

بررسی رفتار تغییرشکل گرم و خواص حافظه‌داری آلیاژ حافظه‌دار دمای بالا  $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$ 

مجید بلباسی

استادیار، دانشکده عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

تهران، کد پستی: ۱۹۵۵۸۴۷۷۸۱، iau.ac.ir/majid.belbasi@

## چکیده

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۵ مهر ۱۴۰۱

داوری اولیه: ۲۳ مهر ۱۴۰۱

پذیرش: ۱۴ آبان ۱۴۰۱

## کلیدواژگان:

آلیاژهای حافظه دار  $NiTiHf$ 

نورد گرم

کشش گرم

کرنش بازیابی

نسبت بازیابی

آلیاژهای حافظه‌دار  $NiTiHf$  برای کاربردهای صنعتی در دمای بالا به دلیل دمای استحاله بالا و پایداری حرارتی و قیمت پایین‌تر، بسیار مورد توجه می‌باشد. البته خواص حافظه‌داری آنها از آلیاژهای دوتایی  $NiTi$  کمتر می‌باشد. راه حل این مشکل افزایش استحکام آلیاژ جهت جلوگیری از وقوع تغییرشکل پلاستیکی ناشی از لغزش می‌باشد. یکی از راههای بهبود خواص حافظه‌داری انجام عملیات ترمومکانیکی می‌باشد. در این پژوهش آلیاژ  $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$  در کوره قوس تحت خلاء آلیاژسازی و ریخته‌گری شد. سپس آزمون کشش گرم بر روی نمونه‌ها با نرخ کرنش  $0.01 s^{-1}$  در دماهای ۸۰۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. همچنین نمونه‌ها در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد با کاهش ضخامت‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد نورد گرم شدند. جهت بررسی خواص حافظه‌داری و تعیین میزان کرنش بازیابی و نسبت بازیابی با استفاده از آزمون خمش کرنش‌های اعمالی ۲/۶ تا ۶ به روی نمونه‌ها اعمال شد. نتایج آزمون کشش گرم نشان داد که دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل مناسب بودن میزان شکل‌پذیری آلیاژ برای انجام نورد گرم قابل قبول می‌باشد. حداکثر کرنش بازیابی در نمونه ریختگی ۵/۷ با نسبت بازیابی ۸۸ درصد بود. با اعمال ۱۰ درصد نورد گرم، میزان کرنش بازیابی و نسبت بازیابی به ۵/۸ و ۹۲ افزایش یافت و در ادامه با اعمال ۲۰ درصد نورد این مقادیر به ۵/۹ و ۹۴ افزایش یافت. تشکیل دانه‌های یکنواخت و هم‌محور در ریزساختار نمونه‌ها حاکی از وقوع تبلور مجدد دینامیکی می‌باشد که منجر به افزایش میزان کرنش بازیابی گردید.

Investigating Hot Deformation Behavior and Shape Memory Properties of  $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$  High Temperature Shape Memory Alloy

Majid Belbasi

Department of Civil and Earth resources, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran  
P.O.B. 1955847781, majid.belbasi@iau.ac.ir

## Article Information

Original Research Paper  
Received: 27 September 2022  
First Decision: 15 October 2022  
Accepted: 5 November 2022

## Keywords:

 $NiTiHf$  shape memory alloys  
Hot rolling  
Hot tensile  
Recovery strain  
Recovery ratio

## Abstract

$NiTiHf$  high temperature shape memory alloys are highly popular for high temperature industrial applications due to their high transformation temperature, thermal stability and lower cost. However, they have weaker shape memory properties than  $NiTi$  binary alloys. The solution to this problem is to increase the strength of the alloy in order to prevent plastic deformation caused by slipping. Thermomechanical treatment is a method to improve the recovery strain. In this research, the  $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$  shape memory alloy was cast by vacuum arc melting and then the hot tensile test was performed on the samples with a strain rate of  $0.01 s^{-1}$  at 800, 900, 1000 and 1100 °C, also specimens were hot-rolled at 1000 °C with a reduction of thicknesses by 10, 15, 20 and 30%. To determine the amount of recovery strain and recovery ratio by bending test strains of 2.6 to 6 were applied to the samples. The results of the hot tensile test showed that the temperature of 1000 °C is acceptable for hot rolling due to the suitable ductility of the alloy. The maximum recovery strain in the cast sample was 5.7 with a recovery ratio of 88%. By applying 10% of hot rolling, the recovery strain and recovery ratio increased to 5.8 and 92 respectively, while after 20% of rolling, these values increased to 5.9 and 94. The formation of uniform and coaxial grains in the microstructure of the samples indicated the occurrence of dynamic recrystallization, which led to an increase in the recovery strain.

## ۱- مقدمه

استحاله و مقدار کرنش قابل بازیابی می‌باشد و این دو عامل به شدت وابسته به ترکیب شیمیایی می‌باشد [۲]. با افزودن عناصر آلیاژی به آلیاژهای نیکل-تیتانیوم می‌توان دمای استحاله را تغییر داده و آن را برای کاربردهای مختلف کنترل نمود. برخی عناصر مانند مس و منگنز حتی در مقادیر زیاد هم تأثیر چندانی بر دمای استحاله ندارند. اکثر عناصر آلیاژی مانند  $Cr$ ،  $Fe$ ،  $V$ ،  $Mn$  و  $Cr$

در بین آلیاژهای حافظه‌دار، آلیاژهای نیکل-تیتانیوم به دلیل خواص حافظه‌داری بالا، خواص مکانیکی و عمر خستگی بالا، مقاومت به خوردگی و سایش بالا و زیست‌سازگاری، نسبت به سایر آلیاژهای حافظه‌دار مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [۱]. عملکرد آلیاژهای نیکل-تیتانیوم وابسته به دماهای

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Belbasi, Investigating Hot Deformation Behavior and Shape Memory Properties of  $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$  High Temperature Shape Memory Alloy, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 6, pp. 49- 58, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.160941>

و خواص حافظه‌داری آلیاژ  $Ni_{50.3}Ti_{34.7}Hf_{15}$  [۱۹] می‌باشد. بررسی‌ها نشان داد در رابطه با عملیات ترمومکانیکی آلیاژ  $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$  و به خصوص در زمینه تغییر شکل نورد گرم آن تحقیقات جامع و کاملی انجام نشده است. بطوریکه در ارتباط با خواص شکل‌پذیری گرم این آلیاژها با استفاده از آزمون کشش گرم هیچ نوع اطلاعاتی وجود ندارد. فرایندهای شکل‌دهی گرم فلزات از اهمیت زیادی برخوردار است. کارگرم فلزات در محدوده دمایی بین ۰/۵ تا ۰/۹ دمای ذوب و در نرخ کرنش‌های مختلف انجام می‌شود. از این رو در فرایندهای شکل‌دهی گرم فلزات مانند نورد مواد از خود رفتار پیچیده نشان می‌دهند. در نتیجه بررسی رفتار تغییر شکل فلزات در دماهای بالا دارای اهمیت زیادی است [۲۰]. لذا انجام آزمون کشش گرم در دماهای مختلف قبل از انجام فرایندهای اصلی تغییر شکل گرم نظیر نورد ضروری می‌باشد. در این تحقیق پس از بررسی شکل‌پذیری گرم آلیاژ با انجام آزمون کشش گرم و تعیین دمای بهینه، اثر نورد گرم بر کرنش بازیابی و نسبت بازیابی آلیاژ  $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$  مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق برای ساخت نمونه از تیتانیوم و نیکل با خلوص ۹۹/۹٪ و هافنیوم با خلوص ۹۹/۷٪ استفاده شد. برای ساخت آلیاژ  $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$  از کوره قوس الکتریکی تحت خلاء (VAM) جهت ذوب مواد اولیه و آلیاژسازی استفاده گردید. در این کوره از یک الکتروود غیر مصرفی تنگستن استفاده شد و ذوب و انجماد در یک قالب مسی آبگرد صورت گرفت. خلاء محفظه کوره ابتدا توسط دو پمپ خلاء روتوری و نفوذی به  $10^{-3}$  میلی‌بار 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. برای همگنی بیشتر ترکیب شیمیایی شمش، عملیات ذوب ۴ مرتبه انجام شد. شمش بعد از همگن سازی در کوره خلاء در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت کوئنچ شد و در ادامه نمونه‌هایی از آن جهت اقدامات بعدی بریده شد. سپس نمونه‌های آزمون کشش گرم بر طبق استاندارد ASTM E8 به شکل ورق تهیه شدند. برای انجام آزمون از یک دستگاه سروهیدرولیک Instron 8502 مجهز به کوره و متصل به کامپیوتر استفاده شد. نمونه‌ها ابتدا به مدت ۱۰ دقیقه در دماهای ۱۰۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد نگه داشته شده سپس آزمون کشش گرم با نرخ کرنش  $0.1 s^{-1}$  در دمای ثابت تا حد شکست نمونه انجام شد نمونه‌ها پس از

Co (بعنوان عنصر سوم) دمای استحاله‌ مارتنزیتی NiTi را کاهش می‌دهند. ولیکن عناصری مانند Zr, Pt, Pd, Au و Hf باعث افزایش دماهای استحاله‌ مارتنزیتی می‌گردند. از بین این عناصر طلا، پالادیم و پلاتین جایگزین نیکل می‌شوند و زیرکونیم و هافنیوم به جای تیتانیوم قرار می‌گیرند. در این میان آلیاژهای NiTiHf برای بسیاری از کاربردهای صنعتی در دمای بالا بدلیل دمای استحاله بالا و پایداری حرارتی و قیمت پایینتر نسبت به دیگر آلیاژهای سه‌تایی (NiTiZr, NiTiPt) و (NiTiAu) مورد توجه می‌باشند [۳-۶]. البته خواص حافظه‌داری و شکل‌پذیری آنها از آلیاژهای دو تایی NiTi کمتر می‌باشد [۷]. علت پایین بودن خواص حافظه‌داری در آلیاژهای NiTiHf تنش بحرانی پایین برای لغزش نابجایی‌ها در این آلیاژها ذکر شده است [۸، ۹]. 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 [۱۰، ۱۱].

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 بر دماهای استحاله این آلیاژها، بهبود خواص حافظه‌داری با انجام عملیات پیرسختی، بررسی خواص مکانیکی و بررسی استحاله مارتنزیت این آلیاژها، متمرکز شده است. یکی از مهمترین تحقیقات صورت گرفته، بررسی افزودن عنصر چهارم بر دماهای استحاله آلیاژ NiTiHf جهت افزایش دماهای استحاله و بهبود خواص حافظه‌داری بوده است. این تحقیقات شامل بررسی افزودن عنصر مس بر دماهای استحاله و خواص حافظه‌داری آلیاژهای NiCuTiHfZr و NiCuTiHf [۱۲]، افزودن عنصر Zr بر رفتار استحاله آلیاژ  $Ti_{50/5-x}Ni_{49/5}Zr_xHf_{x/2}$  [۱۳]، افزودن Ta بر رفتار استحاله فاز و ریزساختار آلیاژ NiTiHfTa [۱۴]، تأثیر عنصر Sc بر استحاله مارتنزیت و ریزساختار آلیاژ غنی از نیکل NiTiHfSc [۱۵] و اثر اضافه کردن Pd بر خواص حافظه‌داری آلیاژ  $Ni_{45/3}Ti_{39/7}Hf_{10}Pd_5$  [۱۶] می‌باشد. از دیگر راهکارها برای بهبود خواص حافظه‌داری، انجام عملیات حرارتی و ترمومکانیکی می‌باشد. تحقیقات انجام شده توسط محققین در این زمینه شامل بررسی عملیات حرارتی پیرسختی بر رفتار استحاله آلیاژ NiTi-20Hf [۱۷]، بررسی اثر نورد گرم و سرد بر خواص حافظه‌داری آلیاژ  $Ni_{50}Ti_{30}Hf_{20}$  [۱۸]، بررسی ریزساختار

تغییر شکل بلافاصله در آب کوئنچ شدند. نمونه‌ها برای انجام عملیات نورد تحت سنگ زنی قرار گرفتند. قطر غلتک‌های نورد ۱۱۰ میلی‌متر، سرعت حرکت غلتک‌ها در حداقل مقدار ممکن یعنی حدود ۲ دور در دقیقه تنظیم گردید. میزان میانگین کاهش سطح مقطع اعمالی در هر پاس ۵ درصد بود. نمونه‌ها در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد با کاهش ضخامت‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ 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. برای تعیین کرنش بازیابی و نسبت بازیابی نمونه‌های آلیاژ  $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$  از آزمون خمش استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است نمونه با ضخامت  $t$  در دمای محیط حول سنجه ایی با قطر  $D$  خم شده سپس به دلیل خاصیت فنری مقداری از این خمش باز می‌گردد. زاویه پس از بازگشت فنری با  $\theta_d$  نشان داده شده است. با افزایش دما تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد استحالهٔ مارتنزیت به آستنیت رخ می‌دهد و نمونه تغییر شکل می‌دهد و مقداری از کرنش اعمالی بازیابی می‌گردد. زاویه پس از بازیابی با  $\theta_h$  نشان داده شده است. در این تحقیق از نمونه‌هایی با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر و طول ۱۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. مقدار کرنش اعمال شده به نمونه ( $\epsilon_d$ ) با توجه به قطر سنجه و ضخامت نمونه از رابطه (۱) و مقدار کرنش بازیابی شده ( $\epsilon_{re}$ ) و نسبت بازیابی کرنش ( $R$ ) با توجه به کرنش اعمال شده با استفاده از زوایای بدست آمده  $\theta_d$  و  $\theta_h$  از روابط (۲) و (۳) به دست آمد [۲۱].

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی آزمون کشش گرم

شکل ۲ منحنی تنش-کرنش مهندسی بدست آمده برای آلیاژ  $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$  در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. طبق شکل آلیاژ در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد در منطقه الاستیک دچار شکست می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در دمای ۱۱۰۰ و ۱۰۰۰، ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد پس از استحکام کششی نهایی، نرخ کارنرمی در منحنی‌ها کاهش یافته به طوریکه قبل از رسیدن به ناپایداری و وقوع شکست تقریباً به حالت پایا می‌رسند. مقدار کرنش ایجاد شده در دماهای ۱۱۰۰، ۱۰۰۰، ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تغییرات محسوسی نداشته و حدود ۰/۲۲ تا ۰/۲۷ می‌باشد.

جدول ۱ مقدار کاهش سطح مقطع محاسبه شده برای آلیاژ در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. مقدار کاهش سطح مقطع آلیاژ در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد کمترین مقدار می‌باشد. منحنی تنش-کرنش مهندسی این آلیاژ نشان داد که در این دما نمونه در منطقه الاستیک دچار شکست گردید. با افزایش دما به ۱۰۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد شکل پذیری به شدت افزایش می‌یابد و به حدود ۱۰ درصد می‌رسد و با افزایش دما تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مقدار کاهش سطح مقطع به ۸/۵ درصد می‌رسد و تنش حداکثر نیز کاهش می‌یابد. در تحقیقات قبلی انجام شده توسط محققان [۲۲] در مورد اثر دماهای ۸۰۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بر منحنی تنش کرنش حاصل از تست فشار گرم و ریزساختار این آلیاژ، نشان داده شد که در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل پایین بودن دما، نیروی محرکه لازم برای تشکیل دانه‌های تبلور مجدد کافی نبوده و در این دما تشکیل دانه‌های تبلور مجدد یافته اتفاق نمی‌افتد و مکانیزم ترمیم حاکم، بازیابی دینامیکی می‌باشد. لذا در منحنی تنش کرنش نیز سطح تنش بالا بوده و شکل پذیری به دلیل وجود فاز ثانویه ترد  $(Ti,Hf)_2Ni$  بسیار پایین می‌باشد. با افزایش

تغییر شکل بلافاصله در آب کوئنچ شدند. نمونه‌ها برای انجام عملیات نورد تحت سنگ زنی قرار گرفتند. قطر غلتک‌های نورد ۱۱۰ میلی‌متر، سرعت حرکت غلتک‌ها در حداقل مقدار ممکن یعنی حدود ۲ دور در دقیقه تنظیم گردید. میزان میانگین کاهش سطح مقطع اعمالی در هر پاس ۵ درصد بود. نمونه‌ها در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد با کاهش ضخامت‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ 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. برای تعیین کرنش بازیابی و نسبت بازیابی نمونه‌های آلیاژ  $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$  از آزمون خمش استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است نمونه با ضخامت  $t$  در دمای محیط حول سنجه ایی با قطر  $D$  خم شده سپس به دلیل خاصیت فنری مقداری از این خمش باز می‌گردد. زاویه پس از بازگشت فنری با  $\theta_d$  نشان داده شده است. با افزایش دما تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد استحالهٔ مارتنزیت به آستنیت رخ می‌دهد و نمونه تغییر شکل می‌دهد و مقداری از کرنش اعمالی بازیابی می‌گردد. زاویه پس از بازیابی با  $\theta_h$  نشان داده شده است. در این تحقیق از نمونه‌هایی با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر و طول ۱۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. مقدار کرنش اعمال شده به نمونه ( $\epsilon_d$ ) با توجه به قطر سنجه و ضخامت نمونه از رابطه (۱) و مقدار کرنش بازیابی شده ( $\epsilon_{re}$ ) و نسبت بازیابی کرنش ( $R$ ) با توجه به کرنش اعمال شده با استفاده از زوایای بدست آمده  $\theta_d$  و  $\theta_h$  از روابط (۲) و (۳) به دست آمد [۲۱].

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

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

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

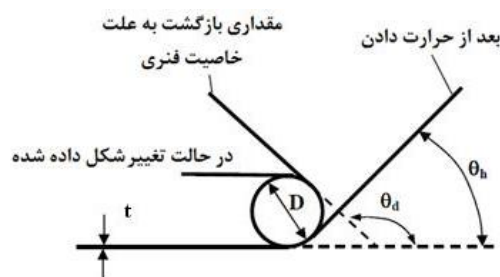
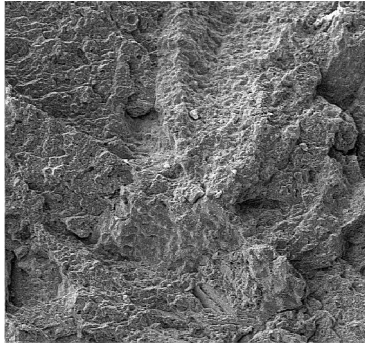


Fig. 1 Schematic of bending test for shape memory properties [21]

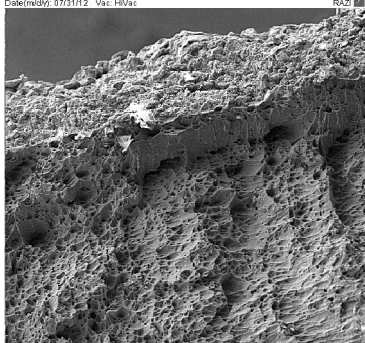
شکل ۱ شماتیک تست خمش جهت بررسی خاصیت حافظه داری [۲۱]

برای بررسی ریزساختاری نمونه‌ها با سنجه‌های با مش ۸۰، ۲۴۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ سنجه زنی و پس از آن با پودر آلومینا پولیش شدند. سپس از محلول شیمیایی اچ با نسبت

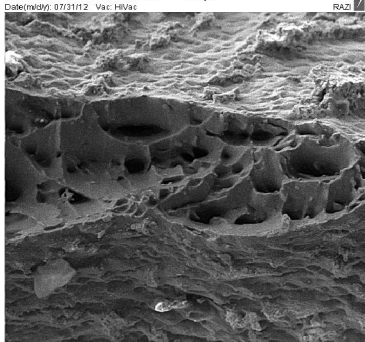
مشخص می‌باشد. همچنین وجود حفرات در سطح شکست نمونه‌های در دمای ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز دیده می‌شود. وجود حفرات و سطوح کلیواژی در سطح شکست نمونه‌های شکل‌های ۳-ب، ج و د وقوع شکست شبه کلیواژی نمونه‌ها در دمای ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.



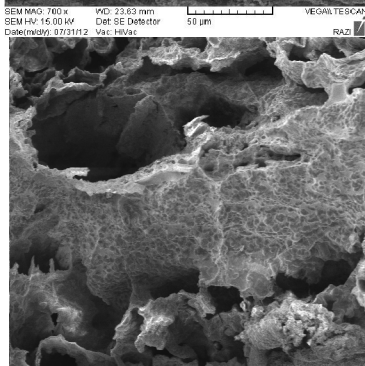
(الف)



(ب)



(ج)

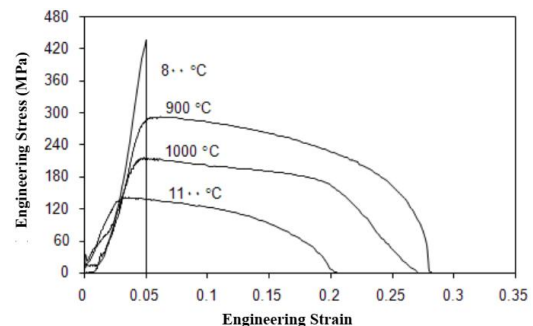


(د)

**Fig. 3** The fracture surface of tensile samples at temperatures a) 800 °C, b) 900°C, c) 1000°C, d) 1100°C

شکل ۳ سطح شکست نمونه‌های کشش در دماهای (الف) ۸۰۰°C، (ب) ۹۰۰°C، (ج) ۱۰۰۰°C و (د) ۱۱۰۰°C

دما به ۱۰۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد با توجه به ریزساختار نمونه‌ها به دلیل کافی بودن نیروی محرکه لازم وقوع تبلور مجدد دینامیکی اتفاق افتاده و با تشکیل دانه‌های جدید تبلور مجدد یافته شکل پذیری بهبود یافته و سطح تنش نیز در منحنی تنش کرنش کاهش می‌یابد. لذا پایین بودن شکل پذیری آلیاژ در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل وجود فاز ثانویه  $(Ti,Hf)_2Ni$  و بهبود شکل پذیری آلیاژ در دماهای ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل وقوع تبلور مجدد دینامیکی می‌باشد. از طرفی با بررسی انجام شده روی سطح نمونه‌ها، مقدار اکسیداسیون روی سطح نمونه‌ها در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بسیار شدید می‌باشد. در دمای بیشتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد این آلیاژها مستعد به رشد دانه و تشکیل لایه اکسیدی می‌باشد. با توجه به نزدیک بودن کرنش ایجاد شده در دماهای ۱۰۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و پایین تر بودن استحکام کششی نهایی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به نظر می‌رسد دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد جهت عملیات نورد گرم این آلیاژ نسبت به دماهای دیگر مناسب‌تر باشد.



**Fig. 2** Engineering stress-strain curve of hot tensile test at different temperatures and strain rate of 0.01

شکل ۲ منحنی تنش-کرنش مهندسی آزمون کشش گرم در دماهای مختلف و نرخ کرنش ۰/۰۱

جدول ۱ مقادیر کاهش سطح مقطع در دماهای مختلف

دما آزمایش کشش (°C)	۱۱۰۰	۱۰۰۰	۹۰۰	۸۰۰
مقدار کاهش سطح مقطع	۸/۵	۹/۶	۱۰/۱	۰/۴۵

شکل ۳ سطح شکست نمونه‌های آلیاژ پس از آزمون کشش گرم در دماهای ۱۱۰۰ و ۱۰۰۰، ۹۰۰، ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. طبق شکل ۳-الف شکست از نوع کلیواژی می‌باشد. شکست کلیواژی از نوع شکست ترد با انرژی پایین می‌باشد که شکست در طول سطوح کریستالی با اندیس پایین اشاعه پیدا می‌کند. شکل ۳-ب سطح شکست نمونه در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. وجود حفرات در سطح شکست نمونه

۳-۲- بررسی کرنش بازیابی و نسبت بازیابی

نمونه‌های نورد گرم شده با کاهش ضخامت‌های مختلف مشاهده می‌گردد.

پس از انجام نورد گرم در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد با درصد کاهش ضخامت‌های مختلف، جهت بررسی مقدار کرنش بازیابی و نسبت بازیابی، نمونه‌های همگن و نورد شده به دور سنبه‌های با قطرهای مختلف از ۶/۲۵ تا ۱۵ میلی‌متر خم شدند و کرنش‌های ۲/۶ تا ۶ درصد به روی نمونه‌ها اعمال شد. مقادیر زوایای پس از برگشت فنری و پس از بازیابی در اثر اعمال حرارت و همچنین کرنش بازیابی و نسبت بازیابی برای تمامی نمونه‌ها محاسبه گردید که قسمتی از نتایج مربوط به نمونه ریختگی و نمونه‌های نورد گرم شده با درصد‌های مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است. آنچه که از این جدول قابل استفاده می‌باشد اینست که برای نمونه‌ها در کرنش‌های اعمالی مختلف، مقدار کرنش قابل بازیابی و نسبت بازیابی مشخص می‌باشد. از طرفی بهبود میزان کرنش بازیابی شده در نمونه‌های نورد گرم نسبت به نمونه ریختگی نیز قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۲ نتایج خواص حافظه‌داری حاصل از آزمون خمش نمونه‌ها

Table 2 The results of the shape memory properties obtained from the bending test of the samples

نسبت بازیابی (R)	کرنش بازیابی ( $\epsilon_{re}$ )	کرنش اعمالی ( $\epsilon_a$ )	زاویه بازیابی ( $\theta_b$ )	زاویه برگشت قطر سنبه فنری ( $\theta_a$ )	نسبت بازیابی
۱۰۰	۲/۶	۲/۶	۰	۵۰	آلیاژ
۸۸	۳/۶۵	۳/۸۵	۹	۷۵	کار نشده
۸۷	۴/۲۵	۴/۵	۱۰	۸۲	۸/۵
۱۰۰	۲/۶	۲/۶	۰	۷۰	۱۰ درصد
۹۱/۶	۳/۷۲	۳/۸۵	۶	۷۲	۱۰ درصد نورد
۹۲/۵	۴/۳۵	۴/۵	۶	۸۰	۸/۵
۱۰۰	۲/۶	۲/۶	۰	۶۱	۱۵ درصد
۹۳	۳/۷۴	۳/۸۵	۵	۷۲	۱۰ درصد نورد
۹۳/۵	۴/۳۷	۴/۵	۵	۷۸	۸/۵
۱۰۰	۲/۶	۲/۶	۰	۴۸	۲۰ درصد
۹۵/۹	۳/۸	۳/۸۵	۲	۴۹	۱۰ درصد نورد
۹۴/۹	۴/۴۲	۴/۵	۳	۵۹	۸/۵
۱۰۰	۲/۶	۲/۶	۰	۲۲	۳۰ درصد
۹۵	۳/۸	۳/۸۵	۲	۴۲	۱۰ درصد نورد
۹۳/۱	۴/۴	۴/۵	۴	۵۸	۸/۵

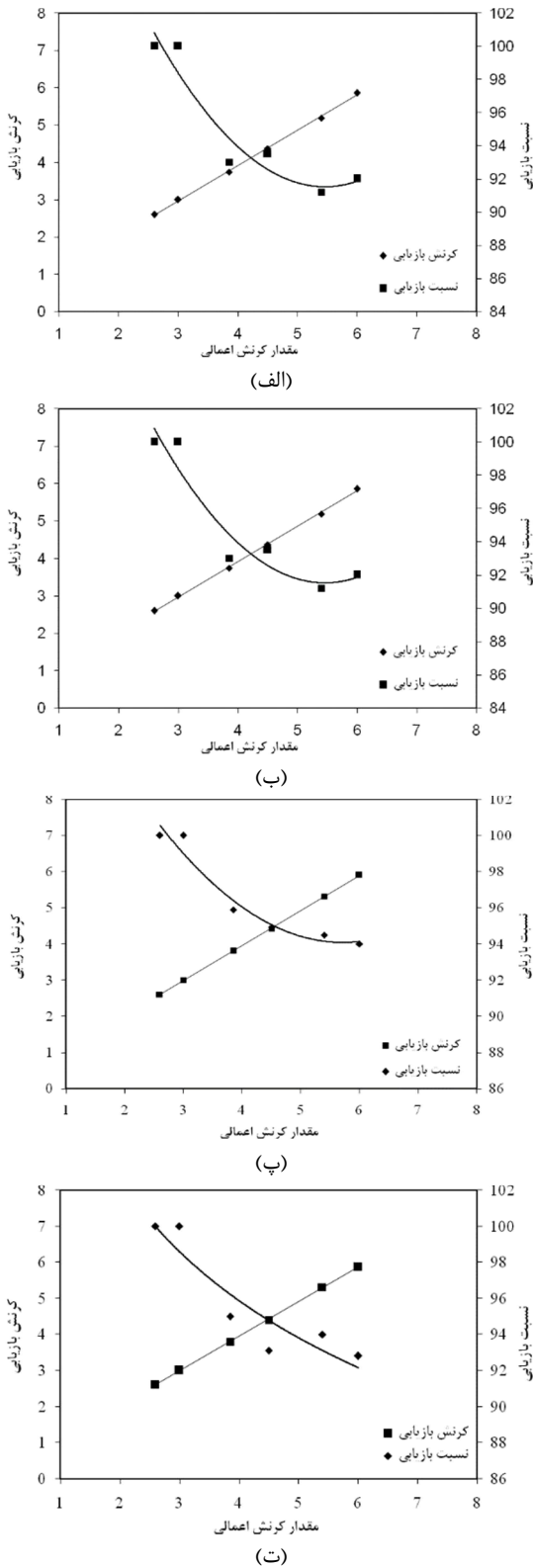


Fig. 4 Values of recovery strain and ratio in terms of applied strain in samples with rolling percentage a)10, b)15, c)20, d)30

شکل ۴ مقادیر کرنش بازیابی و نسبت بازیابی بر حسب کرنش اعمالی در نمونه‌های با درصد نورد الف) ۱۰، ب) ۱۵، پ) ۲۰ و ت) ۳۰



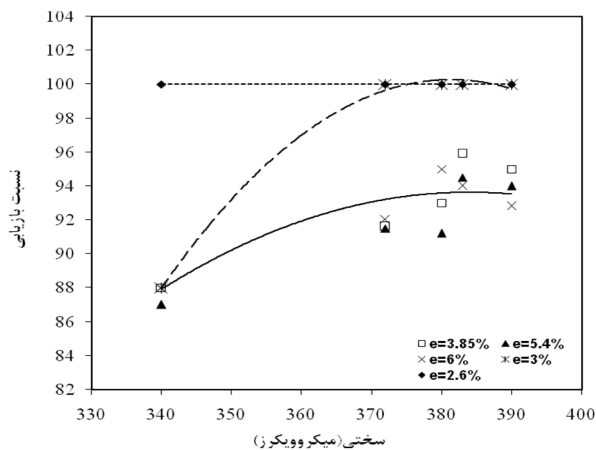


Fig. 5 Variations in recovery ratio according to hardness in values Different applied strains

شکل ۵ تغییرات نسبت بازیابی بر حسب سختی در مقادیر کرنش‌های اعمالی مختلف

شکل ۶ تغییرات کرنش بازیابی را بر حسب سختی نمونه‌ها نشان می‌دهد. مطابق این شکل با افزایش مقدار سختی تا ۳۷۰ ویکرز (نمونه ۱۰ درصد نورد) کرنش بازیابی و نسبت بازیابی افزایش خوبی را نشان می‌دهد، با افزایش میزان نورد از ۱۰ به ۲۰ درصد، مقدار سختی افزایش کمی داشته و کرنش بازیابی نیز افزایش کمی را نشان داده و تا ۳۰ درصد نورد به دلیل عدم تغییر سختی، کرنش بازیابی نیز تغییر محسوسی نداشته است که نشان می‌دهد نتایج کرنش بازیابی از نتایج مربوط به تغییرات سختی این آلیاژ پیروی می‌کند. با توجه به تغییرات سختی، بهبود کرنش بازیابی را می‌توان به افزایش استحکام زمینه نمونه‌های نورد شده نسبت داد. با توجه به نتایج بدست آمده، حداکثر کرنش بازیابی شده در نمونه ریختگی مقدار ۵/۷ با نسبت بازیابی ۸۸٪ می‌باشد. با اعمال نورد گرم به میزان ۱۰ درصد، کرنش بازیابی به ۵/۸ و نسبت بازیابی به ۹۲٪ می‌رسد. با افزایش درصد نورد گرم به ۲۰ درصد این مقادیر به حداکثر مقدار یعنی ۵/۹ و ۹۴٪ می‌رسد. با افزایش میزان نورد گرم تا ۳۰ درصد مقادیر کرنش بازیابی و نسبت بازیابی بدون تغییر باقی می‌ماند. لذا مقدار ۲۰ درصد نورد اعمالی جهت حصول کرنش بازیابی بیشتر نسبت به حالت ریختگی برای این آلیاژ مناسب می‌باشد.

شکل ۵ تغییرات نسبت بازیابی را بر حسب سختی در کرنش‌های اعمالی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل و همچنین در جدول ۲ مشاهده می‌شود، در نمونه ریختگی فقط کرنش اعمالی ۲/۶ بطور صد در صد بازیابی می‌شود اما در تمامی نمونه‌های نورد شده کرنش‌های اعمالی ۲/۶ و ۳ بطور صد درصد بازیابی می‌شود و در کرنش‌های اعمالی بالاتر از ۳ درصد بازیابی بطور کامل اتفاق نیافتاده و به کمتر از ۱۰۰ درصد افت پیدا می‌کند. بطوریکه در تمامی نمونه‌ها نورد شده، با افزایش میزان کرنش اعمالی، نسبت بازیابی با شیب یکسانی افت پیدا می‌کند. در کرنش‌های اعمالی بیشتر از ۳ درصد، تغییر شکل لغزشی در فاز مارتنزیت اتفاق افتاده که منجر به عدم بازیابی کامل کرنش می‌گردد. 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 حرارت دهی نمونه به فاز آستنیت بطور کامل بازیابی شود. وقتیکه مقدار تغییر شکل از این سطح تجاوز می‌کند نابجایی‌ها شروع به لغزش می‌کنند و تغییر شکل صورت گرفته بوسیله لغزش نابجایی‌ها با حرارت دهی و تبدیل به آستنیت قابل برگشت نخواهد بود. لذا مقدار کرنش کاملاً برگشت پذیر آلیاژهای حافظه‌دار برابر است با حداکثر تغییر شکلی که فرآیند حرکت مرزهای دوقلویی مارتنزیت می‌تواند قبل از لغزش نابجایی‌ها فراهم کند [۲۳]. برای اینکه یک ماده حافظه‌دار بتواند کرنش بالایی را بازیابی کند باید از تغییر شکل ناشی از لغزش در آن جلوگیری شود. این امر با افزایش استحکام آلیاژ و به تأخیر انداختن لغزش نابجایی‌ها میسر می‌گردد.

با افزایش کرنش اعمالی به مقدار بیش از ۳٪ تغییر شکل لغزشی در فاز مارتنزیت اتفاق می‌افتد که با افزایش لغزش، میزان کرنش قابل بازیابی کاهش می‌یابد. فاز مارتنزیت تنش بحرانی لغزش پایینی دارد لذا تغییر شکل لغزشی با افزایش میزان تنش ناشی از کرنش اعمالی بیشتر، راحت‌تر اتفاق افتاده و باعث افت میزان نسبت بازیابی می‌گردد. نتایج پژوهش انجام شده توسط محققان [۲۳] به روی آلیاژ  $Ti-50\%Ni$  و محققان [۲۴] به روی آلیاژ  $Ti_{29.4}Ni_{50.6}Hf_{20}$  نیز نشان داد با افزایش کرنش اعمالی تغییر شکل لغزشی در فاز مارتنزیت اتفاق می‌افتد که با افزایش لغزش میزان کرنش بازیابی و نسبت بازیابی کاهش می‌یابد.

این نمونه‌ها به دلیل اینکه عملیات نورد گرم در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد، علی‌رغم اینکه زمان نورد بسیار کوتاه بود و نمونه‌ها نیز پس از نورد، سریع در آب سرد شدند، شاهد وقوع فرآیند ترمیم دینامیکی شامل تبلور مجدد دینامیکی می‌باشیم که وقوع این پدیده باعث می‌شود که کارسختی کاهش یافته و امکان اعمال کاهش ضخامت‌های بیشتر در فرآیند نورد گرم فراهم گردد. همچنین به دلیل وقوع فرآیند تبلور مجدد دینامیکی با افزایش میزان درصد نورد اعمالی، افزایش در میزان سختی نیز با شیب کمتری در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌هایی از این آلیاژ که در تحقیقات قبلی تحت نورد سرد قرار گرفتند [۲۵] اتفاق افتاد.

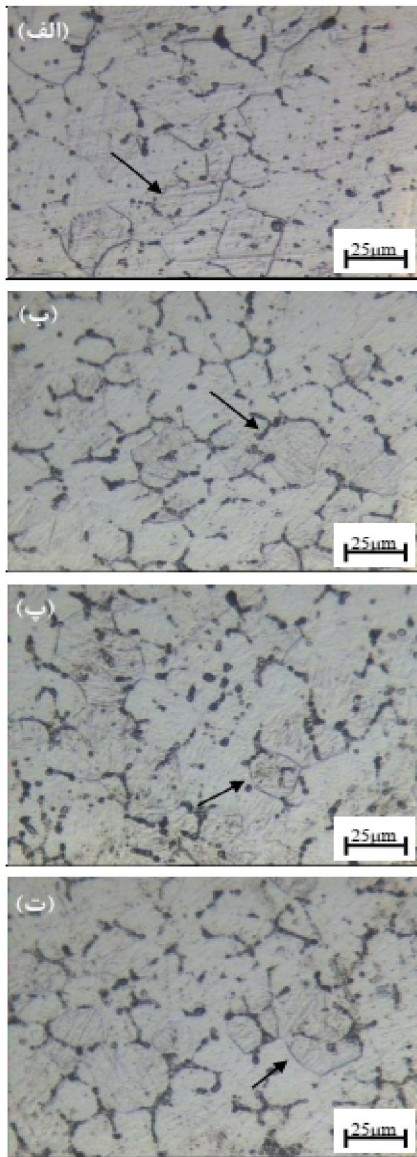


Fig. 7 Microstructure of hot rolled samples with reduction of cross section a) 10%, b) 15%, c) 20% and d) 30%

شکل ۷ ریزساختار نمونه‌های نورد گرم با کاهش سطح مقطع الف) ۱۰٪، ب) ۱۵٪، پ) ۲۰٪ و ت) ۳۰٪

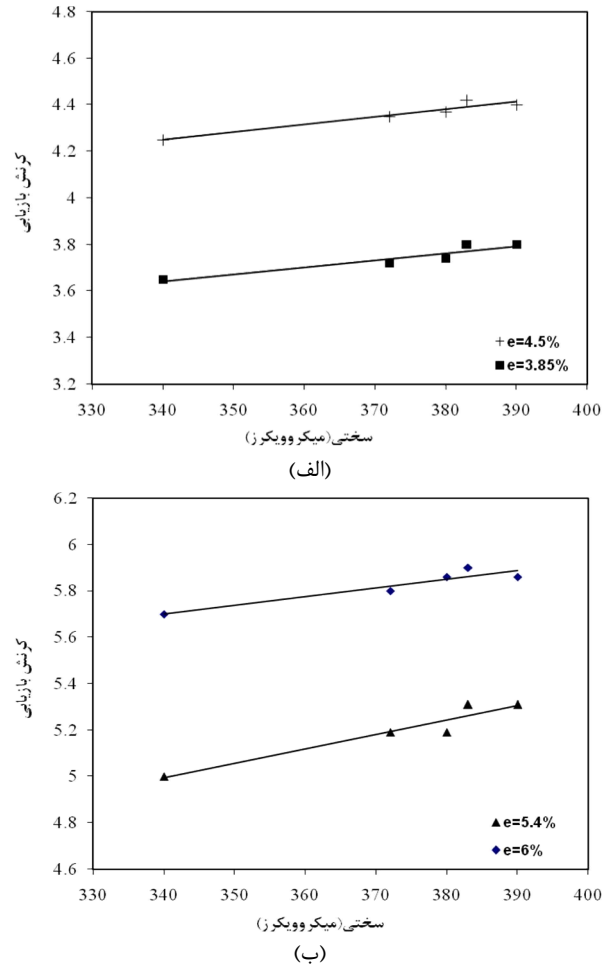


Fig. 6 variations in recovery strain according to hardness in values applied strains a) 3.85%, 4.5% and b) 5.4%, 6%

شکل ۶ تغییرات کرنش بازیابی بر حسب سختی نمونه‌ها در مقادیر کرنش‌های اعمالی الف) ۳/۸۵ و ۴/۵٪ و ب) ۵/۴ و ۶٪

### ۳-۳- بررسی‌های ریزساختاری و فازی

شکل ۷ ریزساختار نمونه‌های نورد گرم شده در کاهش سطح مقطع‌های مختلف را نشان می‌دهد. به دلیل اینکه نورد گرم در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد با توجه به وقوع پدیده تبلور مجدد دینامیکی دانه‌های جدید تبلور مجدد یافته تشکیل شده که با علامت به روی تصاویر نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، دانه‌های جدید ناشی از تبلور مجدد از فازهای ثانویه شروع به تشکیل نموده‌اند.

نتیجه آنالیز EDS صورت گرفته بر روی فاز ثانویه که در روی شکل ۷-الف مشخص شده در شکل ۸ آورده شده است. طبق آنالیز EDS ترکیب شیمیایی این فازها شامل ۳۲/۹ درصد اتمی نیکل، ۵۸/۵ درصد اتمی تیتانیوم و ۸/۶ درصد اتمی هافنیوم می‌باشد. این ترکیب شیمیایی با ترکیب فاز ثانویه  $(Ti,Hf)_2Ni$  تطابق دارد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود این فاز ثانویه عمدتاً در مرز دانه‌ها تجمع یافته است. در

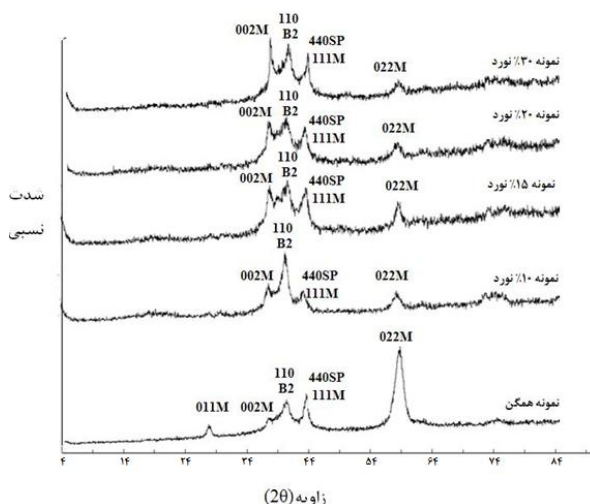


Fig. 9 X-ray diffraction pattern of  $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$  alloy in homogeneous and hot rolled state with different thicknesses reduction

شکل ۹ الگوی پراش پرتو X آلیاژ  $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$  در حالت همگن و نورد گرم شده با کاهش ضخامت‌های مختلف

#### ۴- نتیجه‌گیری

- نتایج آزمایش کشش گرم نشان داد، مقدار کاهش سطح مقطع آلیاژ در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد کمترین مقدار می‌باشد. با افزایش دما به ۱۰۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد شکل پذیری به شدت افزایش می‌یابد و به حدود ۱۰ درصد می‌رسد و با افزایش دما تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مقدار کاهش سطح مقطع به ۸/۵ درصد می‌رسد. با توجه به نزدیک بودن کرنش ایجاد شده در دماهای ۱۰۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و پایین‌تر بودن استحکام کششی نهایی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد جهت عملیات نورد گرم این آلیاژ نسبت به دماهای دیگر مناسب‌تر باشد.

- با افزایش درصد نورد گرم از حالت صفر درصد (وضعیت ریختگی) به ۱۰ درصد میزان کرنش بازیابی و نسبت بازیابی افزایش می‌یابد و در ادامه تا ۱۵ و ۲۰ درصد با شیب کمی افزایش یافته و از ۲۰ تا ۳۰ درصد تقریباً تغییری مشاهده نمی‌شود. با اعمال نورد گرم مقدار سختی افزایش یافته و موجب افزایش تنش بحرانی برای لغزش شده و نهایتاً باعث بهبود کرنش بازیابی گردیده است. در منحنی تغییرات سختی مشاهده می‌شود که افزایش سختی از ۱۰ به ۲۰ و ۳۰ درصد نورد با شیب کمی اتفاق افتاده که با نتایج کرنش بازیابی و نسبت بازیابی تناسب دارد.

- حداکثر کرنش بازیابی شده در نمونه ریختگی مقدار ۵/۷ با نسبت بازیابی ۸۸٪ می‌باشد. با اعمال نورد گرم به میزان ۱۰ درصد، کرنش بازیابی به ۵/۸ و نسبت بازیابی به ۹۲٪ می‌رسد. با

تشکیل دانه‌های تبلور مجدد یافته هم محور و یکنواخت در ریزساختار می‌تواند باعث بهبود کرنش بازیابی آلیاژ گردد بطوریکه تحقیقات انجام شده توسط ریکلینا و همکارانش [۲۶] به روی آلیاژ NiTi، نشان داد که تشکیل دانه‌های هم محور و کوچک تبلور مجدد یافته باعث افزایش کرنش بازیابی گردید. لذا یکی از علل بهبود کرنش بازیابی نمونه‌ها بر اثر نورد گرم و افزایش میزان کرنش بازیابی این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های نورد سرد شده [۲۵] وقوع تبلور مجدد و تشکیل ساختار تبلور مجدد یافته می‌تواند باشد.

شکل ۹ الگوی پراش پرتو X آلیاژ  $Ni_{50}Ti_{40}Hf_{10}$  در حالت همگن و نورد گرم شده با کاهش ضخامت‌های مختلف را نشان می‌دهد. نمونه همگن شده دارای چند قله مربوط به فاز مارتنزیت (M) و یک قله مربوط به فاز آستنیت (A) و فاز ثانویه (SP) می‌باشد. شدیدترین قله این نمونه در زاویه ۶۰ درجه می‌باشد که نشان می‌دهد صفحه مرجع مارتنزیت در نمونه همگن در این زاویه وجود دارد. در نمونه‌های نورد شده زوایای مربوط به قله‌های مارتنزیت و آستنیت تغییر نکرده است فقط شدت قله‌ها تغییر کرده است که نشان می‌دهد در اثر اعمال نورد بافت جدیدی بوجود آمده و شدیدترین قله در هر نمودار نیز جهت مرجع را در آن نمونه نشان می‌دهد. همچنین با اعمال نورد و ایجاد کرنش در نمونه‌ها، پیک‌ها پهن‌تر شده‌اند. کرنش‌های شبکه‌ای سبب کاهش و یا افزایش فاصله بین صفحات کریستالی می‌شوند. بر اساس قانون براگ با تغییر فاصله بین صفحات کریستالی زاویه ایی که پیک در آن دیده می‌شود تغییر می‌کند از این رو تغییر فاصله بین صفحات کریستالی منجر به پهن شدگی پیک می‌شود.

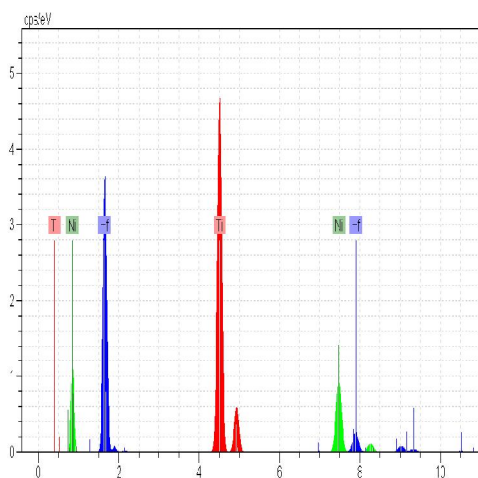


Fig. 8 The result of EDS analysis of the second phase shown in Fig 7

شکل ۸ نتیجه آنالیز EDS فاز ثانویه نشان داده شده در شکل ۷



- [7] 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.
- [8] B. Karaman, R. Noebe, J. Pons, R. Santamarta, Effect of aging on the martensitic transformation characteristics of a Ni-Rich NiTiHf high temperature shape memory alloy, *Functional Materials Letters*, Vol. 5, pp. 381-385, 2012.
- [9] F. Dalle, E. Perrin, P. Vermaut, M. Masse, R. Portier, Interface Mobility in Ni<sub>49.8</sub>Ti<sub>42.2</sub>Hf<sub>8</sub> Shape Memory Alloy, *Acta Materialia*, Vol. 50, pp. 3557-3565, 2002.
- [10] O. Karakoc, K.C. Atli, A. Evirgen, J. Pons, R. Santamarta, O. Benafan, R.D. Noebe, I. Karaman, Effects of training on the thermomechanical behavior of NiTiHf and NiTiZr high temperature shape memory alloys, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 10, pp. 794-800, 2020.
- [11] 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.
- [12] S. Baradari, N. Resnina, S. Belyaev, M. Nili-Ahmadabadi, Martensitic phase transformation and shape memory properties of the as-cast NiCuTiHf and NiCuTiHfZr alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 888, pp. 125-134, 2021.
- [13] S. F. Hsieh, S. Wu, Martensitic transformation of quaternary Ti<sub>50.5</sub>-XNi<sub>49.5</sub>ZrX/2HfX/2 (X = 0±20 at. %) shape memory alloys, *Materials Characteristic*, Vol. 45, PP. 143-152, 2000.
- [14] R. Prasad, V. S. Park, C. H. Kim, S. W. Hong, J. K. Yeom, Microstructure and phase transformation behavior of a new high temperature NiTiHf-Ta shape memory alloy with warm formability, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 697, pp. 55-61, 2017.
- [15] Y.X. Tong, X.M. Fan, A.V. Shuitcev, F.Chen, B.Tian, L.Li, Y.F.Zheng, Effects of Sc addition and aging on microstructure and martensitic transformation of Ni-rich NiTiHfSc high temperature shape memory alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 845, pp. 156-162, 2020.
- [16] E. Acar, H.E. Karaca, H. Tobe, R.D. Noebe, Y.I. Chumlyakov, Characterization of the shape memory properties of a Ni<sub>45.3</sub>Ti<sub>39.7</sub>Hf<sub>10</sub>Pd<sub>5</sub> alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 578, pp. 297-302, 2013.
- [17] O. Benafan, G.S. Bigelow, D.A. Scheiman, Transformation behavior in NiTi-20Hf shape memory alloys – Transformation temperatures and hardness, *Scripta Materialia*, Vol. 146, pp. 251-254, 2018.
- [18] N. Babacan, M. Bilal, C. Hayrettin, J. Liu, O. Benafan, I. Karaman, Effects of cold and warm rolling on the shape memory response of Ni<sub>50</sub>Ti<sub>30</sub>Hf<sub>20</sub> high-temperature shape memory alloy, *Acta Materialia*, Vol. 157, PP. 228-244, 2018.
- افزایش درصد نورد گرم به ۲۰ درصد این مقادیر به حداکثر مقدار یعنی ۵/۹ و ۹۴٪ می‌رسد. با افزایش میزان نورد گرم تا ۳۰ درصد مقادیر کرنش بازیابی و نسبت بازیابی بدون تغییر باقی می‌ماند. لذا به نظر می‌رسد مقدار ۲۰ درصد نورد اعمالی جهت حصول کرنش بازیابی بیشتر نسبت به حالت ریختگی برای این آلیاژ مناسب می‌باشد.
- با انجام نورد گرم در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد با وقوع پدیده تبلور مجدد دینامیکی دانه‌های جدید تبلور مجدد یافته در ریزساختار نمونه‌ها تشکیل شده است. یکی از علل افزایش میزان کرنش بازیابی این نمونه‌ها بر اثر نورد گرم تشکیل ساختار تبلور مجدد یافته می‌تواند باشد.

#### ۵- تقدیر و تشکر

تحقیق 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.

#### ۶- مراجع

- [1] M. Mohri, M. Nili-Ahmadabadi, J. Ivanisenko, R. Schwaiger, H. Hahn and V. Sai Kiran Chakravadhanula, Microstructure and Mechanical Behavior of a Shape Memory Ni-Ti Bi-layer Thin Film, *Journal of Thin Solid Films*, Vol. 583, pp. 245-254, 2015.
- [2] S.S. Hoseyni norabadi, M. Niliahmadabadi, The effect of hafnium element in the amount of 3% on the transformation behavior and superelastic properties of nickel-rich NiTi shape memory alloy, *Journal of Metallurgical Engineering*, Vol. 3, pp. 169-177, 2019 (in persian).
- [3] M. Belbasi, M.T. Salehi, Influence of chemical composition and melting process on hot rolling of NiTiHf shape memory alloy, *Material Engineering Performance*, Vol. 23, pp. 2368-2372, 2014.
- [4] Benafan, G. S. Bigelow, D. A. Scheiman, Transformation behavior in NiTi-20Hf shape memory alloys – Transformation temperatures and hardness, *Scripta Materialia*, Vol. 147, pp. 11-15, 2018.
- [5] H. E. Karaca, E. Acar, H. Tobe, S. M. Saghaian, NiTiHf-based shape memory alloys, *Materials Science Technology*, Vol. 30, pp. 1530-1544, 2014.
- [6] J. Chen, Z. Shengwang, Z. Yonghao, J. Zhang, W. Yuhua, Q. Yang, A study on the cold workability and shape memory effect of NiTiHf-Nb eutectic high-temperature shape memory alloy, *Intermetallics*, pp. 127-134, 2020.

- hot deformation, *Materials Science Engineering A*, Vol. 506, pp. 96-102, 2013.
- [23] T. Sakuma, Y. Mihara, Y. Ochi, K. Yamauchi, Effect of prestrain on Transformation and Deformation Behavior in Ti-50 at%Ni Shape Memory Alloy, *Materials Transactions*, Vol. 47, pp. 728-734, 2006.
- [24] X.L. Meng, Y.D. Fu, Q.F. Li, J.X. Zhang, W. Cai, L.C. Zhao, Shape-memory behaviors in an aged Ni-rich TiNiHf high temperature shape-memory alloy. *Intermetallics*, Vol. 16, pp. 698-705, 2008.
- [25] M. Belbasi, Effect of cold rolling process on recovery strain and recovery ratio of Ni50Ti40Hf10 shape memory alloy, *Journal of new materials*, Vol. 35, pp. 27-38, 2019 (in persian).
- [26] E.P. Ryklina, S.D. Prokoshkin, A.Y Kreysberg, Abnormally high recovery strain in Ti-Ni-based shape memory alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 577, pp. 255-258, 2013.
- [19] A. Evirgen, I. Karaman, R. Santamarta, J. Pons, R.D. Noebe, Microstructural characterization and shape memory characteristics of the Ni50.3Ti34.7Hf15 shape memory alloy, *Acta Materials*, Vol. 83, pp. 48-60, 2015.
- [20] H. R. Rezai Ashtiani, M. Mohammadi, Prediction of hot deformation behavior of 304 stainless steel using Johnson-Cook equation, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 8, pp. 34- 43, 2022 (in Persian)
- [21] 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.
- [22] M. Belbasi, M.T. Salehi, S.A.A Akbari Mosavi, S.M. Ebrahimi, A study on mechanical behavior and microstructure of NiTiHf shape memory alloy under