عملیات حرارتی آلیاژحافظه‌دار نایتینول بعد از نورد سرد

سید حامد میرابوالقاسمی[1]، سید خطیب‌الاسلام صدرنژاد[2]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف

۲- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

آلیاژ نایتینول پرکاربردترین آلیاژ حافظه‌دار است. اما بدلیل تأثیر شدید کار مکانیکی بر میزان برگشت حافظه این آلیاژ، تعیین بهترین محدوده دمایی عملیات حرارتی برای این آلیاژ پس از کار سرد شدید (نورد سرد)، اهمیت بسزایی دارد. این تحقیق تأثیر دمای عملیات حرارتی پس از نورد گرم و سرد روی برگشت حافظه‌داری نمونه‌های ریختگی نایتینول مورد بررسی قرار گرفته و محدودهٔ بهینهٔ عملیات حرارتی این نمونه‌ها تعیین شده است.

واژه‌های کلیدی: آلیاژ نایتینول، عملیات حرارتی، حافظه‌داری، خواص مکانیکی

مقدمه

پدیده حافظه‌داری

معمولاً وقتی یک فلز تا بالاتر از محدوده الاستیک، کرنش پیدا کند، تغییر فرم دائمی در آن ظاهر می‌شود. برای بیشتر فلزات، کرنش این نقطه (کرنش تسلیم)، جزئی از کرنش کل است، که هر کرنشی بیشتر از این، تغییر فرم پلاستیک نامیده می‌شود و باقی می‌ماند. اما فلزات حافظه‌دار، پس از کرنش دیدن تا ۱۰٪، بر اثر گرم شدن، می‌توانند به شکل قبلی باز گردند. گرم کردن مجدد به فلز حافظه‌دار یادآوری می‌کند که ساختاری دیگر را ترجیح می‌دهد. این رفتار غیرمعمول به عنوان پدیده حافظه-داری[1] (SME) شناخته می‌شود. این پدیده، در اثر تغییر فاز از ساختار B2 (ساختار فاز مادر در دمای بالای M_s[2]) به ساختار B19 (ساختارفاز مارتنزیت) در دمای پایین، واقع می‌شود. این تغییر فاز یک تغییر فاز مستقل از نفوذ است و در دسته تغییر فازهای مار تنزیتی قرار می‌گیرد(شکل (۱))[۱،۲].

ویژگی مهم فاز مارتنزیت در این آلیاژها همبسته بودن مرز بین فاز مادر و فاز مارتنزیت می‌باشد که این همبسته بودن باعث می‌شود که مرز بین فازهای آستنیت و مارتنزیت، کاملاً متحرک باشد و حرکت آن به طرف فاز مارتنزیت باعث از بین رفتن فاز مارتنزیت و در نتیجه پدیده حافظه‌داری گردد. بنابراین هر پدیده‌ای که روی حرکت این مرز اثر بگذارد و باعث کندی آن شود (مثل نابجاییها) حافظه‌داری را از بین می‌برد. از سوی دیگر رشد دانه‌ها در دماهای بالای عملیات حرارتی، باعث از بین رفتن حافظه‌داری می‌گردد که در این تحقیق دمای بهینه عملیات حرارتی پس از نورد سرد برای بهترین برگشت حافظه‌داری، پیشنهاد شده است.

روش تحقیق

آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق از تیتانیم اسفنجی و نیکل کاتدی در کوره VIM[3]، ریخته شد. شمشهای بدست آمده پس از آنالیز نورد شدند. ابعاد شمشهای ریخته شده ۱۰۰×۱۵×۱/۵mm بود که ابتدا در نورد گرم در دمای ۹۰۰°C ضخامت شمشها از ۱۵ میلی متر به ۱۱ میلیمتر کاهش یافت و در نهایت با نورد سرد ضخامت آنها به ۱/۱ میلیمتر رسید. میزان کاهش سطح مقطع این آلیاژ در نورد سرد، ۰/۱ بوده که بنا بر گزارش Rozner و Buehler[۳]، کار سرد با توان کرنش سختی ۰/۲۳ در آن

1- Shape Memory Effect

۲- دمای آغاز استحاله مارتنزیتی در سرد شدن

3- Vacuum Induction Melting

ذخیره شده است. پس از ماشینکاری، نمونه‌ها در کوره قرار گرفتند. این نمونه‌ها برای جلوگیری از اکسید شدن داخل یک بوشن چدنی که کاملاً از پودر آهن پر شده بود، قرار گرفتند و پس از عملیات حرارتی، در آب سرد شدند. مشخصات این نمونه‌ها در جدول (۱) آمده است. در نهایت نمونه‌ها مورد آزمایش کشش قرار گرفتند که نمودارهای کشش آنها در شکلهای (۲) تا (۶) آمده است.

بحث و نتیجه‌گیری

اثر کار سرد و عملیات حرارتی بر حافظه‌داری

همانطور که اشاره شد، در این آلیاژ فصل مشترک، فصل مشترکی متحرک است. هر عملی که تحرک[1] این فصل را کم کند، باعث کاهش دمای Ms و کاهش میزان کرنش برگشتی می‌گردد. از جمله عوامل مهم، تنش اصطکاکی حاصل از حضور نابجایی‌ها، در فصل مشترک است. بنابراین کار سرد به دلیل ایجاد نابجاییها، باعث از دست رفتن خاصیت حافظه‌داری و کم شدن کرنش برگشتی می‌گردد و ناحیه تخت منحنی تنش-کرنش آن (منحنی II در شکل (۷))، که نشانهٔ حافظه‌داری است از بین می‌رود و بصورت منحنی I شکل (۷) می‌شود[۴]. بنابراین کم شدن زاویه و تخت شدن ناحیهٔ دوم نشانهٔ بازگشت حافظه‌داری است.

در شکل (۸)، نسبت $\frac{\varepsilon r}{\varepsilon t} = \frac{\text{کرنش بازگشتی}}{\text{کرنش}}$ بعنوان بازده بازگشت‌پذیری بر حسب تنش، رسم شده است[۳]. همانطور که دیده می‌شود، بازده بازگشت، بصورت تقریباً خطی، با افزایش تنش، کاهش می‌یابد. راه بازگشت حافظه‌داری پس از کار سرد، عملیات حرارتی آلیاژ است که باعث از بین رفتن نابجاییهای روی مرز مشترک متحرک بین دو فاز می‌گردد و میزان برگشت برای نمونه آنیل شده در دمای بالاتر، نسبت به نمونه آنیل شده در دمای پایین‌تر، بیشتر است که این نشانه بهبود خاصیت حافظه‌داری با افزایش دمای آنیل است (شکل (۸)) اما Saburi و همکارانش[۵] نشان دادند که رشد دانه باعث از دست رفتن مجدد حافظه‌داری می‌گردد (شکل (۹)). بنابراین باید از دماهای خیلی بالای عملیات حرارتی که منجر به رشد دانه می‌گردد، اجتناب کرد. از این رو برای تعیین دمای بهینه عملیات حرارتی، تحقیق حاضر صورت گرفت و همانطور که در شکلهای (۲) تا (۶) مشاهده می‌شود، در منحنی‌های نمونه‌های تحقیق حاضر، با افزایش دمای عملیات حرارتی تا $700^{\circ}C$ این شیب در حال کم شدن و حافظه‌داری در حال بازیابی است، اما از این دما به بعد مجدداً حافظه‌داری کم می‌شود (شکل

1- Mobility

(۱۰)) که این کم شدن مجدد حافظه‌داری می‌تواند بدلیل وقوع پدیدهٔ رشد دانه در این محدوده دمایی باشد. از این رو بهترین دمای عملیات حرارتی پس از نورد سرد آلیاژ، محدوده دمایی ۶۰۰ تا ۷۰۰°C که تبلور مجدد آلیاژ در آن کامل می‌گردد.

نتیجه‌گیری

۱- بازگشت حافظه‌داری آلیاژ نایتینول پس از نورد سرد از دمای ۴۰۰°C است.

۲- بهترین دمای عملیات حرارتی بازگشت در زمان معین، محدوده دمایی ۶۰۰ تا ۷۰۰°C است که تبلور مجدد آلیاژ در آن کامل می‌گردد.

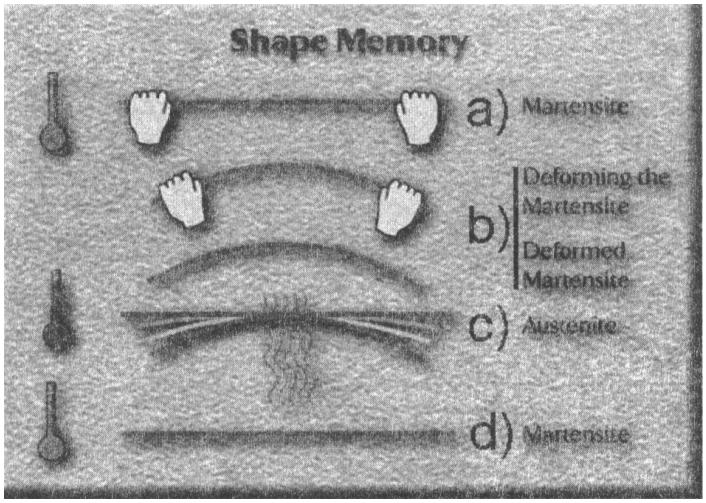
۳- در دمای بالاتر از ۷۰۰°C بدلیل وقوع پدیده رشد دانه، حافظه‌داری مجدداً از دست می‌رود.

منابع و مراجع

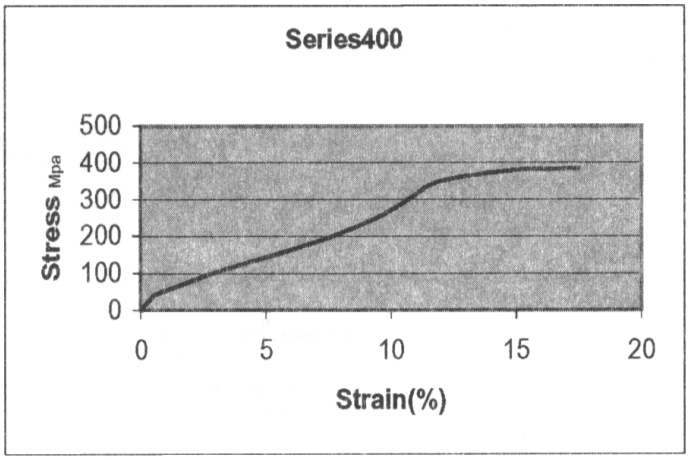
[1] NITINOL in www.strugl.de
[2] C.M.Wayman, Prog.mat.sci, vol36 (1992), P.203
[3] Rozner, Buehler, Transactions of ASM, vol 50(1996) P.350
[4] Yiong Liu, P.G.Mc.Cormic, "Influence of Heat Treatment on Mechanical Behavior of NiTi Alloy", ISIJ International, 29(1989) 417-422.
[5] Saburi, T., Ti-Ni shape memory alloys, in Shape Memory Materials, K. Otsuka and C.M. Wayman, Editors. 1998, Cambridge University Press: Cambridge. p.49-96.

جدول (۱): مشخصات عملیات حرارتی نمونه‌های نورد شده

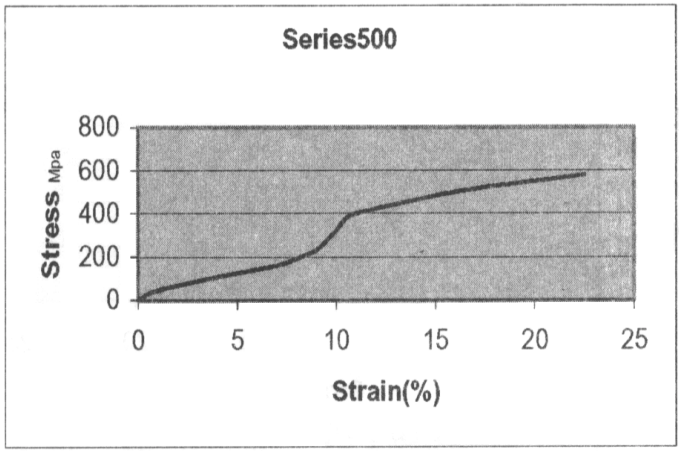
شماره نمونه	دمای آنیل(°C)	زمان آنیل (hr)
سری ۳	۴۰۰	۱
سری ۴	۵۰۰	۱
سری ۵	۶۰۰	۱
سری ۶	۷۰۰	۱
سری۷	۸۰۰	۱



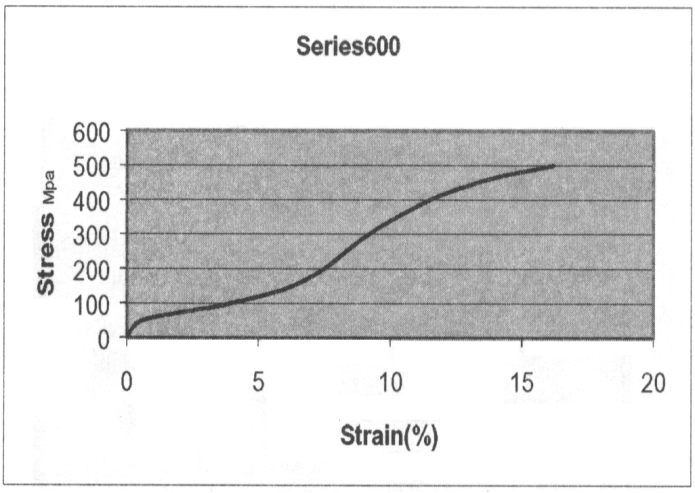
شکل (۱): شماتیک دماهای تغییر حالت و حافظه‌داری[۱]



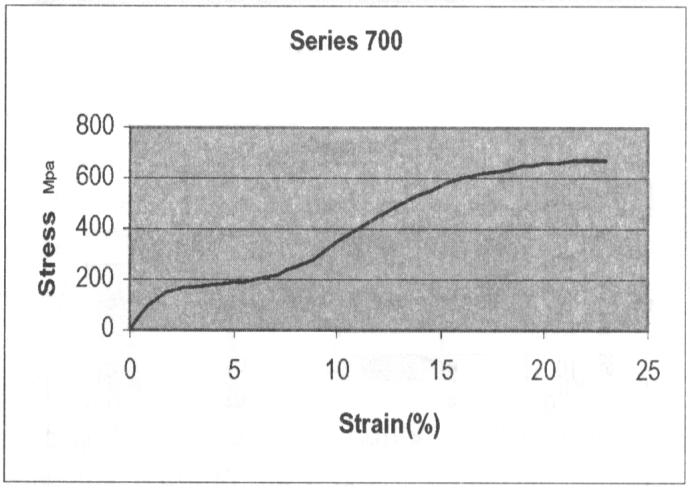
شکل (۲): منحنی تنش- کرنش نمونه‌های عملیات حرارتی شده در ۴۰۰°C



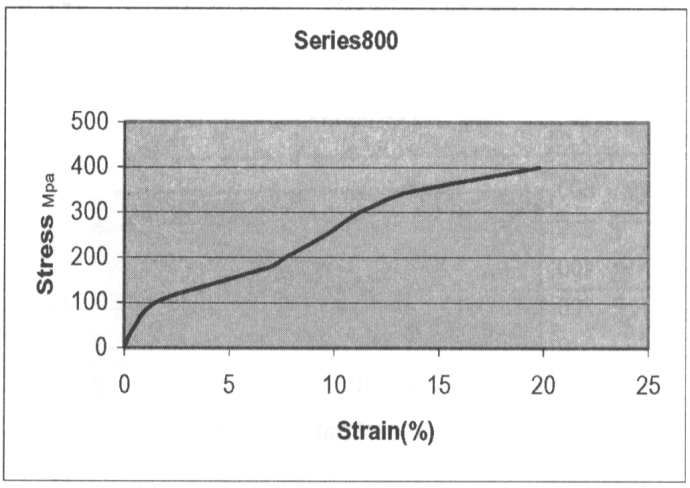
شکل (۳): منحنی تنش- کرنش نمونه‌های عملیات حرارتی شده در ۵۰۰°C



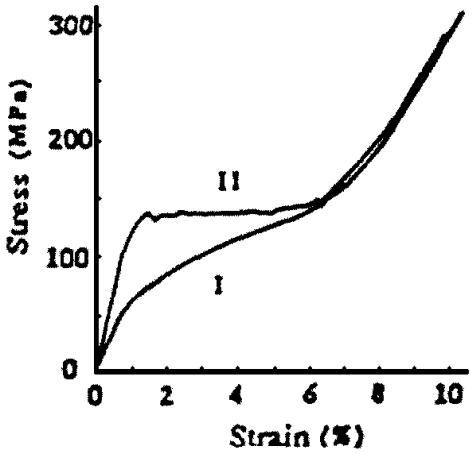
شکل (۴): منحنی تنش- کرنش نمونه‌های عملیات حرارتی شده در ۶۰۰°C



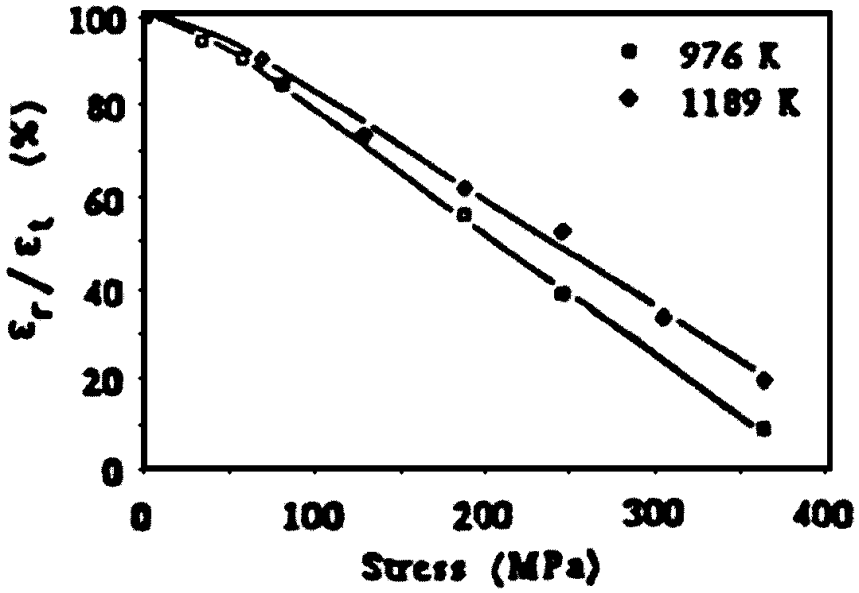
شکل (۵): منحنی تنش- کرنش نمونه‌های عملیات حرارتی شده در ۷۰۰°C



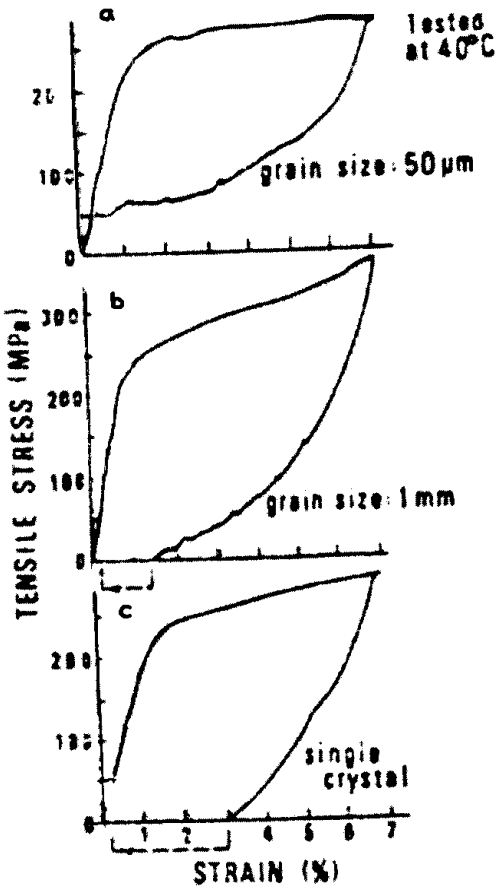
شکل (۶): منحنی تنش- کرنش نمونه‌های عملیات حرارتی شده در ۸۰۰°C



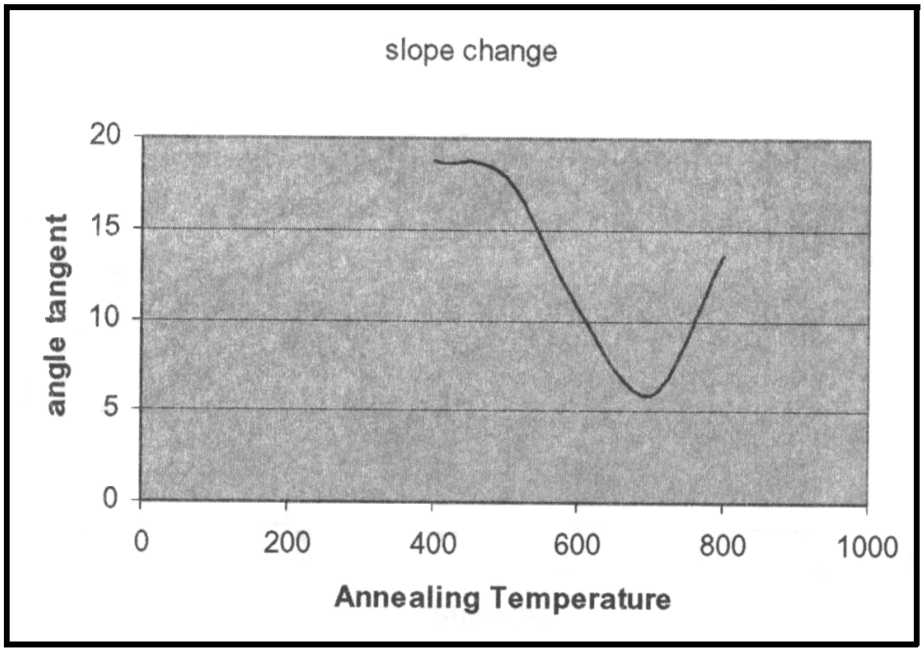
شکل (۷): منحنی‌های تنش کرنش[۴]



شکل (۸): اثر تنش و دما بر راندمان برگشت تغییر شکل[۳]



شکل (۹): بازگشت حافظه‌داری با افزایش اندازهٔ دانه[۴]



شکل (۱۰): اثر دمای عملیات حرارتی بر شیب ناحیهٔ دوم