

اثر فرآیند نورد سرد بر کرنش بازیابی و نسبت بازیابی آلیاژ حافظه‌دار $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$

مجید بلباسی^{۱*}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۱، ش.ص: ۳۸-۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۰۴)

چکیده

در بین آلیاژهای حافظه‌دار دمای بالای پایه NiTi، آلیاژهای NiTiHf به دلیل دمای استحاله بالا، پایداری حرارتی خوب و قیمت مناسب، نسبت به دیگر آلیاژهای حافظه‌دار بسیار مورد توجه می‌باشند. کرنش بازیابی و نسبت بازیابی این آلیاژها در مقایسه با آلیاژهای دوتایی NiTi پایین می‌باشد. یکی از راه‌های افزایش میزان کرنش بازیابی در این آلیاژها انجام عملیات ترمومکانیکی می‌باشد. در این تحقیق آلیاژ حافظه‌دار دمای بالا $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$ در کوره قوس تحت خلا آلیاژسازی و ریخته‌گری شد و پس از همگن سازی، نمونه‌ها تحت عملیات نورد سرد و آنیل قرار گرفتند. با استفاده از تست خمش کرنش‌های اعمالی ۲/۶ تا ۵/۴ به روی نمونه‌ها اعمال شد و سپس میزان کرنش بازیابی و نسبت بازیابی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش کرنش اعمالی مقدار کرنش بازیابی افزایش یافت. در تمامی نمونه‌های نورد سرد شده تا کرنش اعمالی ۳ میزان بازیابی بطور کامل ۱۰۰٪ اتفاق افتاد. در کرنش‌های اعمالی بیش از این مقدار به دلیل وقوع تغییرشکل ناشی از لغزش، میزان بازیابی کرنش به کم‌تر از ۱۰۰٪ رسیده است. در نمونه‌های نورد سرد شده به دلیل افزایش سختی و در نتیجه استحکام، مقدار کرنش بازیابی و نسبت بازیابی نسبت به نمونه ریخته‌گی افزایش یافت. حداکثر کرنش بازیابی شده در نمونه ریخته‌گی، مقدار ۵ با نسبت بازیابی ۸۷٪ بوده و با اعمال نورد به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد، کرنش بازیابی به ترتیب به ۵/۲۸ و ۵/۲۵ و نسبت بازیابی به ۹۲٪ و ۹۳/۶٪ افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: آلیاژهای حافظه‌دار دمای بالا، آلیاژهای NiTiHf، نورد سرد، کرنش بازیابی، نسبت بازیابی.

^۱ - استادیار، گروه مهندسی نفت، معدن و مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

*- نویسنده مسؤل مقاله: Dr.belbasi@gmail.com

پیشگفتار

امروزه با پیشرفت تکنولوژی و ایجاد صنایع پیشرفته، استفاده از مواد با قابلیت‌های جدید بسیار مورد توجه می‌باشد. در این میان مواد هوشمند به عنوان دسته‌ای از مواد که قادرند به محیط اطراف خود پاسخ دهند و با آن سازگار شوند بسیار مورد توجه می‌باشد. از بین مواد هوشمند آلیاژهای حافظه‌دار مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و صنایع قرار گرفته است. آلیاژهای حافظه‌دار دسته‌ای از آلیاژها با قابلیت منحصر به فرد بازیابی مقادیر قابل توجهی از تغییر فرم خود هستند. توسعه آلیاژهای حافظه دار در سال‌های اخیر، از روند رو به رشدی برخوردار بوده است. در میان آلیاژهای حافظه دار غیر آهنی، آلیاژهای پایه NiTi دارای خواص مهندسی مطلوبی می‌باشند که موجب گسترش کاربرد آن شده است. ترکیب بین فلزی NiTi دارای خواص ویژه‌ای همچون خواص حافظه‌داری (یک‌طرفه و دوطرفه)، سوپر الاستیسیته، مقاومت به خوردگی و استحکام مکانیکی بالا به همراه چقرمگی مناسب می‌باشد و به همین دلیل به عنوان مهم‌ترین گروه از آلیاژهای حافظه‌دار در صنایع هوافضا، خودرو، روباتیک و پزشکی مورد استفاده می‌باشد [۱ و ۲]. اکثر آلیاژهای NiTi دمای استحاله کم‌تر از $100^{\circ}C$ دارند که باعث محدودیت استفاده از آن‌ها در بسیاری از کاربردهای مهندسی در دمای بالا می‌گردد. اکثر عناصر آلیاژی مانند Mn, V, Fe, Cr, Co به عنوان عنصر سوم دمای استحالهٔ مارتنزیتی NiTi را کاهش می‌دهند؛ ولی عناصری مانند Pt, Zr, Au و Hf باعث افزایش دماهای استحالهٔ مارتنزیتی می‌گردند. آلیاژهای سه تایی NiTi با حضور یکی از عناصر Pt, Au, Zr و Hf دماهای استحاله بیشتر از $100^{\circ}C$ دارند که به عنوان آلیاژهای حافظه دار دمای بالا شناخته می‌شوند. در این میان آلیاژهای دمای بالا NiTiHf برای بسیاری از کاربردهای صنعتی در دمای بالا بدلیل دمای استحاله بالا و پایداری حرارتی و قیمت پایین‌تر نسبت به دیگر آلیاژهای سه تایی (NiTiPt, NiTiZr, و NiTiAu) مورد توجه می‌باشند. البته خواص حافظه‌داری و شکل پذیری آن‌ها از آلیاژهای دوتایی NiTi کم‌تر می‌باشد [۳-۶]. تغییر شکل مارتنزیت در آلیاژهای حافظه‌دار با دو روش حرکت مرزهای دوقلویی و لغزش

نابجایی‌ها صورت می‌گیرد. تنها مقدار تغییر شکل مارتنزیتی که بوسیله حرکت مرزهای دوقلویی صورت گرفته می‌تواند پس از حرار دهی نمونه به فاز آستنیت بطور کامل بازیابی شود. وقتی که مقدار تغییر شکل از این سطح تجاوز می‌کند، نابجایی‌ها شروع به لغزش می‌کنند و تغییر شکل صورت گرفته بوسیله لغزش نابجایی‌ها با حرارت‌دهی و تبدیل به آستنیت قابل برگشت نخواهد بود. علت پایین بودن خواص حافظه‌داری در آلیاژهای NiTiHf تنش بحرانی پایین برای لغزش نابجایی‌ها در این آلیاژها ذکر شده است [۷]. راه حل این مشکل افزایش استحکام زمینه آلیاژ جهت جلوگیری از وقوع تغییر شکل پلاستیکی ناشی از لغزش است. مهم‌ترین روش‌های پیشنهاد شده جهت برطرف کردن این مشکل اضافه کردن عنصر آلیاژی چهارم، عملیات حرارتی رسوب سخت و عملیات ترمومکانیکی می‌باشد [۸ و ۹]. بررسی‌های صورت گرفته در منابع مختلف در ارتباط با آلیاژهای حافظه‌دار دمای بالای NiTiHf نشان می‌دهد که اکثر تحقیقات بر روی بررسی اثر افزودن عنصر چهارم مانند مس بر دماهای استحاله این آلیاژها [۸]، بهبود خواص حافظه‌داری با انجام عملیات پیرسختی [۱۱-۹]، بررسی خواص مکانیکی، ریزساختاری و فرآیند ساخت آلیاژهای NiTiHf [۱۲ و ۱۳] و بررسی استحاله مارتنزیت این آلیاژها، متمرکز شده است [۱۴] و در رابطه با عملیات نورد این آلیاژها تحقیقات جامع و کاملی انجام نشده است. در این تحقیق اثر عملیات نورد سرد بر خواص حافظه‌داری شامل کرنش بازیابی و نسبت بازیابی آلیاژ $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$ مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای ساخت آلیاژ $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$ از کوره قوس الکتریکی تحت خلا (VAM) جهت ذوب مواد اولیه و آلیاژسازی استفاده گردید. در این روش از یک الکتروود غیر مصرفی تنگستن استفاده می‌شود و ذوب و انجماد در یک قالب مسی آبگرد صورت می‌گیرد. به دلیل عدم وجود بوته، آلودگی‌های ناشی از بوته کاهش یافته و شمش‌های تولید شده به روش VAM دارای خلوص بالایی هستند و مقدار کرنش در آن‌ها بسیار پایین می‌باشد. در این تحقیق نیکل الکترولیتی با خلوص (۹۹/۸ درصد) به صورت

۳۰۰ °C استحالته
 مارتنزیت به آستنیت رخ می‌دهد و نمونه تغییر شکل می‌دهد و به شکل اولیه قبل از تغییر شکل بر می‌گردد. زاویه پس از بازیابی با θ_h نشان داده شده‌است. در این تحقیق از نمونه‌هایی با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر و طول ۱۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. مقدار کرنش اعمال شده به نمونه (ϵ_d) با توجه به قطر ماندلر و ضخامت نمونه از رابطه ۱ و مقدار کرنش بازیابی شده (ϵ_{re}) و نسبت بازیابی کرنش (R) با توجه به کرنش اعمال شده با استفاده از زوایای بدست آمده θ_d و θ_h از روابط ۲ و ۳ به دست آمد [۹].

$$\epsilon_d = t/(t+D) \times 100\% \quad (1)$$

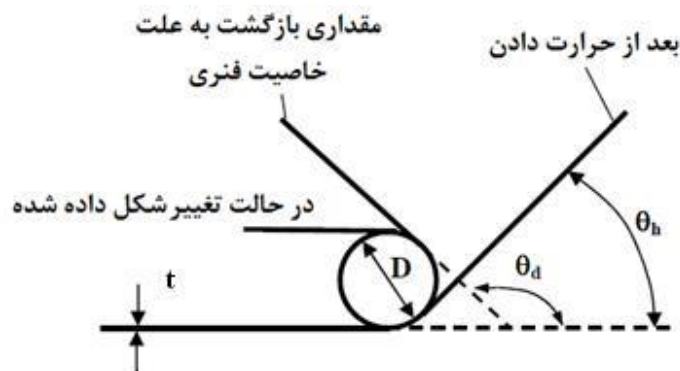
$$\epsilon_{re} = (180^\circ - \theta_h) \times \epsilon_d / 180^\circ \quad (2)$$

$$R = (\theta_d - \theta_h) / \theta_d \times 100\% \quad (3)$$

جهت بررسی ریز ساختاری نمونه‌ها با سنباده‌های با مش ۸۰، ۲۴۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ سنباده زنی و پس از آن با پودر آلومینا پولیش شدند. سپس از محلول شیمیایی اچ با نسبت HF:HNO₃:H₂O=1:4:5 جهت مشاهده ریزساختار و مرز دانه‌ها استفاده گردید. جهت بررسی ریزساختاری از میکروسکوپ نوری تا بزرگنمایی ۱۰۰۰ استفاده شد. به منظور تعیین فازها از دستگاه XRD با ولتاژ ۴۰ kV، شدت جریان ۳۰ mA و طول موج اشعه ۱/۵۴ آنگستروم لامپ مسی با فیلتر نیکلی استفاده شد. محدوده زوایای مورد بررسی ۰ تا ۹۰ درجه بود. سختی سنجی با دستگاه میکروویکرز با نفوذ کننده هرمی شکل با زاویه راس ۱۳۶ انجام شد. از هر نمونه ۵ مرتبه سختی گرفته شد و میانگین آن‌ها گزارش شده است.

ساجمه‌ای، تیتانیم به شکل ورق با خلوص (۹۹/۹ درصد) و هافنیوم به صورت استوانه‌ای با خلوص (۹۹/۷ درصد) مورد استفاده قرار گرفت. خلا محفظه کوره ابتدا توسط دو پمپ خلا روتوری و نفوذی به ۱۰^{-۳} میلی بار رسید. همچنین چند مرتبه گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹۹ به فضای داخل محفظه کوره دمیده شد تا اکسیژن موجود در کوره به حداقل میزان ممکن برسد. به منظور جذب اکسیژن احتمالی در محفظه کوره از عملیات ذوب شمش تیتانیم استفاده شد. برای همگنی بیش‌تر ترکیب شیمیایی شمش، عملیات ذوب ۴ مرتبه انجام شد. عملیات همگن سازی در دمای ۱۰۰۰ °C به مدت ۴۸ ساعت انجام شده و سپس نمونه‌ها در آب کوئنچ شدند. جهت جلوگیری از اکسید شدن نمونه‌ها، عملیات همگن سازی در کوره عملیات حرارتی تحت خلأ انجام شد.

نمونه‌ها پس از عملیات همگن سازی و سنگ زنی تحت عملیات نورد سرد قرار گرفتند. قطر غلتک‌ها ۱۱۰ میلی‌متر، سرعت حرکت غلتک‌ها در حداقل مقدار ممکن یعنی حدود ۲ rpm تنظیم گردید. میزان میانگین کاهش سطح مقطع اعمالی در هر پاس ۵ درصد بود. نمونه‌ها با کاهش ضخامت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد نورد شدند. ضخامت اولیه نمونه‌ها با روش وایرکات و سپس انجام پولیش طوری انتخاب شد که پس از اعمال نورد، ضخامت نهایی نمونه‌های نورد شده حدود ۰/۴ میلی‌متر گردید. نمونه‌های نورد شده سپس در دمای ۴۰۰ °C به مدت ۳۰ دقیقه آنیل شدند. برای بررسی خاصیت حافظه داری نمونه‌های آلیاژ Ni₅₀Ti₄₀Hf₁₀ تست خمش به کار گرفته شد. مکانیزم این روش در شکل ۱ نشان داده شده است. نمونه با ضخامت t در دمای محیط حول ماندرلی با قطر D خم شده سپس به دلیل خاصیت فنری مقداری از این خمش باز می‌گردد. زاویه پس از بازگشت فنری با θ_d نشان داده شده‌است. با افزایش دما تا



شکل ۱- شماتیک تست خمش جهت بررسی خاصیت حافظه داری [۹]

نتایج و بحث

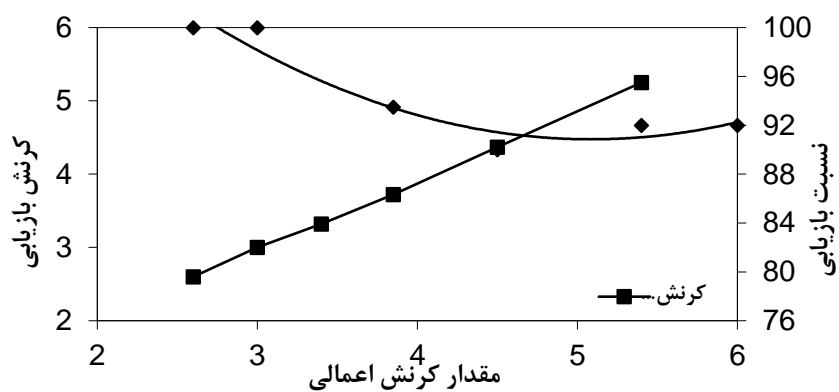
جهت بررسی مقدار کرنش بازیابی شده در اثر اعمال حرارت، نمونه‌های ریختگی و نورد شده به دور ماندول با قطرهای مختلف از ۷ تا ۱۵ میلیمتر خم شدند و کرنش‌های ۲/۶ تا ۵/۴ درصد به روی نمونه‌ها اعمال شد. مقادیر زوایای ناشی از برگشت فبری و پس از بازیابی در اثر اعمال حرارت اندازه گیری شد و نهایتاً میزان کرنش بازیابی و نسبت بازیابی تمامی نمونه‌ها محاسبه گردید که نتایج مربوط به نمونه ریختگی و نمونه‌های نورد سرد شده با درصد‌های مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است. شکل ۲ منحنی تغییرات کرنش بازیابی و نسبت بازیابی بر حسب کرنش اعمالی برای نمونه‌های نورد سرد شده در کاهش سطح مقطع‌های مختلف را نشان می‌دهد. طبق شکل با افزایش میزان کرنش اعمالی، مقدار کرنش بازیابی شده بصورت خطی افزایش یافته که در تمامی نمونه‌های نورد شده مشاهده می‌گردد. همچنین با افزایش میزان کرنش اعمالی، نسبت بازیابی کاهش می‌یابد به گونه‌ای که این روند در تمامی نمونه‌های نورد سرد شده با کاهش ضخامت‌های مختلف مشاهده می‌گردد. کارسرد به تنهایی باعث افزایش سختی و استحکام آلیاژهای NiTi می‌شود و کرنش قابل بازیابی کمتری را موجب می‌گردد، بطوریکه دانستیه بالای نابجایی‌های ایجاد شده از تحرک مرزهای دوقلویی جلوگیری می‌کنند. انجام آنیل پس از نورد سرد، نابجایی‌ها را بصورت سلول‌های فرعی با دیوارهای متشکل از نابجایی و نواحی داخل سلول مناسب جهت حرکت دوقلوهای مارتنزیتی مرتب می‌کند. آرایش مجدد نابجاییها به دلیل انجام آنیل، سختی و استحکام را کمی کاهش داده اما باعث بهبود خواص حافظه‌داری می‌شود [۱۵]. شکل‌های ۳ و ۴ میزان کرنش بازیابی و نسبت بازیابی را بر حسب درصد نورد سرد در کرنش‌های اعمالی مختلف نشان می‌دهد. در نمونه ریختگی فقط کرنش اعمالی ۲/۶ درصد بطور کامل بازیابی می‌شود اما در نمونه‌های نورد سرد شده کرنش‌های اعمالی ۲/۶ و همچنین ۳ درصد بطور ۱۰۰ درصد بازیابی می‌شود و در کرنش‌های اعمالی بالاتر از ۳ درصد بازیابی بطور کامل اتفاق نیفتاده و به کمتر از ۱۰۰ درصد افت پیدا می‌کند. لذا در کرنش‌های اعمالی بیشتر از ۳ درصد تغییر شکل لغزشی اتفاق افتاده که منجر به عدم بازیابی کامل کرنش می‌گردد. در کرنش‌های اعمالی بالاتر از ۳ درصد نیز نمونه‌های نورد

شده نسبت بازیابی بیشتری را در مقایسه با نمونه ریختگی از خود نشان می‌دهند. طبق شکل با افزایش درصد نورد از حالت صفر درصد (وضعیت ریختگی) به ۱۰ درصد میزان کرنش بازیابی و نسبت بازیابی افزایش می‌یابد. در ادامه با افزایش درصد نورد تا ۱۵ و ۲۰ درصد تغییر چشمگیری در میزان کرنش و نسبت بازیابی مشاهده نمی‌شود. با اعمال نورد سرد مقدار سختی و در نتیجه استحکام آلیاژ افزایش یافته و موجب افزایش تنش بحرانی برای لغزش شده و نهایتاً باعث بهبود کرنش بازیابی گردیده‌است. با توجه به تغییرات سختی بر حسب درصد نورد اعمالی مطابق شکل ۵، بهبود کرنش بازیابی را می‌توان به بهبود استحکام زمینه نمونه‌های نورد شده نسبت داد. حداکثر کرنش بازیابی شده در نمونه ریختگی مقدار ۵ با نسبت بازیابی ۸۷٪ می‌باشد. با اعمال نورد سرد به میزان ۱۰ درصد کرنش بازیابی به ۵/۲۵ و نسبت بازیابی به ۹۲٪ می‌رسد. با افزایش درصد نورد سرد به ۲۰ درصد این مقادیر به ۵/۲۸ و ۹۳/۶٪ می‌رسد. شکل ۶ مقدار زاویه بازگشت فبری بر حسب درصد نورد در کرنش‌های اعمالی مختلف را نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش مقدار کرنش اعمالی، زاویه بازگشت فبری کاهش می‌یابد که منجر به کرنش بازیابی کمتر می‌شود. همچنین با افزایش درصد نورد مقدار برگشت فبری نیز افزایش می‌یابد. دلیل این اتفاق می‌تواند این باشد که فاز مارتنزیت بر اثر اعمال نورد سرد کار سخت شده و چون ضریب کارسختی مارتنزیت بالا می‌باشد بر اثر کارسختی خاصیت فبری آن نیز افزایش یافته‌است. شکل ۷ مقدار زاویه بازیابی بر حسب درصد نورد در کرنش‌های اعمالی مختلف را نشان می‌دهد. طبق شکل با افزایش درصد نورد، مقدار زاویه بازیابی افزایش می‌یابد که منجر به افزایش کرنش بازیابی می‌گردد. همچنین با افزایش مقدار کرنش اعمالی، زاویه بازیابی کاهش می‌یابد که کاهش کرنش بازیابی را همراه خواهد داشت. شکل ۸ ریزساختار نمونه‌های همگن شده و نورد سرد شده در کاهش سطح مقطع‌های مختلف را نشان می‌دهد. طبق شکل در این تصاویر تغییر مشخصی در ریزساختار نمونه‌ها در اثر اعمال نورد سرد مشاهده نمی‌شود. نتایج بررسی محققان دیگر [۱۵] بر روی آلیاژ $Ti-50at\% Ni$ نیز موید همین مطلب می‌باشد که انجام نورد سرد تا ۴۰ درصد تغییری در اندازه دانه نمونه‌ها ایجاد نکرده است و دانه‌ها فقط در جهت نورد کشیده شده‌اند و

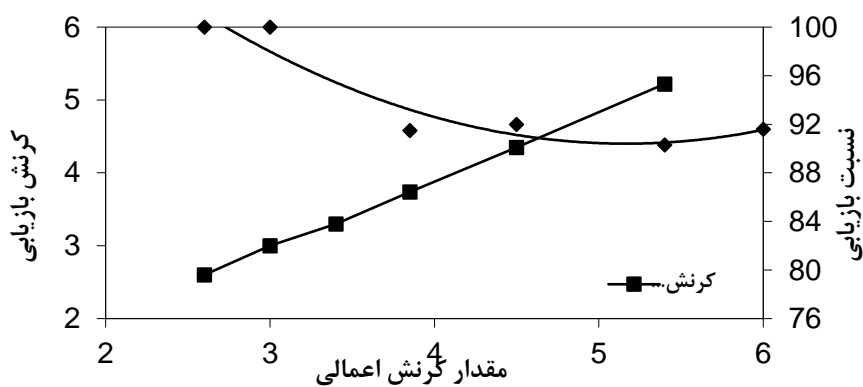
انجام آنیل در دمای 400°C نیز تغییری در ریزساختار نمونه‌ها بوجود نیاورده است.

جدول ۱- نتایج خواص حافظه داری بدست آمده از آزمون خمش برای نمونه‌های نورد سرد شد

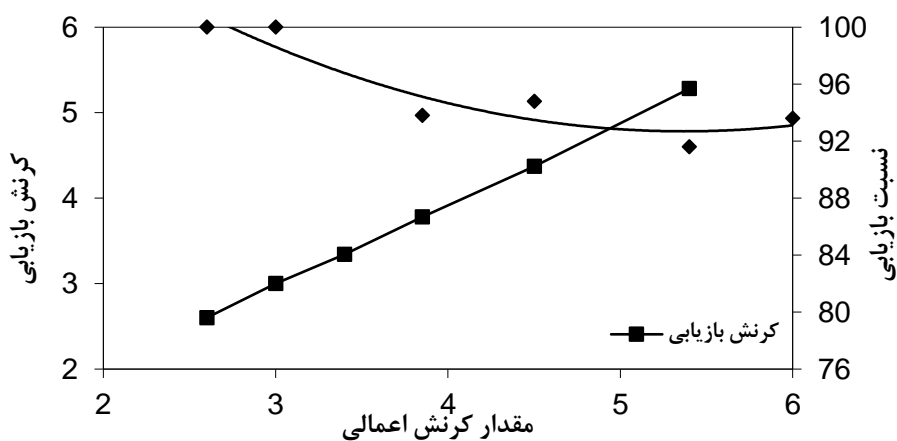
نسبت بازیابی (R) (درصد)	کرنش بازیابی (ϵ_{re})	کرنش اعمالی (ϵ_d)	زاویه بازیابی (θ_h) (درجه)	زاویه برگشت فنری (θ_d) (درجه)	ضخامت نمونه (t) (میلیمتر)	قطر ماندل (D) (میلیمتر)	
۱۰۰	۲/۶	۲/۶	۰	۵۰	۰/۴	۱۵	نمونه ریختگی
۸۸	۲/۹	۳	۶	۵۴	۰/۴	۱۲/۹	
۸۷	۳/۲۴	۳/۴	۸	۶۳	۰/۴	۱۱/۳	
۸۸	۳/۶۵	۳/۸۵	۹	۷۵	۰/۴	۱۰	
۸۷	۴/۲۵	۴/۵	۱۰	۸۲	۰/۴	۸/۵	
۸۷	۵	۵/۴	۱۱	۸۵	۰/۴	۷	
۱۰۰	۲/۶	۲/۶	۰	۵۸	۰/۴	۱۵	نمونه ۱۰ درصد نورد سرد شده
۱۰۰	۳	۳	۰	۶۰	۰/۴	۱۲/۹	
۹۳/۵	۳/۳۲	۳/۴	۴	۶۲	۰/۴	۱۱/۳	
۹۰	۳/۷۲	۳/۸۵	۶	۶۱	۰/۴	۱۰	
۹۲	۴/۳۷	۴/۵	۵	۶۴	۰/۴	۸/۵	
۹۲	۵/۲۵	۵/۴	۵	۶۵	۰/۴	۷	
۱۰۰	۲/۶	۲/۶	۰	۵۵	۰/۴	۱۵	نمونه ۱۵ درصد نورد سرد شده
۱۰۰	۳	۳	۰	۵۰	۰/۴	۱۲/۹	
۹۱/۵	۳/۳	۳/۴	۵	۵۹	۰/۴	۱۱/۳	
۹۲	۳/۷۴	۳/۸۵	۵	۶۳	۰/۴	۱۰	
۹۰/۳	۴/۳۵	۴/۵	۶	۶۲	۰/۴	۸/۵	
۹۱/۶	۵/۲۵	۵/۴	۶	۷۲	۰/۴	۷	
۱۰۰	۲/۶	۲/۶	۰	۴۳	۰/۴	۱۵	نمونه ۲۰ درصد نورد سرد شده
۱۰۰	۳	۳	۰	۴۰	۰/۴	۱۲/۹	
۹۳/۸	۳/۳۴	۳/۴	۳	۴۹	۰/۴	۱۱/۳	
۹۴/۸	۳/۷۸	۳/۸۵	۳	۵۸	۰/۴	۱۰	
۹۱/۶	۴/۳۷	۴/۵	۵	۶۰	۰/۴	۸/۵	
۹۳/۶	۵/۲۸	۵/۴	۴	۶۳	۰/۴	۷	



(الف)



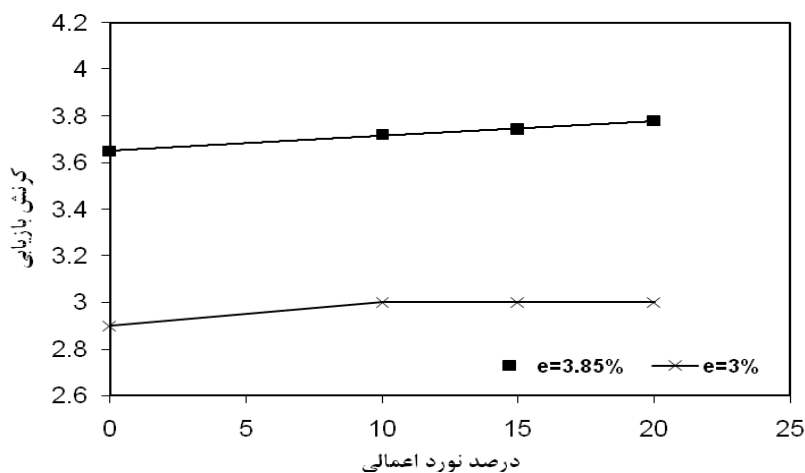
(ب)



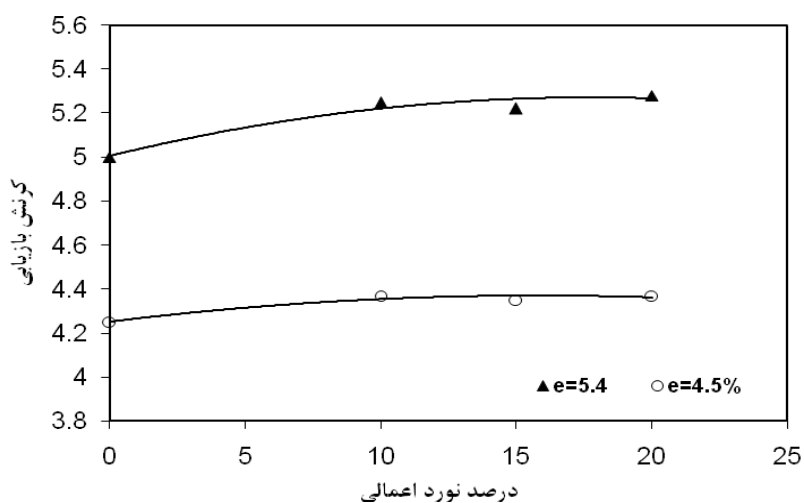
(ج)

شکل ۲ - مقادیر کرنش بازیابی و نسبت بازیابی بر حسب میزان کرنش اعمالی در نمونه‌های

نورد سرد شده (الف) ۱۰٪ نورد، (ب) ۱۵٪ نورد و (ج) ۲۰٪ نورد

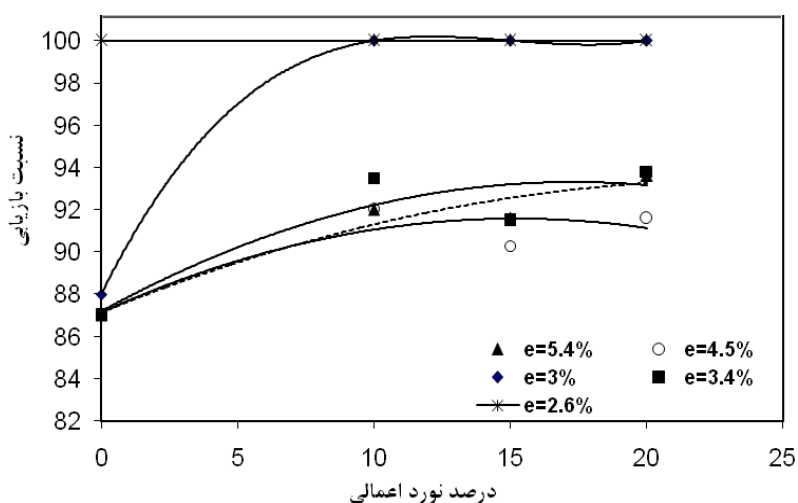


(الف)

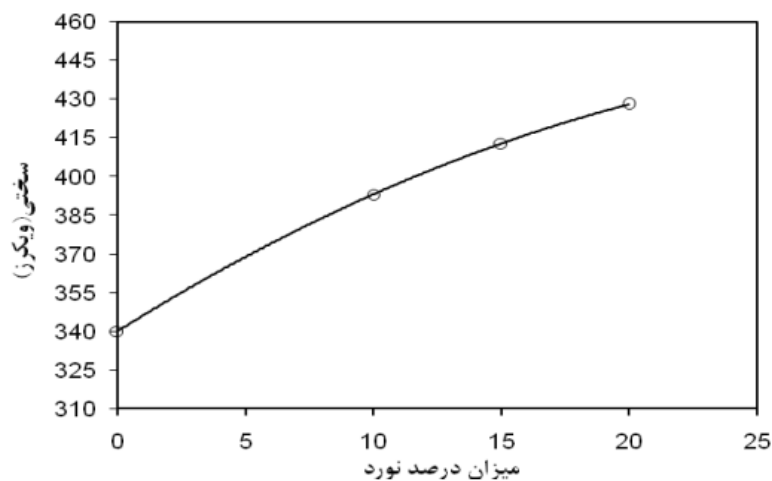


(ب)

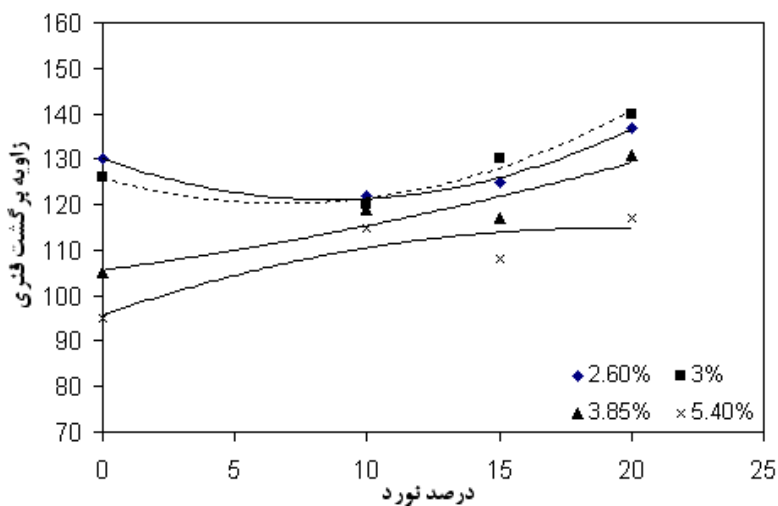
شکل ۳- کرنش بازیابی بر حسب درصد نورد در کرنش‌های اعمالی الف) ۳ و ۳/۸۵٪ و ب) ۴/۵ و ۴/۵٪.



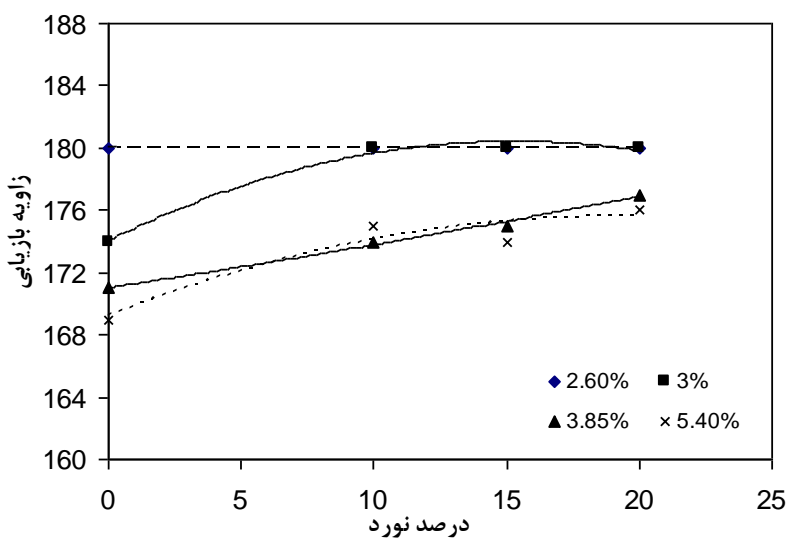
شکل ۴- نسبت بازیابی بر حسب درصد نورد در کرنش‌های اعمالی مختلف



شکل ۵- تغییرات سختی نمونه ها بر حسب میزان درصد نورد سرد اعمال شده



شکل ۶- مقدار زاویه بازگشت فنری بر حسب درصد نورد در کرنش های اعمالی مختلف



شکل ۷- مقدار زاویه بازیابی بر حسب درصد نورد در کرنش های اعمالی مختلف



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۸- ریزساختار نمونه‌های الف) همگن شده، ب) ۱۰٪ نورد سرد شده، ج) ۱۵٪ نورد سرد شده

و د) ۲۰٪ نورد سرد شده در بزرگنمایی ۱۰۰X

جدیدی بوجود آمده و شدیدترین پیک در هر نمودار نیز جهت مرجح را در آن نمونه نشان می‌دهد.

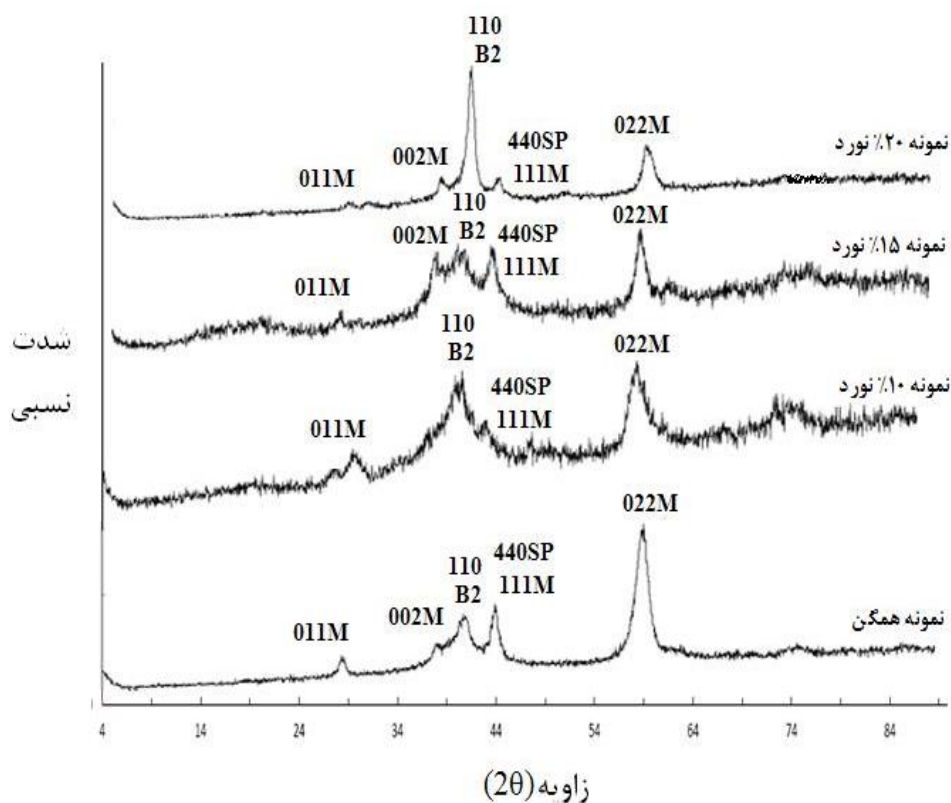
طبق شکل ۹ در زاویه ۴۲ درجه پیک بوجود آمده مربوط به فاز آستنیت می‌باشد. شدت این پیک در نمونه‌های نورد شده نیز افزایش یافته است. وجود پیک آستنیت می‌تواند بدین دلیل باشد که در فرآیند نورد سرد در اثر اعمال فشار نورد، دما بصورت موضعی افزایش یافته و به دمای استحاله آستنیت رسیده و فاز آستنیت تشکیل شده و در دمای محیط بصورت پایدار باقیمانده است [۱۶]. شدت پیک مربوط به فاز آستنیت در نمونه ۲۰٪ نورد سرد شده در

شکل ۹ الگوی پراش پرتو X آلیاژ $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$ در حالت همگن و نورد سرد شده با کاهش ضخامت‌های مختلف را نشان می‌دهد. نمونه همگن شده دارای چند پیک مربوط به فاز مارتنزیت (M) و یک پیک مربوط به فاز آستنیت (A) و فاز ثانویه (SP) می‌باشد. شدیدترین پیک این نمونه در زاویه ۶۰ درجه می‌باشد که نشان می‌دهد، صفحه مرجح مارتنزیت در نمونه همگن در این زاویه وجود دارد. در نمونه‌های نورد سرد شده زوایای مربوط به پیک‌های مارتنزیت و آستنیت تغییر نکرده است، فقط شدت پیک‌ها تغییر کرده است که نشان می‌دهد، در اثر اعمال نورد بافت

در نمونه‌های نورد سرد شده، از آنجا که نمونه ۲۰٪ نورد سرد دمای M_f حدود $10^\circ C$ دارد، پیک شدیدتر فاز آستنیت در این نمونه بدین دلیل می‌باشد که دمای انجام تست (دمای محیط) در محدوده مابین دماهای M_s و M_f می‌باشد لذا پس از حرارت دادن و تشکیل آستنیت در حین سرد کردن تا دمای محیط به دلیل پایین‌تر بودن دمای پایان استحاله مارتنزیت از دمای محیط، فاز آستنیت در دمای محیط تشکیل می‌گردد. وجود فاز آستنیت، باعث افت خواص حافظه‌داری و کرنش بازیابی می‌شود. عدم افزایش میزان کرنش بازیابی و نسبت بازیابی در نمونه ۲۰٪ نورد شده در مقایسه با نمونه ۱۰٪ نورد شده می‌تواند ناشی از وجود فاز آستنیت بیش‌تر در این نمونه به دلیل پایین‌تر بودن دمای M_f آن نسبت به دمای انجام تست خمش باشد.

مقایسه با نمونه‌های دیگر بیش‌تر می‌باشد که نشان می‌دهد مقدار فاز آستنیت بیشتری در این نمونه تشکیل شده‌است. تشکیل فاز مارتنزیت و آستنیت بستگی به دماهای استحاله آستنیت و مارتنزیت نمونه و دمای انجام تست حافظه‌داری نیز دارد. بسته به اینکه دمای انجام تست حافظه‌داری نسبت به دماهای استحاله چگونه باشد سه حالت وجود خواهد داشت:

- اگر دمای تست حافظه‌داری بالاتر از دمای A_f باشد، ساختار بصورت کاملا آستنیت خواهد بود.
- اگر دمای تست حافظه‌داری بین دمای A_f و M_f باشد، ساختار متشکل از آستنیت و مارتنزیت خواهد بود.
- اگر دمای تست حافظه‌داری پایین‌تر از دمای M_f باشد، ساختار بصورت کاملا مارتنزیت خواهد بود.



شکل ۹- الگوی پراش پرتو X آلیاژ $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$ در حالت همگن و

نورد سرد شده با درصد نوردهای مختلف

نتیجه گیری

۵- نتایج الگوی پراش پرتو X نشان داد که در نمونه-های نورد شده زوایای مربوط به پیک‌های مارتنزیت و آستنیت تغییر نکرده است و تنها شدت پیک‌ها تغییر کرده است. شدت پیک مربوط به فاز آستنیت در نمونه ۲۰٪ نورد سرد شده در مقایسه با نمونه‌های دیگر بیش‌تر می‌باشد که نشان می‌دهد، مقدار فاز آستنیت بیشتری در این نمونه تشکیل شده است. عدم افزایش میزان کرنش بازیابی در این نمونه در مقایسه با نمونه ۱۰٪ نورد شده می‌تواند ناشی از وجود فاز آستنیت بیش‌تر باشد.

سپاسگذاری

مقاله حاضر استخراج شده از طرح تحقیقاتی با عنوان بررسی اثر فرآیند نورد بر دماهای استحاله و کرنش بازیابی آلیاژ حافظه‌دار NiTiHf می‌باشد که از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی بابت حمایت از این طرح پژوهشی کمال تشکر را دارم.

References:

1. K. Otsuka, X. Ren, "Physical Metallurgy of Ti-Ni Based Shape Memory Alloys", Progress in Materials Science. Vol. 50, pp. 511-678, 2005.

۲- م. قدیمی، ع. شکوه فر، ح. رستمی و ع. قلی زاده وزوانی، " مطالعه دگرگونی فازی و رفتار گرماکشسانی ترکیب NiTiCu نانوبلوری سنتز شده با فرآیند آلیاژسازی مکانیکی "، نشریه مواد نوین، جلد ۳، شماره ۴، ص ۱۲-۱، تابستان ۱۳۹۲.

3. G.S. Firstov, J.V. Humbeeck, and Y.N. Koval, "High Temperature Shape Memory Alloys: Some Recent Developments", Materials Science and Engineering A. Vol. 378, pp.2-10, 2004.

4. P.L. Potapov, A.V. Shelyakov, A.A.

۱- در نمونه ریختگی فقط کرنش اعمالی ۲/۶ درصد بطور کامل بازیابی می‌شود، اما در نمونه‌های نورد سرد شده کرنش‌های اعمالی ۲/۶ و همچنین ۳ درصد بطور صد درصد بازیابی می‌شود.

۲- در کرنش‌های اعمالی بالاتر از ۳ درصد بازیابی بطور کامل اتفاق نیافتاده و به کم‌تر از ۱۰۰ درصد افت پیدا می‌کند. در کرنش‌های اعمالی بیش‌تر از ۳ درصد تغییر شکل لغزشی اتفاق افتاده که منجر به عدم بازیابی کامل کرنش می‌گردد.

۳- با اعمال نورد سرد مقدار سختی و در نتیجه استحکام آلیاژ افزایش یافته و موجب افزایش تنش بحرانی برای لغزش شده و نهایتاً، باعث بهبود کرنش بازیابی گردیده است.

۴- حداکثر کرنش بازیابی شده در نمونه ریختگی مقدار ۵ با نسبت بازیابی ۸۷٪ می‌باشد. با اعمال نورد سرد به میزان ۱۰ درصد کرنش بازیابی به ۵/۲۵ و نسبت بازیابی به ۹۲٪ می‌رسد. با افزایش درصد نورد سرد به ۲۰ درصد این مقادیر به ۵/۲۸ و ۹۳/۶٪ می‌رسد.

Gulyaev, E.L. Svistunova, N.M. Matveeva, and D. Hodgson, " Effect of Hf on the Structure of Ni-Ti Martensitic Alloys", Material Letters. Vol. 32, pp. 247-250, 1997.

5. X.L. Meng, W. Cai, L.M. Wang, Y.F. Zheng, L.C. Zhao, and L.M. Zhou, "Microstructure of Stress Induced Martensite in a Ti-Ni-Hf High Temperature Shape Memory Alloy", Scripta Materialia, Vol.45, pp.1177-1182, 2001.

6. W. Cai, X.L. Meng, L.C. Zhao, "Recent Development of TiNi-Based Shape Memory Alloys", Current Opinion in Solid State and Materials Science, Vol. 9, pp. 296-302, 2005.

7. F. Dalle, E. Perrin, P. Vermaut, M.

- Masse, R. Portier. "Interface Mobility in Ni_{49.8}Ti_{42.2}Hf₈ Shape Memory Alloy", *Acta Materialia*, Vol. 50, pp. 3557-3565, 2002.
8. X.L. Meng, Y.X. Tong, K.T. Lau, W. Cai, L.M. Zhou, L.C. Zhao, "Effect of Cu Addition on Phase Transformation of Ti-Ni-Hf High-Temperature Shape Memory Alloys", *Materials Letters*. Vol. 57, pp. 452-456, 2002.
9. X.L. Meng, Y.D. Fu, Q.F. Li, J.X. Zhang, W. Cai, L.C. Zhao, "Shape-Memory Behaviors in an Aged NiRich TiNiHf High Temperature Shape-memory Alloy", *Intermetallics*, Vol. 16, pp. 698-705, 2008.
10. M.S. Shakeri, J. Khalil-Allafia, V. Abbasi-Chianeha, A. Ghabchi, "The Influence of Ni₄Ti₃ Precipitates Orientation on Two-way Shape Memory Effect in a NiRich NiTi Alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 485, pp. 320-323, 2009.
11. M. Moshref javadi, M. Belbasi, M. T. Salehi, M. Afshar, "Effect of Aging on the Microstructure and Shape Memory Effect of a Hot Rolled NiTiHf Alloy", *Materials Engineering and Performance*, Vol. 20, pp. 618-622, 2011.
12. M. Belbasi, M. T. Salehi, S.A.A. Akbari Mousavi, "A study on the mechanical behavior and microstructure of NiTiHf shape memory alloy under hot deformation", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 560, pp. 96-102, 2013.
13. M. Moshref-Javadi, M. Belbasi, S. H. Seyedein, "Fabrication of (Ti,Hf)-rich NiTiHf Alloy Using Graphitic Mold and Crucible", *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 30, pp. 280-284, 2014.
14. Y. Tong, F. Chen, B. Tian, Y. Zheng, "Microstructure and martensitic transformation of Ti₄₉Ni_{51-x}Hf_x high temperature shape memory alloys", *Materials Letters*, Vol. 63, pp. 1869-1871, 2009.
15. A. Foroozmehr, A. Kermanpur, F. Ashrafizadeh, Y. Kabiri, "Effects of thermo-mechanical parameters on microstructure and mechanical properties of Ti-50 at.%Ni shape memory alloy produced by VAR method", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 535, pp. 164-169, 2012.
16. K. Tsuchiya, M. Inuzuka, D. Tomus, A. Hosokawa, H. Nakayama, K. Morii, Y. Todaka, M. Umemoto, "Martensitic transformation in nanostructured TiNi shape memory alloy formed via severe plastic deformation" *Materials Science and Engineering A*, Vol. 438-440, pp. 643-648, 2006.