تأثیر عملیات پیرسازی بر رفتار کششی و سوپرالاستیسیته آلیاژ غنی از نیکل NiTi با ۵۰/۹ درصد اتمی نیکل

رضا حداد بدر و جعفر خلیل علافی*

دانشگاه صنعتی سهند، دانشکدهٔ مهندسی مواد

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۷/۵/۱۳، **تاریخ دریافت نسخهٔ اصلاح‌شده**: ۱۳۸۷/۹/۱۷، **تاریخ پذیرش قطعی**: ۱۳۸۷/۱۰/۵

چکیده در این تحقیق تأثیر پارامترهای مختلف عملیات پیرسازی بر رفتار سوپرالاستیک آلیاژ کارسردشدهٔ نیکل-تیتانیم غنی از نیکل مطالعه شده است. نمونه‌ها در دماهای ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰°C در زمان‌های ۱۰، ۳۰ و ۱۲۰ دقیقه تحت عملیات پیرسختی قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌های کشش نشان می‌دهد که نمونه‌ها رفتار سوپرالاستیسیتهٔ کمی ازخود نشان می‌دهند؛ اما با انجام عملیات پیرسختی، رفتار سوپرالاستیسیته در نمونه‌ها بهبود چشمگیری می‌یابد. بررسی منحنی‌های تنش کرنش نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد که در زمان‌های کوتاه و دماهای پیرسازی پایین، رفتار سوپرالاستیسیتهٔ کاملی در نمونه‌ها مشاهده می‌شود. اما در زمان‌های طولانی در دماهای پیرسازی بالا، (زمان ۱۲۰ دقیقه در محدوده دمایی ۴۵۰°C-۶۰۰)، مقدار کرنش برگشت ناپذیری رفته‌رفته افزایش می‌یابد و به عدم ظهور سوپرالاستیسیتهٔ کامل منجر می‌شود. همچنین در تمامی نمونه‌ها، تنش‌های پلاتوی بالایی و پایینی به‌آرامی با افزایش دما و زمان عملیات پیرسازی، کاهش می‌یابد. بررسی منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌ها تا نقطهٔ شکست نیز نشان می‌دهد که استحکام شکست نمونه‌ها تا دمای ۴۰۰ °C افزایش جزئی نشان می‌دهد و سپس با افزایش دمای پیرسازی کاهش می‌یابد. انعطاف‌پذیری نمونه‌ها نیز بعداز تغییرات جزئی در دماهای پیرسازی پایین، با عبور از محدودهٔ دمایی ۴۵۰°C-۵۰۰ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دمای پیرسازی مقدار کرنش پلاتو به‌صورت پیوسته افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی سوپرالاستیسیته، عملیات پیرسازی، آزمایشات کشش، کرنش باقی‌مانده، تنش پلاتو.

Effect of Aging Treatment on Tensile and Superelastic Behavior in Ni-Rich NiTi Alloy (50.9 Atom%Ni)

R. Haddad Badr and J. Khalil Allafi*

Department of Materials Engineering, Sahand University of Technology

Abstract In this investigation, the effect of various parameters of aging treatment on the superelastic behavior of $Ni_{50.9}Ti_{49.1}$ wires was studied. The samples were aged at 300, 350, 400, 450, 500, 550 and 600˚C for 10, 30 and 120 minutes. Tensile tests were performed for all samples. Results of the tensile tests for as-received sample show a low superelastic effect. It means that there are remained strains in as receive sample after loading and unloading cycle. The aging treatments with short and intermediate aging times result in increasing the superelastic property, while there are considerably remained strains in samples, aged at 450, 500, 550 and 600˚C for long aging time (120 minutes). Moreover the results indicate that, both upper and lower plateau stress are decreased with increasing the time and temperature of aging. The results of tensile experiments up to fracture for aged samples at different temperatures for 30 minutes show that with increasing the aging temperature up to 400˚C, the magnitude of fracture stress increases slowly. With increasing the aging temperature more than 400˚C, the fracture stress decreases. As the aging temperature increase, the strain content of plateau increase. Therefore, we can conclude that combined use of work-hardening and age-hardening is more effective to increase the critical stress for slip and consequently to improve superelasticity

Keywords Superelasticity, Aging Treatments, Tensile Tests, Remained Strain, Plateau Stress.

***عهده‌دار مکاتبات**

نشانی: تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته و فرآوری مواد معدنی.

تلفن: ۰۴۱۲-۳۴۵۹۴۵۴، **دورنگار**: ۰۴۱۲-۳۴۴۴۳۳۳، **پیام‌نگار**: allafi@sut.ac.ir

۱_ مقدمه

اصطلاح حافظه داری به خاصیتی اطلاق می شود که دراثر آن، ماده پس از تغییرشکل های زیاد قابلیت برگشتن بـه شـکل قبلی خود را داشته باشد. دراین‌حالت امکان برگشتن نمونـه بـه شکل اصلی خود، در اثر تغییرات دمایی فراهم می شـود. آلیـاژی با خاصـیت حافظـه‌داری، در محـدودهٔ دمـایی خـاص ویژگـی دیگری بـه‌نـام سوپرالاستیسـیته نیـز از خـود نشـان مـی دهـد. سوپرالاستیسیته خاصیتی از ماده است که با حذف تـنش، مـاده توانایی بازیابی کرنش پدید آمـده دراثـر اعمـال تـنش را دارد. برخلاف اثر حافظه داری، رفتار سوپرالاستیسیته فرآیندی کـاملاً ایزوترم است و نیازی به تغییرات دمایی نیسـت. درواقـع دلیـل خواص حافظه‌داری و سوپرالاستیسیته، وقوع استحالهٔ مارتنزیتی ترموالاستیک در آلیاژهای حافظه دار است. در آلیاژهای NiTi دراثر استحالهٔ مارتنزیتی، فاز دمـابـالای آسـتنیت بـا سـاختار کریستالی B2، درحین سردکردن به فاز دماپایین مارتنزیت با ساختار کریستالی مونوکلینیک B19 تبدیل می‌شـود. درحـین گرم کردن نیز استحالهٔ معکوس از مارتنزیت بـه آسـتنیت رخ می دهد. به مارتنزیتی که دراثر تغییرات دمایی پدید مـی آیـد مارتنزیت حرارتی گفته می شـود [۲،۱]. در فرآینـد ایزوتـرم سوپرالاستیسیته، برخلاف فرآیند اثر حافظه‌داری، استحالهٔ مـارتنزیتی دراثر اعمال تنش روی می‌دهد. مارتنزیت تشکیل‌شده دراین‌حالـت، مارتنزیت حاصل‌از تنش (Stress Induced Martensite, SIM) نـام دارد. تبدیل آستنیت به مارتنزیت دراثر اعمـال تـنش، در تـنش ثابتی اتفاق می‌افتد و بـه تشـکیل پلاتـو (Plateau) در منحنـی تنش-کرنش منجر می‌شود. قسمت پلاتو نتیجه‌ای از توانایی فاز مارتنزیت بـرای تشـکیل واریانـت هـا درطـی اسـتحاله اسـت. واریانت فعال‌شدهٔ مارتنزیتی که دراثر تنش پدید آمده، واریانتی است که می‌تواند بیشترین کرنش را در شـرایط تـنش اعمـالی تحمل کند [۳،۴]. درصورت حذف تنش اعمالی، این مارتنزیت ناپایدار شده و به آستنیت تبدیل می شود. دراثر این عمل نمونه به شکل اولیهٔ خود بازمی‌گردد. معمـولاً سوپرالاستیسـیتهٔ کامـل زمانی روی می‌دهد که دمای نمونه در محـدودهٔ دمـایی $A_f<T<M_d$ (A_f دمای اتمام تشکیل آستنیت) باشـد. اگـر دمـا بـیش از M_d باشد، تنش موردنیاز برای تشکیل مارتنزیت بیش‌از تنش مـورد نیاز برای ورود لغزش در فاز آستنیت می شود و اسـتحالهٔ SIM اتفاق نمی‌افتد [۳،۵]. بـرای حصـول سوپرالاستیسـیته، افـزایش تنش بحرانی لغزش بسیار مهـم اسـت. بـرای دسـت‌یـافتن بـه آلیاژی با تنش بحرانی لغزش بالا در متـالورژی فیزیکـی چهـار روش وجود دارد: (۱) کارسختی، (۲) پیرسـختی، (۳) اصـلاح دانه‌بندی و (۴) سخت‌کردن با عناصر آلیاژی [۶]. دراثر عملیات پیرسـختی در آلیاژهـای NiTi غنـی از Ni، رسـوبات شـبه‌پایـدار Ni_4Ti_3 تشکیل می‌شوند. این رسوبات ریز و کوهیرنـت باعـث افزایش استحکام زمینه می‌شوند و خـواص سوپرالاستیسـیته را بهبود می‌بخشند [۱]. در این تحقیق تـأثیـر تـوأم دو روش اول، یعنی عملیات کارسختی و پیرسختی بر رفتـار سوپرالاستیسـیته آلیاژ NiTi بررسی شده است.

۲_ نحوهٔ انجام آزمایش

در این آزمایش، رفتار سوپرالاستیک سیم‌هایی از جنس آلیاژ نیکل-تیتانیم با ترکیب ۵۰/۹at.% Ni و با قطر ۰/۳۵mm مطالعه شده است. سیم های مورد استفاده محصول شرکت Memry (USA) است.

عملیات پیرسازی روی سیم‌ها در دماهای ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۰، ۵۵۰، ۶۰۰°C در مدت زمان های ۱۰، ۳۰، ۱۲۰ دقیقه انجام گرفت. تمامی نمونه‌ها بعد از عملیات پیرسازی درآب ۲۵°C کوئنچ شدند. به منظور بررسی رفتارهای استحاله و اندازه‌گیری دماهای استحاله، آزمون آنالیز حرارتی DSC (Differential Scanning Calorimetry) انجام گرفت. جهت آزمون DSC از دستگاه Netzsch مدل DSC200F3

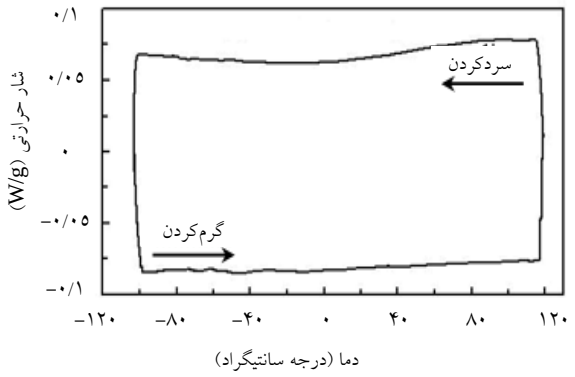
استفاده شد. محدودهٔ درجه حرارت اندازه‌گیری شده از ۱۰۰ـ تا ۱۰۰°C و نرخ سرمایش و گرمایش ۱۰°C/min انتخاب شد. برای مطالعهٔ رفتار سوپرالاستیسیتهٔ نمونه‌ها، آزمایش‌های کشش در دمای محیط (۲۷°C) و تا کرنش اعمالی ۷٪ انجام گرفت. آزمایش‌های کشش با دستگاه Zwick/Roell مدل FR010 انجام شد. فاصله دوفک ۷۰ mm و برای کاهش تأثیر خودگرم‌شدن نمونه‌ها، سرعت حرکت فک ۰/۲mm/min انتخاب شد. همچنین برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها، تمامی نمونه‌ها تا نقطهٔ شکست تحت کشش قرار گرفتند. دراین‌حالت شرایط انجام آزمایش کشش مشابه حالت بررسی رفتار سوپرالاستیسیته است.

۳ـ نتایج و بحث

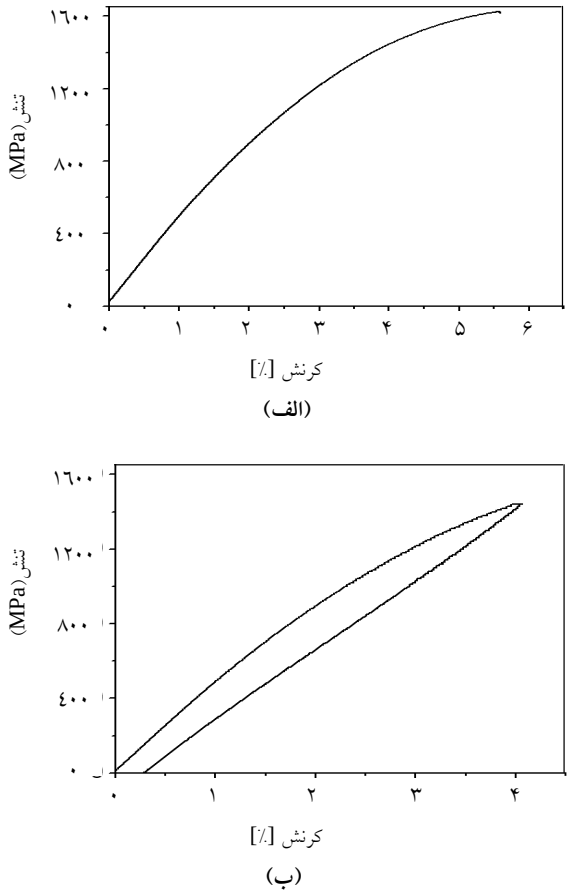
در شکل ۱ منحنی DSC نمونهٔ دریافتی (as-received) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که پیکی در نمودار DSC آن دیده نمی‌شود. این مسئله را می‌توان به دانسیتهٔ بالای نابجایی‌ها که در مراحل تهیهٔ سیم‌ها پدید آمده است نسبت داد. شکل ۲(الف) منحنی تنش‌ـکرنش نمونه دریافتی را تا نقطه شکست نشان می‌دهد. رفتار کششی این نمونه مشابه رفتار فلزات معمولی بوده و آلیاژ بعداز مرحلهٔ الاستیک، وارد مرحلهٔ پلاستیک می شود و شکست نمونه اتفاق می‌افتد. استحکام شکست برای نمونهٔ دریافتی حدود ۱۶۰۰MPa و کرنش شکست حدود ۵/۵٪ است. به‌همین سبب برای بررسی رفتار سوپرالاستیسیته، این نمونه تا کرنش ۴٪ تحت آزمایش کشش قرار گرفت (شکل ۲(ب)). بر اساس نتایج کرنش برگشت‌پذیر نمونه حدود ۳/۶٪ و کرنش باقی‌مانده حدود ۰/۴٪ است.

۳ـ۱ـ تأثیر عملیات پیرسختی بر رفتار استحاله

شکل۳ منحنی های DSC نمونه های پیرسخت شده در



شکل ۱. منحنی DSC نمونهٔ دریافتی.



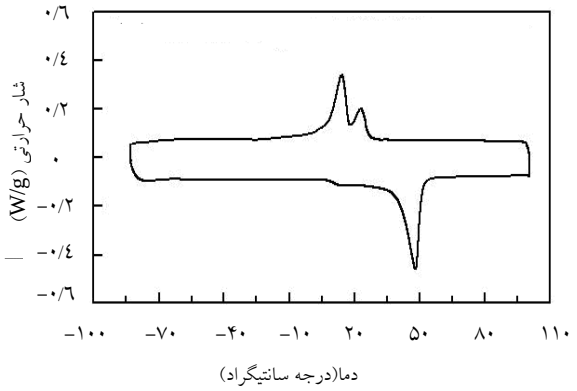
شکل ۲. منحنی تنش‌ـکرنش نمونهٔ دریافتی، (الف) تا نقطهٔ شکست و (ب) تا کرنش۴٪.

دمای ۵۵۰°C و زمان‌های ۳۰ و ۱۲۰ دقیقه را نشان می‌دهد. در منحنی‌های DSC نمونه‌ها، دو پیک در مرحلهٔ سرمایش و یک پیک در مرحلهٔ گرمایش ظاهر شده است. به‌عبارت‌دیگر تبدیل آستنیت به مارتنزیت، طی دو مرحله اتفاق می‌افتد. در آلیاژهای NiTi در حضور رسوبات یا نابجایی‌ها، قبل‌از تشکیل مارتنزیت B19' فاز دیگری با عنوان فاز R در ساختار تشکیل می‌شود. این فاز به دو مرحله‌ای شدن استحاله منجر می‌شود [۱]. لذا می‌توان گفت در منحنی‌ها، پیک اول مربوط‌به استحالهٔ فازی آستنیت به فاز R و پیک دوم مربوط به تشکیل فاز مارتنزیت B19' است. نکتهٔ‌جالب دیگر افزایش‌دمای‌استحاله‌های فازی با افزایش دما است (جدول ۱). دلیل این رفتاررا می‌توان به تشکیل رسوبات غنی از Ni در ساختار و کاهش مقدار Ni زمینه نسبت داد. آلیاژهای NiTi به مقدار نیکل زمینه بسیار حساس اند و با کاهش درصد Ni، دماهای تغییرحالت افزایش می‌یابد [۱،۶].

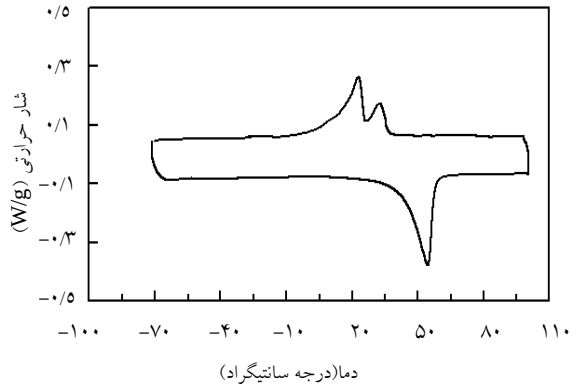
۳ـ۲ـ تأثیر عملیات پیرسختی بر رفتار سوپرالاستیسیته

شکل ۴ تأثیر شرایط مختلف عملیات پیرسازی بر رفتار کششی و سوپرالاستیسیتهٔ نمونه‌ها را، تا کرنش اعمالی ۷٪ نشان می‌دهد. رفتار غیرخطی سیم‌های نایتینول بعداز عملیات پیرسازی در تمامی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. بعداز عملیات پیرسازی، به جز در نمونه‌های پیرسخت شده در دماهای پیرسازی ۴۵۰، ۵۰۰، ۵۵۰ ، ۶۰۰°C و زمان ۱۲۰ دقیقه، تقریباً در تمامی نمونه‌ها، رفتار سوپرالاستیستهٔ خوبی به دست می‌آید.

درشکل ۵ مقدار کرنش باقی‌مانده در هر نمونه برحسب زمان‌ودمای‌عملیات‌پیرسازی‌رسم‌شده‌است. در دماهای پیرسازی ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰°C در هر سه زمان ۱۰، ۳۰، ۱۲۰ دقیقه مقدار دقیقه مقدار کرنش باقی مانده ناچیز و تقریباً نزدیک به صفر است. با افزایش دمای پیرسازی در محدودهٔ دمایی ۴۵۰ تا ۶۰۰ °C این روند همچنان در زمان‌های اولیهٔ پیرسازی (۱۰ و ۳۰ دقیقه) مشاهده می‌شود اما با افزایش زمان پیرسازی به ۱۲۰ دقیقه، در



(الف)

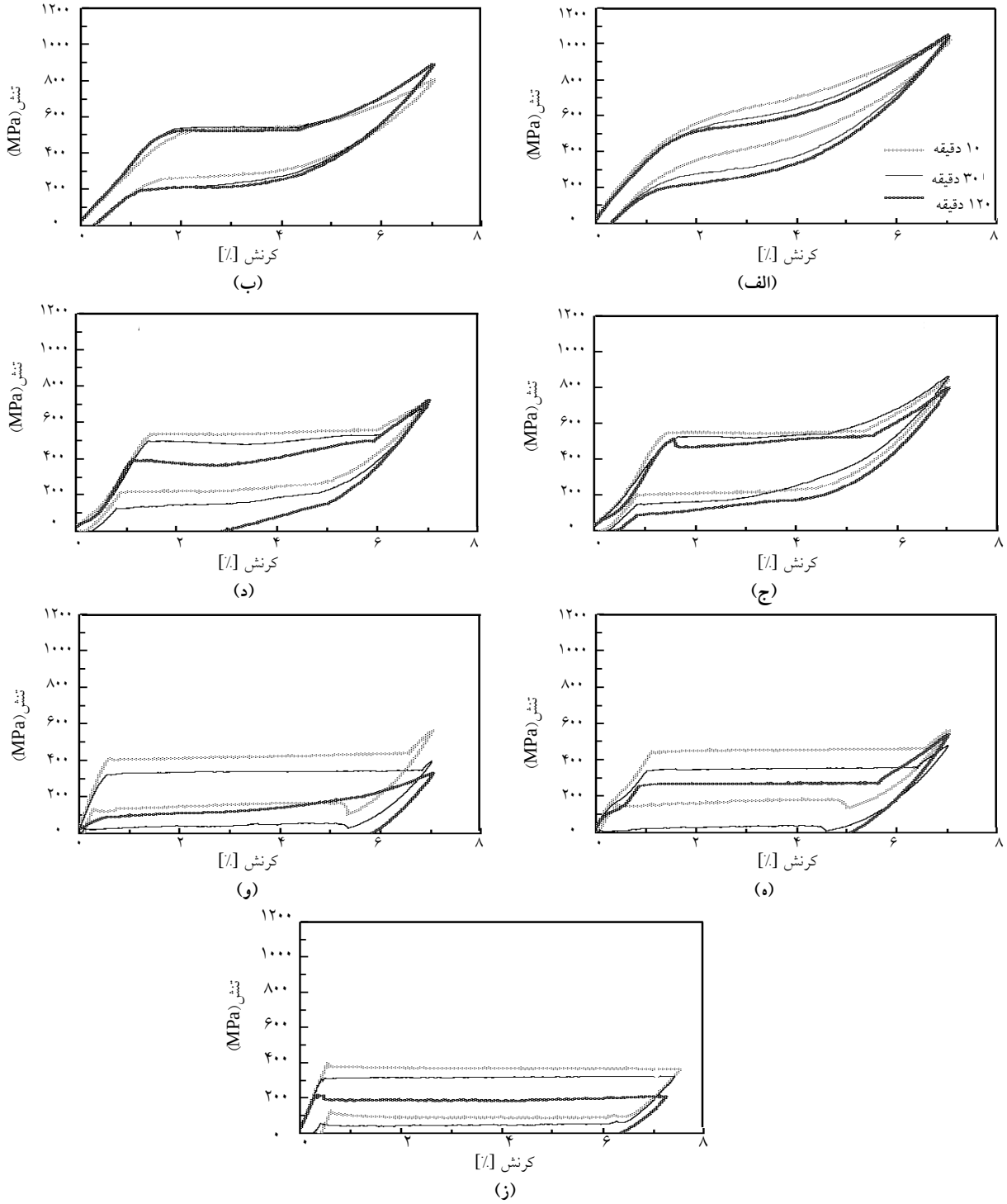


(ب)

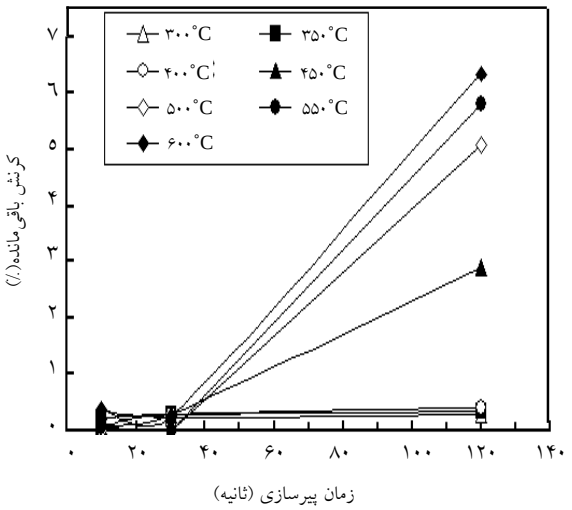
شکل ۳. منحنی DSC نمونه‌های پیرسخت‌شده در دمای ۵۵۰°C و زمان (الف) ۳۰ و (ب) ۱۲۰ دقیقه.

جدول ۱. دماهای استحاله در نمونه‌های پیرسخت‌شده در دمای ۵۵۰°C و زمان ۳۰ و ۱۲۰ دقیقه.

پیرسازی	R_S(°C)	A_S(°C)	A_f(°C)	R_S(°C)
۳۰ دقیقه	۲۸	۳۱	۵۴	۲۸
۱۲۰ دقیقه	۳۶	۳۵	۶۰	۳۶



شکل۴. منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های پیرسخت شده در دماهای (الف)۳۰۰، (ب)۳۵۰، (ج)۴۰۰، (د)۴۵۰، (ه)۵۰۰، (و)۵۵۰ و (ز)$600^{\circ}C$ و زمان‌های ۱۰، ۳۰ ، ۱۲۰ دقیقه.



شکل۵. حوزهٔ محاسباتی میدان جریان در اطراف تک سیلندر استوانه‌ای و صفحهٔ منحرف‌کننده.

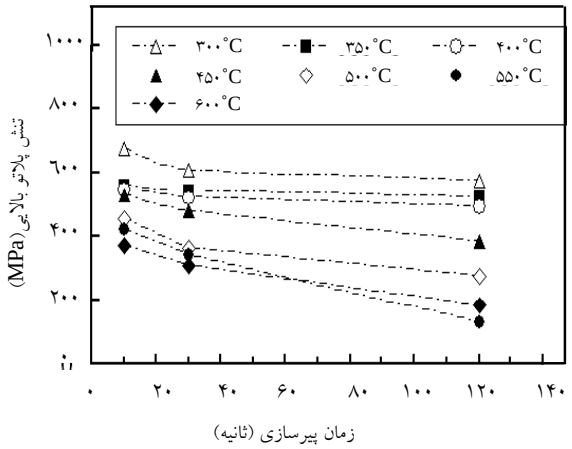
این محدودهٔ دمایی، کرنش غیرقابل برگشت ناپذیر رفته رفته افزایش می‌یابد و به مقدار چشمگیری می‌رسد.

همان طور که گفته شد دلیل خواص حافظه‌داری و سوپرالاستیسیته در آلیاژهای NiTi، وقوع استحالهٔ مارتنزیتی ترموالاستیک است. در استحاله‌های مارتنزیتی، برای کاهش مقدار کرنش شبکه‌ای ناشی‌از تنش‌های باینی، یک مرحله فرآیند خودانطباقی صورت می‌گیرد، (Self-Accommodation Process). به طور کلی دو مکانیزم برای انجام فرآیند خود انطباقی وجود دارد: ۱ـ دوقلویی، ۲ـ لغزش. فرآیند خود انطباقی انجام‌شده با مکانیزم دوقلویی، فرآیندی برگشت‌پذیر است. در حالی که در صورت انجام خود انطباقی با مکانیزم لغزش، این فرآیند برگشت ناپذیر خواهد بود. برای ظهور اثر حافظه‌داری و سوپر الاستیسیته، فرآیند خود انطباقی باید با مکانیزم دوقلویی انجام پذیرد؛ در غیر این صورت کرنش اعمال شده بازیابی نخواهد شد. با توجه به این مطالب می‌توان رفتار تغییرشکل مشاهده‌شده در نمونه‌های مختلف را بررسی کرد. باتوجه‌به اینکه نمونه‌های دریافتی دانسیتهٔ بالایی از نابجایی‌ها دارند، می‌توان گفت با انجام عملیات پیرسازی در دماهای پایین یا زمان‌های کوتاه، فرآیند بازیابی در نمونه‌های کارسرد شده آغاز می‌شود [۷،۸].

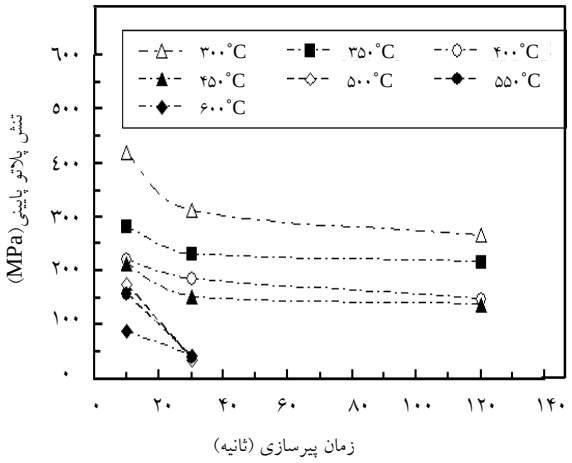
درکنار آزادسازی تنش‌های حاصل از کارسرد، سلول‌هایی از نابجایی‌های موجود تشکیل می‌شود. این سلول‌ها به همراه رسوبات کوهیرنت، Ni_4Ti_3، تشکیل شده در حین عملیات پیرسازی، تنش بحرانی لغزش در آلیاژ را می‌افزایند. این موضوع منجر به فعالیت جهت مرجح دوقلویی در استحالهٔ مارتنزیتی SIM به منزلهٔ تنها مکانیزم تغییرشکل در آلیاژ می‌شود. لذا در مرحلهٔ باربرداری کرنش اعمالی تقریباً به طور کامل بازیابی می‌شود. با افزایش دما و زمان پیرسازی مرحلهٔ تبلور مجدد آغاز می‌شود و ساختارهای نابجایی رفته‌رفته ازبین می‌روند. همچنین درکنار انجام مرحلهٔ تبلور مجدد، با افزایش دما و زمان پیرسازی، اندازهٔ رسوبات تشکیل‌شده نیز بزرگ‌تر می‌شود و کوهیرنسی خود را با زمینه ازدست می‌دهند. در کل این دو موضوع منجر به کاهش مقاومت آلیاژ دربرابر لغزش می‌شود و درحین اعمال تنش مکانیزم لغزش به‌سهولت وارد عمل می‌شود، که نتیجهٔ آن وجود کرنش باقی‌مانده در انتهای مرحلهٔ باربرداری است.

شکل های ۶ و ۷ تأثیر عملیات پیرسازی را به ترتیب بر تنش پلاتوی بالایی و پایینی نشان می‌دهند. تنش پلاتوی بالایی نشان‌دهندهٔ تنش لازم برای تبدیل آستنیت به مارتنزیت است تنش پلاتوی پایینی نیز نشان دهندهٔ مقدار تنش موردنیاز برای انجام استحالهٔ معکوس (مارتنزیت به آستنیت) در شرایط حذف تنش است. که برای تعیین تنش پلاتوی بالایی و پایینی، به‌ترتیب میزان کرنش ۳/۵٪ و ۳٪ در نظر گرفته شد است.

با توجه به منحنی‌ها، در یک دمای ثابت پیرسازی، مقدار تنش لازم برای انجام استحالهٔ SIM یا استحالهٔ معکوس با افزایش زمان پیرسازی، کاهش می‌یابد. با افزایش



شکل ۶. تنش پلاتوی بالایی در نمونه‌های پیرسخت‌شده در دماها و زمان‌های مختلف پیرسازی.



شکل ۷. تنش پلاتوی پایینی در نمونه‌های پیرسخت‌شده در دماها و زمان‌های مختلف پیرسازی.

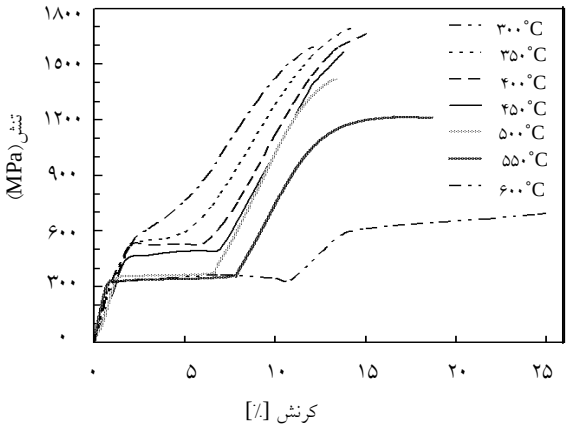
دمای پیرسازی نیز افزایش دما و زمان پیرسازی را می‌توان به نرم‌شدن زمینه و افزایش دمای استحاله و کاهش اختلاف دمای انجام آزمایش کشش و دمای M_S نسبت داد. همچنین مطابق شکل ۶ در زمان پیرسازی ۱۲۰ دقیقه در دماهای ۴۵۰–۶۰۰°C، پلاتوی پایینی ناپدید شده است. دلیل این موضوع انجام فرآیند تبلور مجدد در نمونه‌هاست که به باقی‌ماندن کرنش برگشت ناپذیر در نمونه و حذف پلاتوی پایینی منجر می‌شود.

۳ـ۳ـ تأثیر عملیات پیرسختی بر خواص مکانیکی

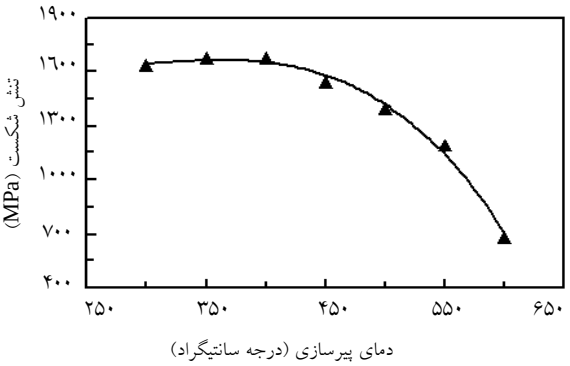
شکل ۸ تأثیر دمای عملیات پیرسازی بر رفتار کششی سیم‌های نایتینول تا نقطهٔ شکست را نشان می دهد. زمان پیرسازی برای تمامی نمونه‌ها ۳۰ دقیقه می‌باشد. به‌طور کلی منحنی‌های ارائه شده در شکل ۸ را می‌توان به چهار مرحله طبقه‌بندی کرد: ۱ـ مرحلهٔ تغییرشکل الاستیک فاز آستنیت؛ ۲ـ مرحلهٔ تبدیل آستنیت به مارتنزیت در اثر تنش (استحاله SIM) که قسمت پلاتو نشان دهندهٔ این مرحله است؛ ۳ـ مرحلهٔ تغییرشکل الاستیک مارتنزیت تشکیل شده در اثر تنش؛ ۴ـ مرحلهٔ تغییرشکل پلاستیک مارتنزیت.

باتوجه‌به منحنی‌ها با افزایش دمای پیرسازی درهریک از حالات، تنش لازم برای وقوع استحاله SIM کاهش می‌یابد. همچنین با تغییر شرایط پیرسازی، استحکام شکست و انعطاف‌پذیری نمونه‌ها نیز تغییر می‌کند.

در شکل ۹ استحکام شکست نمونه‌ها برحسب دمای پیرسازی رسم شده است. با افزایش دمای پیرسازی، استحکام شکست نمونه‌ها پس از افزایش جزئی به سرعت کاهش می‌یابد. افزایش جزئی استحکام شکست، تا دمای ۴۰۰°C را می‌توان به تشکیل رسوبات غنی از نیکل و کوهیرنت Ni_4Ti_3 در زمینه، دراثر عملیات پیرسازی نسبت داد. به‌نظر می‌رسد که مؤثرترین سخت‌گردانی حاصل‌از رسوبات تشکیل‌شده به‌همراه نابجایی‌های موجود، در دمای ۴۰۰°C حاصل شده است. دلیل کاهش استحکام شکست بعداز دمای ۴۰۰°C را می‌توان تأثیر توأم دو فاکتور ۱ـ افزایش اندازه رسوبات وکاهش دانسیته آنها و ۲ـ کاهش دانسیته نابجایی‌ها بر استحکام زمینه دانست. این



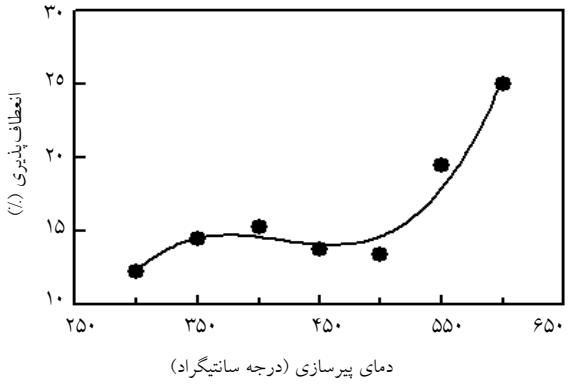
شکل ۸. منحنی های تنش-کرنش نمونه های پیرسخت شده در دماهای مختلف تا نقطهٔ شکست (زمان پیرسازی ۳۰ دقیقه).



شکل ۹. استحکام شکست در نمونه‌های پیرسخت‌شده در دماهای مختلف زمان ۳۰ دقیقه.

موضوع در نمونه‌های پیرسخت شده در ۶۰۰°C بیشتر قابل رویت است، زیرا در این دما فرآیند بازیابی به‌صورت کامل انجام شده و مرحلهٔ تبلور مجدد آغاز می‌شود که در اثر آن استحکام تسلیم نهایی نمونه به ۷۰۰ MPa تنزل می‌یابد.

در شکل ۱۰ نیز تأثیر عملیات پیرسازی بر انعطاف‌پذیری نمونه‌ها برحسب دمای پیرسازی رسم‌شده است. ملاحظه می‌شود



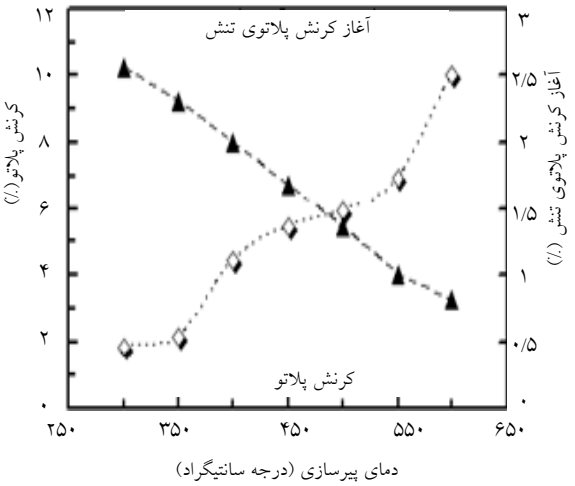
شکل ۱۰. کرنش وقوع شکست در نمونه‌ای پیرسخت شده در دماهای مختلف و زمان ۳۰ دقیقه.

که انعطاف‌پذیری در محدوده دمایی ۳۰۰-۵۰۰°C تغییرات بسیار کمی دارد اما با افزایش دما از ۵۰۰°C به‌بعد به‌سرعت افزایش نشان می دهد. با رجوع به منحنی های تنش-کرنش نمونه ها تا نقطهٔ شکست (شکل ۸)، نشان می دهد که در نمونه های پیرسخت‌شده در محدودهٔ دمایی ۳۰۰-۵۰۰°C، شکست نمونه در مراحل اولیهٔ مرحلهٔ پلاستیک مارتنزیت اتفاق افتاده است. اما با افزایش دمای پیرسازی، منطقهٔ پلاستیک مارتنزیت نیز در منحنی ها ظاهر می‌شود و با ادامهٔ افزایش دمای پیرسازی، شکست در کرنش‌های بالاتر رخ می‌دهد. به‌نظرمی‌رسد دلیل این رفتار نیز رسوبات تشکیل‌شده درحین عملیات پیرسازی و نابجایی‌های موجود در ساختار آلیاژ باشد.

در دماهای پیرسازی پایین دانسیتهٔ رسوبات بالا و فاصلهٔ آنها نیز بسیار کم است. در نمونه های پیرسخت شده نیز در محدودهٔ دماهای پیرسازی ۳۰۰-۵۰۰°C، (در زمان های پیرسازی ۳۰ دقیقه)، همچنان دانسیتهٔ نابجایی ها بالاست؛ به‌طوری‌که می توان گفت به‌نوعی نابجایی ها در هم‌دیگر قفل شده‌اند و امکان حرکت آنها در شرایط تنش اعمالی فراهم نمی‌شود. لذا در کل ریزساختار، سدی محکم دربرابر حرکت نابجایی ها و

تغییر جهت واریانت های مارتنزیتی وجود دارد که باعث توقف نابجایی ها یا عدم تغییر جهت واریانت های مارتنزیتی می شود. بنابراین شکست تمامی نمونه‌های پیرسخت‌شده در این محدودهٔ دمایی، در ابتدای مرحلهٔ پلاستیک مارتنزیت روی داده است. اما با افزایش دمای پیرسازی به ۵۵۰°C، تقریباً می توان گفت کسر عمده‌ای از نابجایی‌های ساختار کاهش می‌یابد. همچنین اندازهٔ رسوبات بزرگ تر و فاصله آنها نیز بیشتر می شود؛ به طوری که امکان فعالیت برای دو عامل یاد شده فراهم می شود و باعث افزایش انعطاف‌پذیری نمونه می گردد.

شکل ۱۱ تغییرات مقدار کرنش پلاتو بر حسب دمای پیرسازی را نشان می دهد. همچنین برای هر نمونه مقدار کرنشی که پلاتوی تنش آغاز می‌شود نیز برحسب دمای پیرسازی رسم شده است. با افزایش دمای پیرسازی، مقدار کرنش پلاتو به صورت پیوسته افزایش می‌یابد؛ به طوری که کرنش پلاتو از مقدار ۱/۷٪ در نمونهٔ پیرسخت شده در دمای ۳۰۰°C افزایش یافته و به مقدار ۱۰٪ در نمونهٔ پیرسخت شده در دمای ۶۰۰°C رسیده است. مقدار کرنش آغاز پلاتوی تنش نیز روندی کاملاً عکس مقدار کرنش پلاتو را دنبال می‌کند؛ به طوری که در دمای پیرسازی ۳۰۰°C به بیشترین مقدار و در دمای پیرسازی ۶۰۰°C به کم ترین مقدار خود می‌رسد.



شکل ۱۱. مقدار کرنش پلاتو و کرنش آغاز پلاتو درنمونه‌های پیرسخت‌شده در دماهای مختلف در زمان ۳۰ دقیقه.

با توجه به اینکه در قسمت پلاتو، استحالهٔ آستنیت (موجود در نمونه) به مارتنزیت انجام می‌شود، می توان مقدار کرنش پلاتو را به مقدار آستنیت زمینه نسبت داد. به‌نظر می رسد با افزایش دمای پیرسختی، بر میزان آستنیت زمینه افزوده شده است. درنتیجه مقدار بیشتری آستنیت دراثر اعمال تنش به مارتنزیت تبدیل شده است.

٤ـ نتیجه‌گیری

۱. انجام عملیات پیرسختی در دماهای پایین، یا زمان‌های کوتاه در دماهای بالا، رفتار سوپرالاستیسیتهٔ خوبی در نمونه‌ها ایجاد می‌کند.

۲. با افزایش دما و زمان عملیات‌پیرسازی، مقدار تنش‌های پلاتوی بالایی و پایینی کاهش می‌یابد.

۳. با انجام عملیات پیرسازی، استحکام شکست نمونه ها تا دمای ۴۰۰°C افزایش جزئی نشان می‌دهد و سپس با افزایش دمای پیرسازی کاهش می‌یابد.

۴. با انجام عملیات پیرسازی، انعطاف‌پذیری نمونه ها بعد از تغییرات جزئی در دماهای پیرسازی پایین، با عبور از محدودهٔ دمایی ۴۵۰ـ۵۰۰°C افزایش می یابد.

۵. با افزایش دمای پیرسازی، مقدار کرنش پلاتو به‌صورت پیوسته افزایش می‌یابد.

مراجع

1. Khalil-Allafi, J., Dlouhy, A. and Eggeler, G., "Ni_4Ti_3-Precipitation During Aging of Niti Shape Memory Alloys and Its Influence on Martensitic Phase Transformations", ***J. of Acta Materialia***., Vol. 50 (2002) 4255-4274.
2. Bataillard, L., Bidaux, J.E. and Gotthardt, R., Interaction Between Microstructure and Multiple-Step Transformation in Binary Niti Alloys Using In-Situ Transmission Electron Microscopy Observations, Philosophical Magazine**,** Vol. 78 No. 2 (1998) 327-344.
3. Huaung, X. and Liu, Y., "Effect of Annealing on the Transformation Behavior and Super elasticity of NiTi Shape Memory Alloy", ***J. of Scripta Materialia***, Vol. 45 (2001) 153-160.
4. McNaney, J.M., Imbeni, V., Jung, Y., Papadopoulos, P. and Ritchie, R.O., "An Experimental Study of the Super elastic Effect In A Shape-Memory Nitinol Alloy under Biaxial Loading", ***J. of Mechanics of Materials***, Vol. 35 (2003) 969-986.
5. Favier, D., Liu, Y., Orgeas, L., Sandel, A., Debove, L. and Comte-Gaz, P., "Influence of Thermomechanical Processing on the Super elastic Properties of a Ni-Rich Nitinol Shape Memory Alloy", ***J. of Materials Science and Engineering***, Vol. 429 (2006) 130-136.
6. Otsuka, K. and Ren, X., "Physical Metallurgy of Ti-Ni-Based Shape Memory Alloys", ***J of Progress in Materials Science***, Vol. 50 (2005) 511-678.
7. Morawiec, H., Stroz, D., Goryczka, T. and Chrobak, D., "Two-Stage Martensitic Transformation in A Deformed and Annealed Niti Alloy", ***J. of Scripta Mater***, Vol. 35 (1996) 485.
8. Morawiec, H., Ilczuk, J., Stroz, D., Goryczka, T. and Chrobak, D.,**"**Two-Stage Martensitic Transformation in NiTi Alloys Caused by Stress Fields", ***J. De Phys. IV***, France 07 C5 (1997) C5-155.
9. Stroz, D., "Studies of the R-Phase Transformation in a Ti–51at.%Ni Alloy by Transmission Electron Microscopy", ***J. of Scripta Mater***, Vol. 47 (2002) 363.
10. Lin, H., Wu, S., Chou, T. and Kao, H., "The Effects of Cold Rolling on the Martensitic Transformation of an Equiatomic TiNi Alloy", ***Acta Metallurgica et Materialia***, Vol. 39 (1991) 2069.
11. Otsuka, K. and Ren, X., "Factors Affecting the Ms Temperature and its Control in Shape-Memory Alloys", ***Mater. Sci. Forum***, Vol. 177 (2002) 394-395.