دو فرآیند به طور قابل ملاحظه ای الگوی نابجاییها را که در طول چرخه های تربیت کردن ترمومکانیکی ایجاد شده است تغییر داده و باعث افزایش تعداد واریانتهای مارتنزیتی با جهت گیریهای نامطلوب می شود [۱۴،۱۶].

منحنی شکل ۴ را می توان به دو قسمت تقسیم کرد. در قسمت اول شدت کاهش نسبت بازیابی زیاد است که آن را می توان به نابودی نابجاییها و نوآرایی آنها مربوط دانست. در قسمت دوم که شدت کاهش نسبت بازیابی کم است، استقرار مجدد ناقص از طریق تغییر شکل بلوری در دمای بالا به علت نابجاییهای القاء حرارتی می تواند مربوط شود [۱۷].

نتیجه گیری

- از طریق اجرای عملیات ترمومکانیکی، تربیت کردن آلیاژ نایتینول برای کسب خاصیت حافظه داری دو طرفه امکان پذید است.
- وقتی سیم در حالت مارتنزیت تربیت ترمومکانیکی می شود، نسبت بازیابی به مقدار اشباع شده میل کرده و پس از ۳۵۰ سیکل به حداکثر ۹۲ ٪ می رسد.
- انجام چرخه های حرارتی بر سیم دارای اثر حافظه داری دو طرفه، نسبت بازیابی را کاهش می دهد. این نسبت با افزایش تعداد چرخه ها کاهش یافته و سرانجام در مقدار حدی ۳۳٪ پس از ۱۰۰۰ چرخه ثبیت می شود.

مراجع

1. D.E. Hodgson, “Using Shape Memory Alloys, Shape Memory Applications”, 1988.

۲. س. ح. میرابوالقاسمی، ع. سلاحی، ا. حائری و س. خ. صدرنژاد، ″تاثیر روش ساخت بر ریز ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ نایتینول″، ″، سیزدهمین سمینار سالانه جامعه ریخته گران ایران، تهران، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، ۲۸ – ۳۰ خرداد ۱۳۸۰، صفحه ۲۳۷.

۳. – ص. بدخشان، س. ح. میرابوالقاسمی و س. خ. صدرنژاد، ″بررسی تاثیر متقابل میان ریز ساختار و فرایند نورد گرم و سرد آلیاژهای حافظه دار Ni-Ti تولید شده به روش ذوب و ریخته گری تحت خلاء″، اولین کنفرانس شکل دهی فلزات و مواد، MATFORM’81 ، تهران، ۱۳۸۱دانشگاه صنعتی شریف، صفحه ۲۹۷.

٤. – س. خ. صدرنژاد، س. قریشی، ا. ح. توابی و ن. بخشی زاده، ″رفتار تحت بار و فازشناسی سیمهای ارتدنسی از جنس آلیاژ سوپر الاستیک نیکل – تیتانیوم″، یازدهمین کنگره مهندسی پزشکی ایران (ICBME 2004) ، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۲، صفحه ۱۵۱.

۵. – س. خ. صدرنژاد، س. ت. نعیمی، ع. نوری و ع. نوری،″اندازه گیری خاصیت حافظه داری در

آلیاژ ریختگی نایتینول و تاثیر چرخه های حرارتی بر بازگشت کرنش"، مجله مهندسی متالورژی، شماره ۱۵، ۱۳۸۲، صفحه ۲۹.

٦. – س. خ. صدرنژاد و س. ترابی، "تاثیر چرخه های گرم و سرد کردن بر دماهای استحاله در آلیاژ حافظه دار TiNi"، ششمین کنفرانس ساخت و تولید ایران، (۱ تا ٤ دی ۱۳۸۲)، هتل المپیک، تهران، صفحه ۱.

۷. – س. خ. صدرنژاد، ح. خرسند و ع. نانگیر، "تاثیر چرخه های حرارتی بر دمای تبدیل و برگشت پذیری شکل در آلیاژ حافظه دار Ti۰/۰۵Al۲/۹۲Zn۲۷/۰۸Cu۶۹/۸۵"، نشریه شریف، شماره ۱۹، (۱۳۸۰)، صفحه ٤٤.

8. K. Sadrnezhaad, F. Mashhadi and R. Sharghi, "Heat Treatment of Ni-Ti Alloy for Improvement of Shape Memory Effect", Materials and Manufacturing Processes, Vol. 12, No. 1, 1997, p 107.

۹. ر. شرقی و خ. صدرنژاد، "ساخت و تربیت یک آلیاژ حافظه دار"، هفتمین کنفرانس مهندسی پزشکی ایران، (۱۳۷۳)، صفحه ۳٦۹.

10. K. Sadrnezhaad, F. Mashhadi and R. Sharghi, "Heat Treatment of Ni-Ti Alloy for Improvement of Shape Memory Effect", Materials and Manufacturing Processes, Vol. 12, No. 1, 1997, p 107.

۱۱. م. ح. نوربالا، ح. فلاح حسینی، ر. افضل زاده، خ. صدرنژاد، ج. بختیاری، ع. عسگری، ح. ر. نادریان و م. کاولی، "طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی اسفنکتر مصنوعی الکترو مکانیکی جهت پیشگیری از بی اختیاری ادرار با استفاده از آلیاژ حافظه دار"، مجله پژوهشی حکیم، جلد ٤، شماره ۳، (۱۳۸۰)، صفحه ۱۵۵.

۱۲. س. خ. صدرنژاد و م. ب. اذانی، "طراحی و ساخت نمایشگر لمسی بریل"، نهمین کنفرانس مهندسی پزشکی ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۰-۱۲ اسفند ۱۳۷۸)، صفحه ۳۷.

۱۳. س. خ. صدرنژاد، ر. شرقی، ع. نوری و ب. دارابی مقدم، "ساخت و کاربرد بستهای حافظه دار نایتینول برای اتصال استخوان مچ و قوزک پا"، نهمین کنفرانس مهندسی پزشکی ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۰-۱۲ اسفند ۱۳۷۸)، صفحه ۱۲.

14. Z.G. Wang, et al., "Design of TiNi Alloy Two – Way Shape Memory Coil Extension Spring", J. Mater. Sci., A 345, 2003, p 249.

15. Z.G. Wang et al., "Effect of Thermomechanical Training Temperature on the Two – Way Shape Memory Alloys Spring", Materials Letters, 57, 2003, p 1501.

16. Z.G. Wang, et al., "Study of Two – Way Shape Memory Extension Spring of Narrow Hysteresis TiNiCu Shape Memory Alloys", Materials Letters, 56, 2002, p 284.

17. A.G. Mauer, et al., “Investigation of Degradation Effects in Shape Memory Alloys”, Institute of Physical Metallurgy and Materials Testing, University of Leoben, 8700 Leoben, Austria.
18. H. Otsula, et al., in Proceedings , International Conference on Martensitic Trans formations (Sydney, Australia),1989.

جدول ۱ - نتایج مربوط به چرخه های ترمومکانیکی.

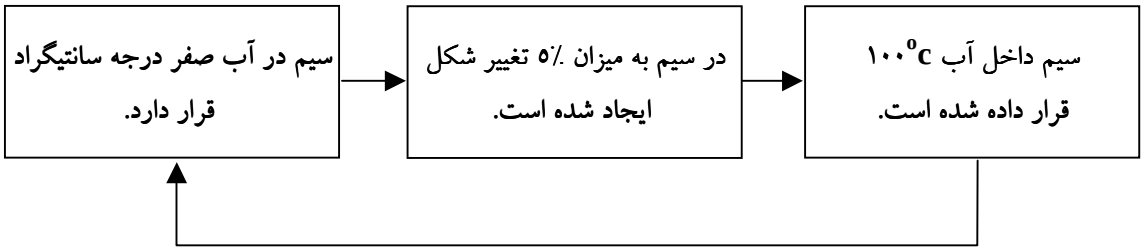
چرخه های تربیت کردن	۰	۲۰۰	۲۲۵	۲۵۰	۲۷۵	۳۰۰	۳۲۵	۳۵۰
L_A(mm)	۶۰	۵۹	۵۹	۵۹	۵۸/۹۵	۵۸/۹۵	۵۹	۵۹
L_M(mm)	۶۰	۵۹/۵	۵۹/۵	۵۹/۵۵	۵۹/۵۵	۵۹/۵	۵۹	۵۹/۵۵
نسبت ارزیابی	۰	۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۹۲	۱/۰۰۷	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲

جدول ۲ – نتایج مربوط به چرخه های حرارتی.

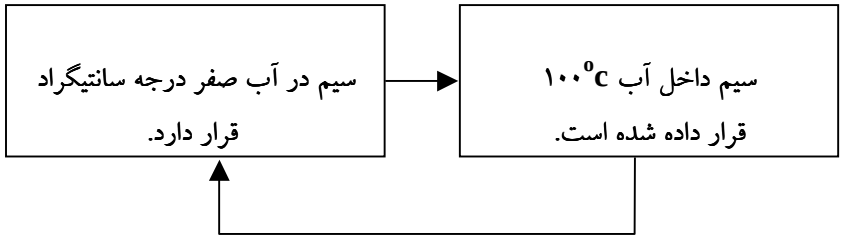
چرخه های حرارتی	۰	۲۰	۶۰	۱۰۰	۱۵۰
L_A(mm)	۵۹	۵۹	۵۹	۵۹/۱	۵۹/۱
L_M(mm)	۵۹/۵۵	۵۹/۵	۵۹/۴۵	۵۹/۴۵	۵۹/۴۵
نسبت ارزیابی	۰/۹۲	۰/۸۴	۰/۷۵	۰/۵۸	۰/۵۸

چرخه های حرارتی	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۶۵۰	۸۰۰
L_A(mm)	۵۹/۱	۵۹/۱۵	۵۹/۱۵	۵۹/۱۵	۵۹/۱۵	۵۹/۱۵	۵۹/۱۵
L_M(mm)	۵۹/۴	۵۹/۴	۵۹/۴	۵۹/۴	۵۹/۴	۵۹/۴	۵۹/۴۵
نسبت ارزیابی	۰/۵۰۵	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۵۰۴	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲

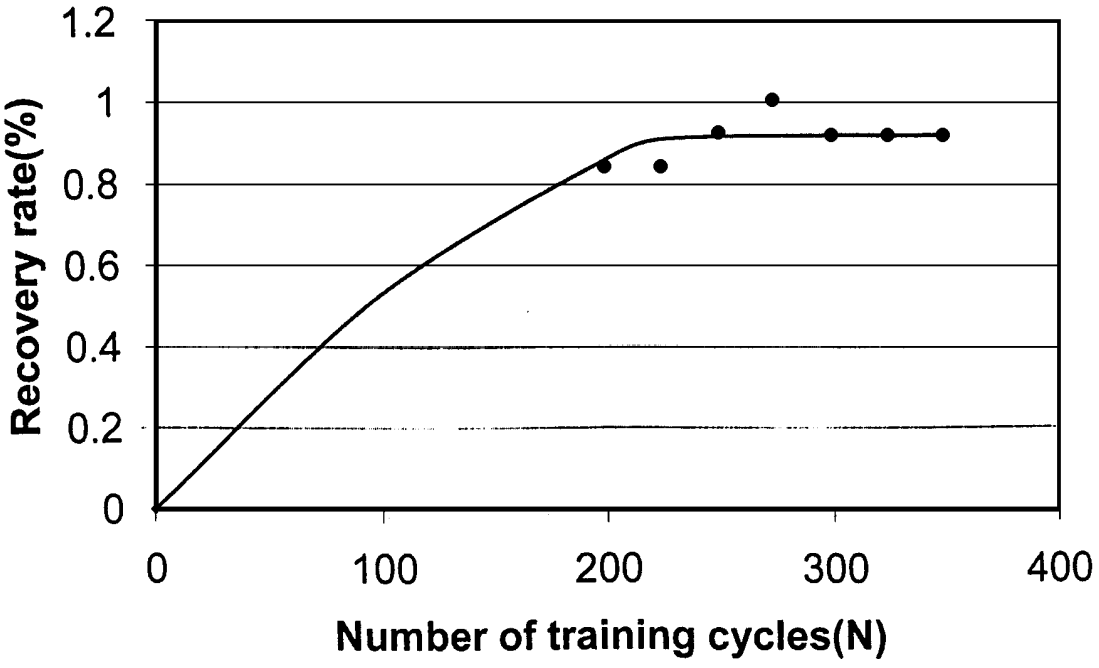
چرخه های حرارتی	۱۰۰۰	۱۱۰۰	۱۲۵۰	۱۴۰۰	۱۶۰۰
L_A(mm)	۵۹/۱۵	۵۹/۲	۵۹/۲	۵۹/۲	۵۹/۲
L_M(mm)	۵۹/۴	۵۹/۴	۵۹/۴	۵۹/۴	۵۹/۴
نسبت ارزیابی	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳



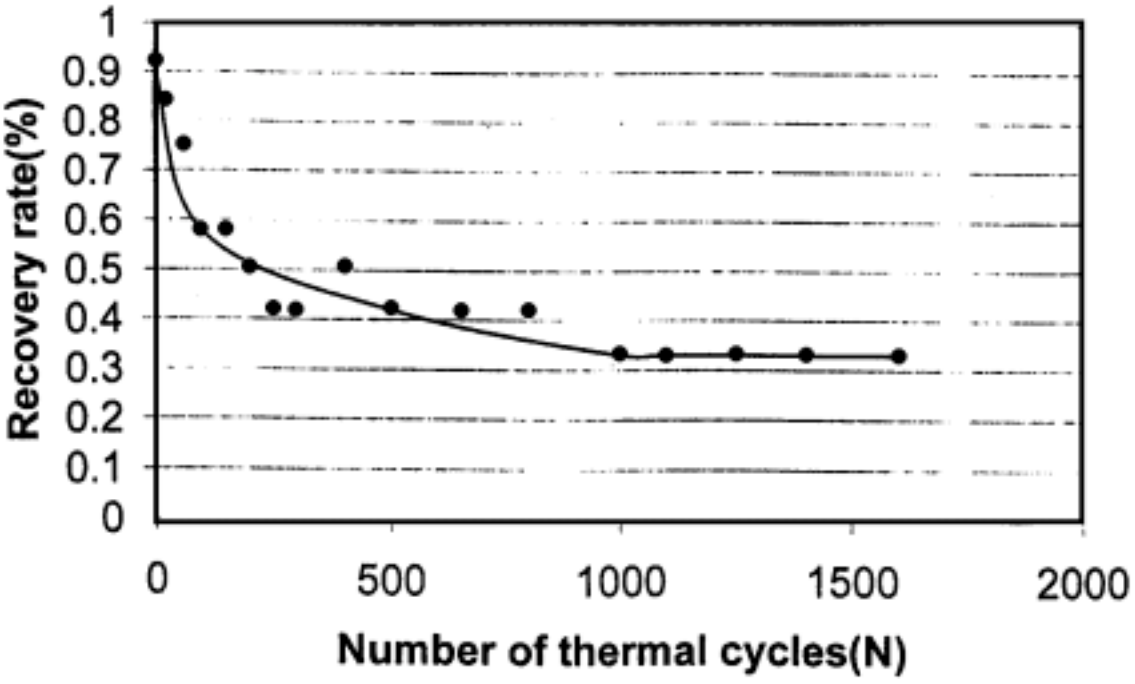
شکل ۱ – مراحل و ترتیب انجام عملیات ترمومکانیکی برای تربیت کردن آلیاژ به منظور ایجاد حافظه داری دوطرفه.



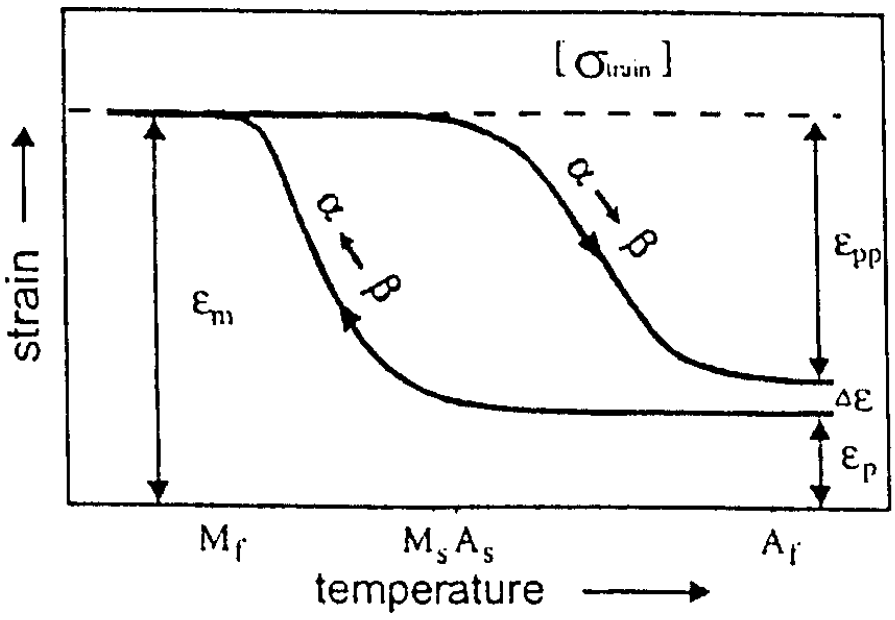
شکل ۲ – تثبیت خاصیت حافظه داری دوطرفه از طریق انجام عملیات حرارتی پس از ایجاد حافظه داری دوطرفه.



شکل ۳ - نسبت بازیابی سیم آلیاژ حافظه دار نیکل – تیتانیوم که در حالت مارتنزیت تحت چرخه های تربیت ترمومکانیکی قرار گرفته است.



شکل ۴ - نسبت بازیابی سیم آلیاژ حافظه دار نیکل – تیتانیوم که در حالت مارتنزیت تحت چرخه های حرارتی قرار گرفته است.



شکل ۵ – یک چرخه حرارتی تربیت کردن نمونه.

شکل ۶ – یک چرخه حرارتی بر نمونه دوطرفه کامل.