

## تأثیر عملیات حرارتی بر خواص دماهای استحاله و حافظه‌داری ترکیب NiTi متخلخل تولید شده به روش متالورژی پودر

سید علیرضا حسینی<sup>۱</sup>، سید خطیب الاسلام صدرنژاد<sup>۲</sup>

پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین دشت، کرج

[arh293@gmail.com](mailto:arh293@gmail.com)

### چکیده

ترکیب NiTi جزء پرکاربردترین آلیاژهای حافظه‌دار است. خواص خوردگی عالی، سازگاری زیستی خوب علاوه بر خواص حافظه‌داری و سوپرالاستیسیته باعث استفاده‌ی فراوان این ترکیب بخصوص در کاربردهای پزشکی شده است. در سال‌های اخیر استفاده از NiTi متخلخل جهت ایجاد داربست‌های جایگزین استخوان مورد توجه قرار گرفته است. اساس ساخت این قطعات بر پایه‌ی روش‌های متالورژی پودر است. از آنجاکه خواص حافظه‌داری و مکانیکی مواد حافظه‌دار به دماهای استحاله وابسته است لذا بررسی و تنظیم دماهای استحاله از اهمیت خاصی برخوردار است. در این پژوهش با استفاده از پودرهای عنصری نیکل و تیتانیم و به روش متالورژی پودر، NiTi متخلخل تولید شد. سپس اثر عملیات حرارتی پیرسازی بر دماهای استحاله آستنیتی و خواص حافظه‌داری بررسی شده است. بطورکلی رفتار استحاله‌ای آلیاژ مشابه نمونه‌های بالک است و با افزایش دما و زمان پیرسازی، دماهای استحاله افزایش می‌یابد. همچنین قطعات تهیه شده پس از عملیات پیرسازی خواص حافظه‌داری خوبی نشان می‌دهند و میزان ۲ درصد کرنش بازیابی شونده پس از عملیات پیرسازی اندازه‌گیری شده است.

**واژه‌های کلیدی:** ترکیب NiTi متخلخل، پیرسازی، دماهای استحاله، خواص حافظه‌داری

---

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد دانشگاه صنعتی شریف

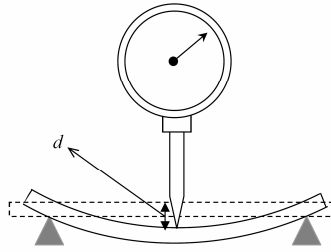
<sup>۲</sup> استاد دانشگاه صنعتی شریف و پژوهشگاه مواد و انرژی

## ۱- مقدمه

ترکیب بین فلزی NiTi جزء پرکاربردترین مواد حافظه‌دار است. این ماده حافظه‌داری فوق‌العاده‌ای نشان می‌دهد بطوریکه میزان کرنش بازیابی شونده در آن به ۸ درصد می‌رسد. علاوه بر حافظه‌داری، خواصی مانند سوپرالاستیسیته و خاصیت جذب انرژی باعث شده است که ترکیب NiTi به سرعت در بعد تجاری مورد استفاده قرار گیرد [1,2]. همچنین این ترکیب به خاطر سازگاری عالی با بدن، مقاومت به خستگی و خوردگی بالا به عنوان یکی از مهمترین مواد پزشکی در تولید ایمپلنت‌ها، پروتزها، تجهیزات و لوازم جانبی پزشکی مورد توجه است [3]. در مواد حافظه‌دار، رفتار حافظه‌داری و سوپرالاستیسیته در بازه‌های دمایی خاص دیده می‌شود که بستگی به دماهای دگرگونی  $M_s$ ،  $M_f$ ،  $A_s$  و  $A_f$  (بترتیب دماهای شروع و پایان استحاله‌ی مارتنزیتی و دمای شروع و پایان استحاله‌ی معکوس) دارد، بنابراین کنترل دماهای دگرگونی در کاربردهای عملی این پدیده‌ها، اهمیت حیاتی دارد. ساده‌ترین و مناسب‌ترین راه برای کنترل دماهای دگرگونی، انجام عملیات پیرسازی روی نمونه‌های NiTi است. در پروسه‌های عملیات حرارتی پارامترهایی نظیر نرخ سرد کردن، دما و زمان عملیات حرارتی، دماهای دگرگونی مارتنزیتی و دگرگونی معکوس را تغییر می‌دهند. در این پژوهش قطعات متخلخل NiTi به روش متالورژی پودر تهیه شده و اثر عملیات پیرسازی بر دماهای استحاله آستنیتی (معکوس) و رفتار حافظه‌داری آن بررسی شده است.

## ۲- آزمایشات

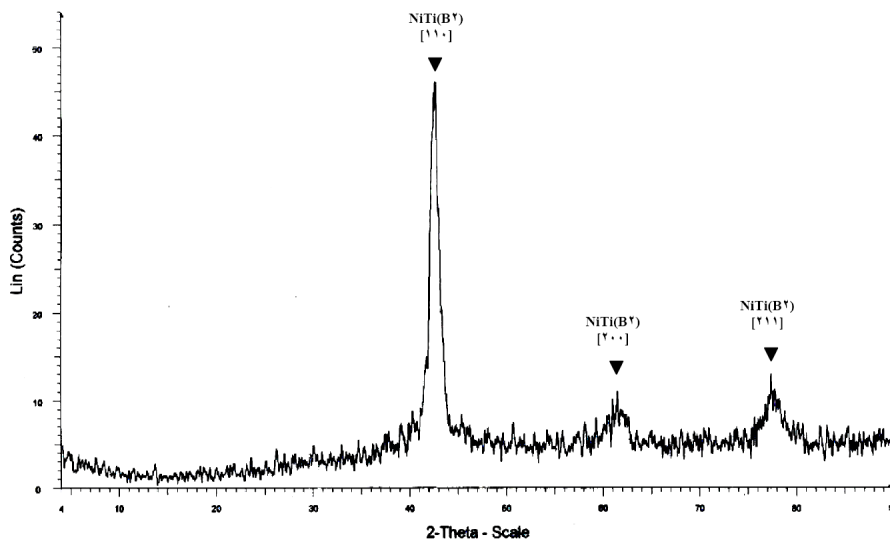
در این پژوهش، از پودر تیتانیم با خلوص ۹۹/۹۹ درصد با اندازه‌ی زیر ۵۰ میکرون (Jonhson Matthey) و پودر نیکل با خلوص بالای ۹۹/۵ و با اندازه‌ی زیر ۱۰ میکرون (Merck) استفاده شده است. پودرها با نسبت اتمی ۵۰-۵۰ با هم مخلوط شده و بوسیله‌ی یک پرس هیدرولیک تک محوره تحت فشار ۷۵۰ MPa فشرده شدند. نمونه‌های خام به شکل تسمه با ابعاد  $40 \times 6 \times 1/5 \text{ mm}^3$  تهیه شد. در ادامه قطعات بمدت دو ساعت در دمای  $1050^\circ \text{C}$  تحت خلاء تفجوشی شده و سپس در کوره سرد شدند. جهت ایجاد خواص حافظه‌داری و سوپرالاستیسیته‌ی مناسب، نمونه‌ها در دماهای ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تحت عملیات پیرسازی قرار گرفتند. این عملیات در کوره‌ی تونلی با اتمسفر آرگون انجام شد. نمونه‌ها پس از پیرسازی در هوا سرد شده‌اند. ساختار و فازهای ایجاد شده در نمونه توسط روش‌های SEM و XRD قبل و بعد از عملیات حرارتی بررسی گردیده است. برای اندازه‌گیری دمای استحاله تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت و بررسی خواص حافظه‌داری از روش دیلاتومتری استفاده شده است. برای این منظور یک سیستم ساده طراحی شده است بدین صورت که نمونه‌ها در حالت خمش سه نقطه با تنش حدود ۱۰۰ MPa در دمای صفر درجه تغییر فرم داده شدند (خم شدند). نمونه‌ها مانند شکل ۱ روی فیکسچر قرار گرفته و درون ظرف آب قرار داده شدند. با گرم کردن آب با گرمکن برقی، میزان بازیابی شکل به وسیله‌ی یک ساعت اندیکاتور با دقت میکرون در دماهای مختلف اندازه‌گیری شد.



شکل ۱ شماتیک سیستم اندازه گیری میزان بازایی شکل (دردمای  $T$  اولیه  $d$  -  $\Delta d$ )

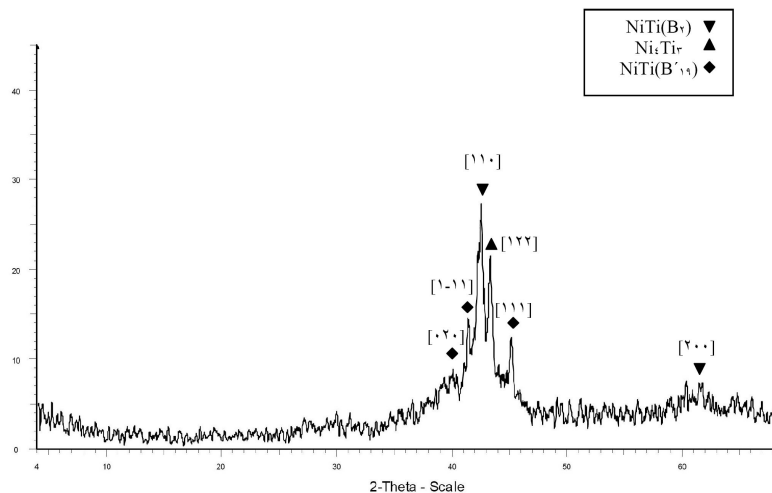
### ۳- نتایج و بحث

در شکل ۲ الگوی پراش اشعه‌ی X نمونه‌ها پس از عملیات تفجوشی آورده شده است. همانطور که مشخص است پیک‌های فاز NiTi با ساختار آستنیتی (B2) به طور واضح در دیاگرام مشاهده می‌شود. غیر از این پیک‌ها، پیک مشخص دیگری در الگوی پراش دیده نمی‌شود و سایر ترکیبات بین فلزی تشکیل نشده‌اند.



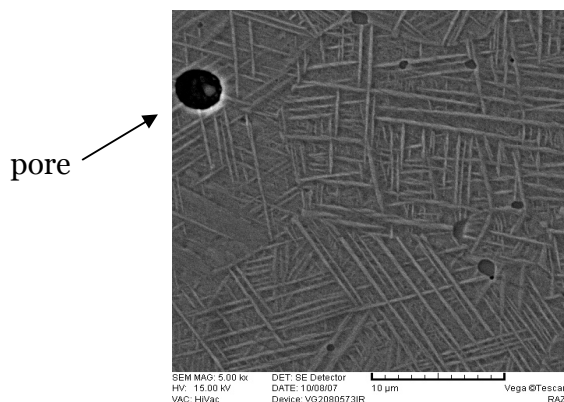
شکل ۲ الگوی پراش اشعه‌ی X برای نمونه‌ها پس از عملیات تفجوشی

با انجام پیرسازی ساختار نمونه‌ها دچار دگرگونی می‌شود. در شکل ۳ الگوی تفرق اشعه‌ی X برای نمونه‌ی پیرسازی شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  بمدت ۱ ساعت نشان داده شده است. همانطور که مشخص است پیک‌های فاز B2 کوتاه‌تر شده‌اند و پیک‌های فاز مارتنزیت با ساختار B19' در نمودار مشخص هستند همچنین در شکل ۳ پیک  $\text{Ni}_4\text{Ti}_3$  کاملاً مشاهده می‌شود. ایجاد فاز مارتنزیت در اثر انجام عملیات حرارتی، به ایجاد فاز  $\text{Ni}_4\text{Ti}_3$  و خارج شدن نیکل از حالت فوق اشباع در زمینه برمی‌گردد. در واقع با رسوب نمودن فاز  $\text{Ni}_4\text{Ti}_3$ ، درصد نیکل زمینه کاهش می‌یابد. این کاهش نیکل زمینه باعث افزایش دماهای استحاله و پایداری فاز مارتنزیت در دمای اتاق می‌شود.



شکل ۳ الگوی تفرق اشعه X نمونه پس از عملیات حرارتی در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  بمدت ۱ ساعت

برای بررسی دقیق‌تر فازهای تشکیل شده در قطعات، ساختار با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۴ مشخص است تمام ساختار در نمونه‌های پیرشده از تیغه‌های پرماند تشکیل یافته است. این تیغه‌ها در واقع سطوح stress-relief هستند که در اثر انجام استتاله مارتنزیت در ساختار ظاهر می‌شوند. تصاویر SEM ساختار تیغه‌ای را بخوبی نشان می‌دهد. البته رسوب کوهنت  $\text{Ni}_4\text{Ti}_3$  بدلیل کوچک بودن اندازه‌ی آن در ساختار قابل تشخیص نمی‌باشد.

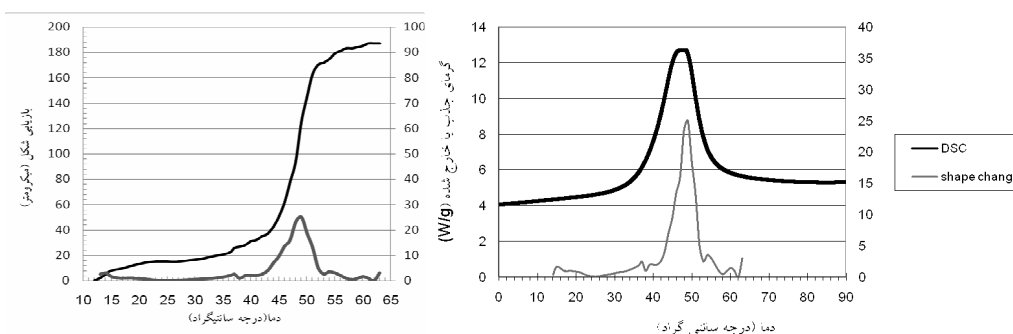


شکل ۴ تصویر SEM از نمونه  $50\% \text{Ni-Ti}$  پس از عملیات حرارتی در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  بمدت ۱ ساعت

### ۳-۱- بررسی دماهای استتاله

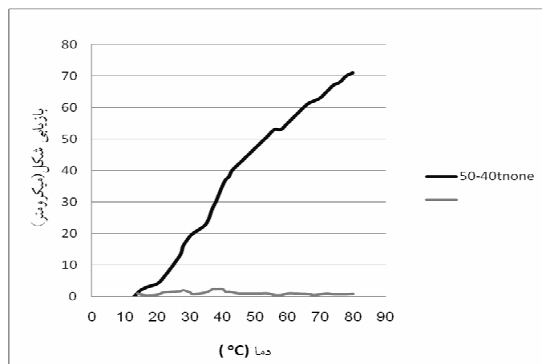
برای نمونه‌ی عملیات حرارتی شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  بمدت ۵ ساعت میزان بازیابی شکل برحسب دما و همچنین نمودار مشتق آن در شکل ۵-a آورده شده است. همانطور که مشخص است این نمودارها حالت S شکل دارند. در واقع آهنگ بازیابی شکل ابتدا آهسته بوده و با افزایش دما سرعت می‌گیرد. این فرآیند با رسیدن به یک میزان ماکزیمم دوباره کاهش می‌یابد. حالا چنانچه مشتق این نمودار رسم گردد منحنی پایینی شکل ۵-a

بدست می آید. این منحنی دارای یک پیک مشخص است. در شکل ۵-b این منحنی با نمودار بدست آمده از آزمایش DSC برای همین نمونه مقایسه شده است. همانطور که مشخص است ماکزیمم شیب نمودار بازیابی شکل با نقطه‌ی ماکزیمم و پیک در نمودار DSC مطابقت دارد. این ماکزیمم در دمای  $49^{\circ}\text{C}$  قرار دارد. این رفتار از آن جا ناشی می شود که منبع این دو پدیده یکسان است. در واقع با افزایش دما و رسیدن به دمای  $A_f$ ، استحاله تشکیل آستنیت شروع می شود و بطور همزمان سیستم گرما جذب نموده و بازیابی شکل صورت می گیرد. بنابراین برای سهولت در بررسی دماهای استحاله از نمودار بازیابی شکل بر حسب دما مشتق گرفته شده است. نقطه‌ی ابتدای پیک این نمودار  $A_s$ ، نقطه نهایی آن  $A_f$  و نقطه ماکزیمم در این نمودار  $A_p$  نامگذاری شده‌اند. در ادامه اثر پارامترهای مختلف بر تغییر دماهای استحاله آستنیتی به این روش بررسی شده است.



شکل ۵- a نمودار بازیابی شکل بر حسب دما و مشتق آن برای نمونه‌ی پیر شده در  $500^{\circ}\text{C}$  بمدت ۵ ساعت، ۵-b مقایسه‌ی منحنی مشتق نمودار بازیابی شکل و نمودار DSC

در شکل ۶ نمودار بازیابی شکل و مشتق آن برای نمونه‌ی  $50\text{at}\% \text{Ni-Ti}$  بلافاصله پس از عملیات تف-جوشی (بدون پیرسازی) آمده است. پیک مشخصی روی دیاگرام مشتق مشاهده نمی شود. نتیجه‌ی مشابهی نیز بوسیله آزمایش DSC بدست آمده است [4].

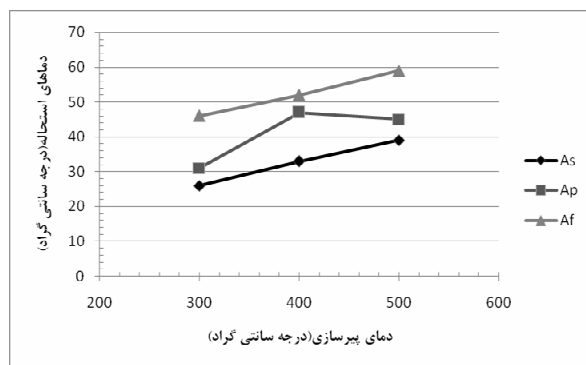


شکل ۶ نمودار بازیابی شکل بر حسب دما و مشتق آن برای نمونه‌ی  $50\text{at}\% \text{Ni-Ti}$  قبل از پیرسازی

عدم وجود پیک در نمودار را به پایین بودن دمای استحالتهی آستنیتی برای این نمونه می‌توان نسبت داد. این نتایج با نمودار بدست آمده توسط یوآن و همکارانش برای نمونه‌های تهیه شده به روش HIP مشابهت دارد [5,6]. با آنکه ترکیب پودرها ۵۰-۵۰ در نظر گرفته شده است، بدلیل وجود هیدروژن در ساختار پودر تیتانیم مصرفی، ترکیب ماغنی از نیکل است و نیکل اضافی به صورت فوق اشباع در ترکیب NiTi حل شده است. همچنین لایه‌ی اکسیدی نسبتاً ضخیم  $TiO_2$  روی نمونه‌ها دیده می‌شود. تشکیل این لایه‌ی ضخیم باعث کاهش تیتانیم و افزایش نیکل ساختار می‌شود. به همین دلیل دماهای استحاله بسیار پایین می‌آید. در شکل ۲ نیز مشخص است که نمونه پس از تف‌جوشی کاملاً آستنیتی است. با انجام عملیات حرارتی پیرسازی پیک روی نمودارها ظاهر می‌شود. در ادامه اثر دما و زمان این عملیات حرارتی بر دماهای استحاله بررسی شده است.

### ۳-۱-۱- اثر دمای پیرسازی

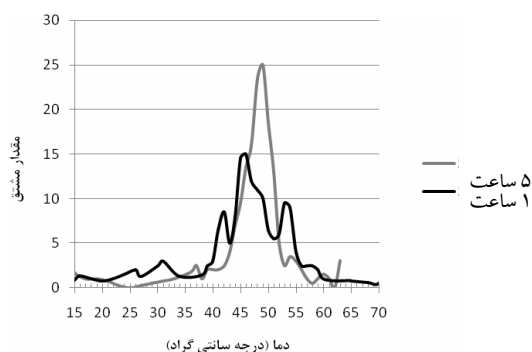
در شکل ۷ تغییرات دماهای استحالتهی آستنیتی برحسب دمای پیرسازی رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای پیرسازی تا  $500^{\circ}C$  دماهای استحاله افزایش می‌یابد. دمای  $A_s$  از ۲۶ به ۳۹ درجه سانتیگراد و دمای  $A_f$  از ۴۶ به ۵۹ درجه سانتیگراد رسیده است. پس میزان افزایش دما بر اثر پیرسازی برای آغاز و پایان استحاله یکسان بوده و به ازای هر ۱۰۰ درجه افزایش در دمای پیرسازی ۶/۵ درجه سانتیگراد دماهای استحاله افزایش می‌یابد. نکته‌ی جالب اینجاست که با افزایش دمای پیرسازی تغییری در بازه‌ی دمایی بین  $A_s$  و  $A_f$  یعنی محدوده‌ی بازیابی کرنش بوجود نیامده و مقدار آن ثابت است. در واقع با انجام عملیات حرارتی فازهای غنی از نیکل مخصوصاً  $Ni_4Ti_3$  در شبکه رسوب می‌کند. در نمودار XRD در شکل ۳ پیک‌های فاز  $Ni_4Ti_3$  کاملاً مشخص هستند. با رسوب این فاز، نیکل زمینه کاهش یافته و دماهای استحاله افزایش می‌یابند. با افزایش دمای پیرسازی، میزان تشکیل رسوبات افزایش می‌یابد. این امر باعث کاهش بیشتر نیکل زمینه و افزایش دماهای استحاله می‌گردد. این مطلب با نتایج بدست آمده در تحقیقات گذشته برای نمونه‌های تهیه شده به روش SHS و روش‌های ذوبی مطابقت دارد [7,8].



شکل ۷ اثر دمای پیرسازی بر دماهای استحاله معکوس (مارتنزیت به آستنیت)

### ۳-۱-۲- اثر زمان پیرسازی

در شکل ۸ همانطور که مشخص است با افزایش زمان پیرسازی، دماهای استحاله و ماکزیمم نمودارها افزایش یافته است. با افزایش زمان پیرسازی اندازه‌ی رسوبات  $Ni_4Ti_3$  افزایش یافته و میزان نیکل زمینه کاهش بیشتری می‌یابد و در نتیجه دماهای استحاله بالاتر می‌روند. بنابراین استحاله‌های رسوب‌دهی، برای افزایش دماهای استحاله، افزایش دمای پیرسازی موثرتر از افزایش زمان است.



شکل ۸ اثر زمان پیرسازی بر دماهای استحاله نمونه‌ی پیرشده در  $500^{\circ}C$

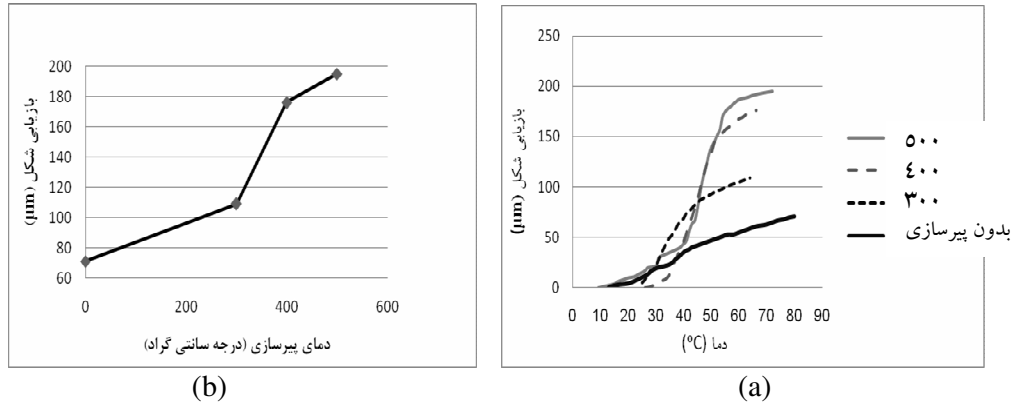
### ۳-۲- بررسی رفتار حافظه‌داری

در شکل ۹-a اثر عملیات حرارتی بر میزان بازیابی شکل آورده شده است. همانطور که از نمودار مشخص است، نمونه‌ای که پس از پیرسازی عملیات حرارتی نشده است، خواص حافظه‌داری و بازیابی کرنش ناچیزی از خود نشان می‌دهد. با انجام عملیات حرارتی پیرسازی در نمونه این رفتار تقویت می‌شود. با عملیات پیرسازی در  $300^{\circ}C$  هنوز میزان بازیابی پایین است اما با افزایش دما در  $400^{\circ}C$  و بخصوص  $500^{\circ}C$  رفتار حافظه‌داری کامل مشاهده می‌شود و میزان بازیابی کرنش به مقدار محسوسی افزایش یافته و تقریباً دو برابر می‌گردد.

رفتار حافظه‌داری ناشی از تغییر در آرایش مرزهای دوقلوبی در مارتنزیت است. در واقع تغییر فرم در نمونه‌ها در اثر آرایش مجدد (rearrangement) دوقلوبی‌ها و رشد و انقباض گونه‌ها (variants) صورت می‌گیرد. در اثر افزایش دما و با حرکت مرزهای دوقلوبی و برگشت به حالت سابق، بازیابی کرنش انجام می‌شود. در تحقیقات پیشین نشان داده شده است که با افزایش دمای عملیات پیرسازی، تنش بحرانی جهت باز شدن<sup>۱</sup> دوقلوبی‌ها کاهش یافته و کرنش بازیابی شونده افزایش می‌یابد [10,11]. می‌دانیم میزان تنش لازم جهت تغییر فرم ساختار مارتنزیتی با نزدیک شدن به دمای  $M_s$ ، کاهش می‌یابد [4]، پس با افزایش دمای پیرسازی، چون دماهای استحاله افزایش یافته و دمای استحاله  $M_s$  در نمونه‌ها به دمای تغییر فرم - صفر درجه سانتیگراد - نزدیک‌تر می‌شود و تغییر فرم نمونه‌ها راحت‌تر صورت می‌گیرد. این امر می‌تواند دلیلی بر افزایش میزان کرنش

<sup>1</sup>Detwining

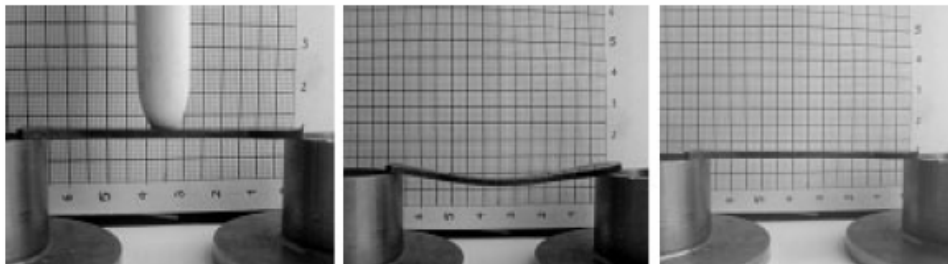
بازگشت پذیر در نمونه‌های تغییر فرم یافته در تنش ثابت باشد. در شکل ۹- b میزان بازیابی شکل بر حسب دمای پیرسازی به صورت آماری آورده شده است.



شکل ۹- a نمودار های بازیابی شکل برای نمونه های پیرسازی شده در دماهای مختلف  
 ۹- b اثر دمای عملیات حرارتی بر میزان بازیابی شکل در ترکیب NiTi

همانطور که قبلاً ذکر شد بازه‌ی دمای بازیابی شکل در دماهای مختلف پیرسازی ثابت است. پس با افزایش میزان بازیابی شکل، آهنگ بازیابی بیشتر می‌شود. این پدیده از نظر کاربردی بسیار مهم و تاثیرگذار است و باعث افزایش کارایی قطعات حافظه‌دار می‌شود.

در شکل ۱۰ تصاویر بازیابی شکل برای نمونه‌ی پیر شده در دمای ۵۰۰ °C بمدت ۱ ساعت نشان داده شده است. تصویر نشان می‌دهد نمونه در اثر فشار سنبه در دمای پایین - صفر درجه - خم شده و مجدداً با افزایش دما تا بالای دمای پایان استحاله‌ی آستنیتی (A<sub>f</sub>)، نمونه بطور کامل شکل اولیه‌ی خود را بدست می‌آورد. براساس محاسبات ریاضی با استفاده از معادلات مقاومت مصالح و معادلات هندسی بیشترین میزان کرنش بازیابی شده متعلق به این نمونه است که نزدیک به ۲ درصد می‌باشد.



شکل ۱۰ بررسی رفتار حافظه داری در نمونه‌های NiTi با استفاده از تست خمش سه نقطه (a) قبل از بارگذاری (b) پس از اعمال نیرو (c) گرم کردن تا دمای ۶۰°C



#### ۴- نتیجه گیری و جمع بندی

نتایج نشان می‌دهد با انجام عملیات حرارتی روی قطعات تفجوشی شده خواص حافظه‌داری قطعات تقویت می‌شود و در بهترین حالت میزان کرنش قابل بازیابی با دما به ۲ درصد می‌رسد. همچنین مشابه نمونه‌های بالک تولید شده به روش ذوبی، با افزایش دما و زمان پیرسازی، دماهای استحاله آستنیتی افزایش می‌یابد.

#### تشکر و قدردانی

در پایان لازم است از زحمات آقایان مهندس عزیزی و سلیمانی در پژوهشگاه مواد و انرژی و همچنین آقای احمدیان از دانشگاه صنعتی شریف که در انجام آزمایشات و ساخت تجهیزات ما را یاری نمودند، کمال سپاسگذاری را داشته باشیم.

#### مراجع

- [1] Wolfgang Predki, Adam Knopik and Bjorn Bauer, "Engineering applications of NiTi shape memory alloys", Materials Science and Engineering A, xxx (2007) xxx-xxx.
- [2] M. Barrabés, P. Sevilla, J.A. Planell and F.J. Gil, "Mechanical properties of nickel-titanium foams for reconstructive orthopaedics", Materials Science and Engineering C, xx (2007) xxx-xxx.
- [3] T. Duerig, A. Pelton, and D. Stockel, "An overview of Nitinol medical applications", Materials Science and Engineering: A, vol. 273-275, pp. 149-160, 1999.
- [۴] سید علیرضا حسینی، "بررسی سوپرالاستیسیته و ترموالاستیسیته در آلیاژهای حافظه‌دار NiTi ساخته شده به روش متالورژی پودر"، پایان نامه ی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف.
- [5] B Yuan, C Y Chung, X P Zhang, MQZeng and M Zhu, "Control of porosity and superelasticity of porous NiTi shape memory alloys prepared by hot isostatic pressing", Smart Mater. Struct, vol. 14, pp. S201-S206, 2005.
- [6] B. Yuan, C.Y. Chung, M. Zhu, "Microstructure and martensitic transformation behavior of porous NiTi shape memory alloy prepared by hot isostatic pressing processing", Materials Science and Engineering A, vol. 382, pp.181-187, 2004.
- [7] F.M.H. Zarandi and K. Sadrnezhad, "Thermomechanical Study of Combustion Synthesized Ti-Ni Shape Memory Alloy", Materials and Manufacturing Processes, vol. 12, pp.1093-1105, 1997.
- [8] K. Sadrnezhad, 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, pp.107-115, 1997.
- [9] Christian Greiner, Scott M. Oppenheimer, David C. Dunand, "High strength, low stiffness, porous NiTi with superelastic properties", Acta Biomaterialia, vol.1, pp. 705-716, 2005.
- [10] David A. Miller and Dimitris C. Lagoudas, "Influence of cold work and heat treatment on the shape memory effect and plastic strain development of NiTi", Materials Science and Engineering A, vol.308, pp.161-175, 2001.
- [11] Sia Nemat-Nasser and Wei-Guo Guo, "Superelastic and cyclic response of NiTi SMA at various strain rates and temperatures", Mechanics of Materials, vol. 38, pp.463-474, 2006.

## Phase Transformation Behavior of Porous NiTi Fabricated by Powder Metallurgy Method

S. A. Hoseini<sup>1,\*</sup>, S. Kh. Sadrnezhad<sup>2</sup>

*Materials and Energy Research Center*

*\*[arh293@gmail.com](mailto:arh293@gmail.com)*

### Abstract

NiTi alloy combines the characteristics of shape memory effect and superelasticity with excellent corrosion resistance, wear resistance, mechanical properties and good biocompatibility. Recently, porous NiTi shape memory alloy (SMA) with the cellular structure has been acknowledged as a promising biomaterial for use as artificial bones or teeth roots. Superelasticity and thermoelasticity of NiTi strongly depend on Phase transformation temperatures. In this work, porous NiTi-SMAs have been successfully prepared by powder metallurgy method from elemental Ni and Ti powders. Then, samples were subject to aging treatment at various temperatures. Results show, similar to bulk alloys, by increase of aging temperature and time, phase transformation temperatures are increased. Also, the samples exhibit good shape memory effect at room temperature and capability of 2% strain recovery in room temperature.

**Key words:** NiTi Porous, Phase transformation temperature, Aging, Shape memory effect

---

<sup>1</sup> M.S. student of Sharif University of Technology

<sup>2</sup> Professor of Sharif University of Technology & Materials and Energy Research Center