



ساخت و تربیت یک آلیاژ حافظه دار

رضا شرفی و خطیب الاسلام صدرنژاد

دانشکده مهندسی متالورژی دانشگاه صنعتی شریف

ویژه‌مجله مهندسی و علوم پزشکی جابازان

چکیده

برای اولین بار در داخل کشور آلیاژ حافظه دار نایتینول ساخته شد. بهترین روش، با توجه به امکانات موجود، انتخاب شد و آلیاژ پس از ذوب در داخل قالب های مسی ریخته گری گردید. نمونه ها از طریق نورد گرم به ضخامت ۰/۲۵ تا ۰/۳ میلی متر رسانده شدند. سپس سیکل های عملیات حرارتی انتخاب و بر روی قطعات ساخته شده اعمال شد. دماهای اندازه گیری شده تغییر حالت برابر $M_s=58$ ، $M_f=30$ ، $A_s=53$ و $A_f=88$ درجه سانتیگراد بودند. مشاهده شد که با انتخاب دماهای بالای عملیات حرارتی تغییر حالت در نیم-سیکل سرد کردن بجای دو مرحله $M \rightarrow R \rightarrow B_2$ در یک مرحله $R \rightarrow M$ انجام می گیرد. آزمایشهای انجام شده نشان داد که دمای تغییر حالت های آستنیت به مارتنزیت و مارتنزیت به آستنیت در حد قابل قبول برای کاربرد آلیاژ در ساخت سیستمهای تحریک خودکار در روباتها و قطعات عملگر است.

مقدمه

تنوع کاربردهای بالقوه و نیاز روزافزون بشر به استفاده از آلیاژ حافظه دار در زمینه های مختلف مهندسی و پزشکی، انگیزه مطالعه پیرامون روشهای ساخت و یکارگیری این دسته از آلیاژها را فراهم کرده است. طی دو دهه اخیر، آلیاژ نیکل - تیتانیوم (نایتینول) به لحاظ برخورداری از خصوصیات منحصر به فرد از قبیل میزان برگشت پذیری مناسب، امکان انتقال دمای تغییر حالت به محدوده دمای بدن، مقاوم بودن در برابر سایش و خوردگی و قابلیت انطباق با شرایط بدن، شهرت زیادی کسب کرده است. استفاده از این آلیاژ در جراحی استخوان، فک و صورت و سایر قسمت های بدن، فصل جدیدی را در زمینه مواد پزشکی^(۱) به خود اختصاص داده است.

قیمت نسبتاً زیاد آلیاژ در سطح جهانی، عدم تولید در داخل کشور، موجود بودن پتانسیل بالای کاربردهای فوق و ضرورت بهبود و گسترش روشهای تولید در سطح ملی و بین المللی، زمینه های تحقیق در خصوص این آلیاژ را فراهم کرده است. در این تحقیق روشهای ساخت، شکل دادن، عملیات حرارتی و تعیین خواص آلیاژ با استفاده از وسائل موجود در داخل کشور ارزیابی و در هر مورد روش مطلوب بکار گرفته شد.

شرح آزمایشها

برای تهیه آلیاژ از نیکل با خلوص ۹۹/۹۷ درصد و تیتانیوم با خلوص ۹۹/۹ درصد استفاده شد. مواد سازنده ذوب شده و سپس در قالب مسی ریخته شدند.

درصد نیکل و تیتانیوم بروش جذب اتمی^(۱) و درصد کربن و گوگرد بوسیله دستگاه اشتراک این تعیین شدند. سختی نمونه ها نیز با استفاده از دستگاه سختی سنج ماکرو و بروش ویکزر با بار ۴۰KP اندازه گیری شد. سپس نمونه ها نورد گرم شدند. عملیات آنیل میانی^(۲) در دمای ۹۰۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۱۲۰ تا ۱۸۰ ثانیه در بین مراحل نورد بر روی قطعات انجام شد. ضخامت نهایی نمونه ها ۰/۲۵ تا ۰/۳ میلیمتر بود. برای حذف تنش های باقیمانده از نورد، نمونه ها در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳/۶ کیلوثانیه، تحت خلاء ۱۰^{-۴} تا ۱۰^{-۵} تور^(۳) آنیل شده و سپس در داخل کوره سرد شدند.

عملیات تک فاز سازی در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۳/۶ کیلوثانیه انجام شد و سپس نمونه ها در مخلوط یخ و نمک بادمای ۷- تا ۱۰- درجه سانتیگراد سریع سرد شدند. برای ایجاد رسوبهای غنی از نیکل عملیات پیرکردن در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۶/۲ کیلوثانیه بر روی نمونه ها انجام شد. سپس نمونه ها در مخلوط یخ و نمک بادمای ۷- تا ۱۰- درجه سانتیگراد سریع سرد شدند.

اندازه گیری دماهای تغییر حالت (M_f و M_s , A_f , A_s) با استفاده از دستگاه^(۴) D.S.C مدل P.L بر روی یکی از نمونه ها انجام شد. برای این اندازه گیری نمونه بین دماهای ۹۰- تا ۱۵۰+ درجه سانتی گراد ابتدا گرم و سپس سرد شد. سرعت های گرم و سرد کردن در هر مرحله ۰/۱۵ درجه سانتیگراد بر ثانیه بود.

۱ - Atomic Absorption

۲ - Intermediate Annealing

۳ - Torr

۴ - Differential Scanning Calorimetry



نتایج و بحث

ترکیب شیمیایی و مشخصات مکانیکی نمونه های ریخته شده بترتیب در جدولهای ۱ و ۲ آورده شده است.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی نمونه های ریخته شده برحسب درصد جرمی

عنصر نمونه	Ni	Ti	C	S
۱	۵۵/۰	۴۴/۳	۰/۵۰	۰/۱۶۰
۲	۵۴/۵	۴۴/۵	۰/۷۰	۰/۱۰۰
۳	۵۵/۵	۴۴/۰	۰/۴۹	۰/۰۰۱

جدول ۲: مشخصات مکانیکی نمونه های ریخته شده

نمونه	سختی (HV)					درصد کاهش سطح مقطع نهایی
	۱	۲	۳	۴	۵	
۱	۲۸۵	۲۲۴	۲۶۴	۲۴۱	۲۵۰	۲۱۰
۲	۶۴۲	۶۶۱	۵۸۹	۵۸۹	۶۲۳	۸
۳	۴۲۱	۳۶۲	۴۵۲	۳۲۰	۳۴۰	۱۹۰

جدول ۲ نشان می‌دهد که اختلاف سختی بین دو نقطه از یک نمونه حتی تا ۱۱۷٪ نیز می‌رسد. این موضوع نشان می‌دهد که احتمالاً غیریکنواختی‌هایی در ترکیب شیمیایی وجود دارد. این مساله موجب کاهش قابلیت تغییر فرم مکانیکی شده و همچنین مشکلاتی را در حین حافظه دار کردن نمونه‌ها بوجود می‌آورد. برای یکنواخت کردن ترکیب شیمیایی بهتر است آلیاژ را قبل از عملیات نورد چندین بار ذوب مجدد نموده و یا اینکه در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد و به مدت طولانی تحت عملیات هموزن سازی قرار دهیم.

اطلاعات جدول ۲ همچنین نشان می‌دهد که سختی نمونه ۲ به مراتب بیشتر از سختی نمونه‌های ۱ و ۳ می‌باشد. بنظر می‌رسد علت این اختلاف قطع شدن جریان گاز آرگن در هنگام ذوب نمونه‌ها باشد، که موجب حل شدن اکسیژن در داخل نمونه‌ها می‌شود. این مساله موجب ترد شدن نمونه‌ها شده، در نتیجه امکان اعمال تغییر فرم‌های مکانیکی بر روی آنها فراهم نگردیده و در چند مرحله اول نورد و یا تحمل تقریباً ۸٪ تغییر فرم ترک برمی‌دارند. شکل ۱، چند ترک ایجاد شده در هنگام نورد را نشان می‌دهد.



شکل ۱: ترک‌های ایجاد شده در نمونه شماره ۲ بزرگنمایی ۴۰۰X

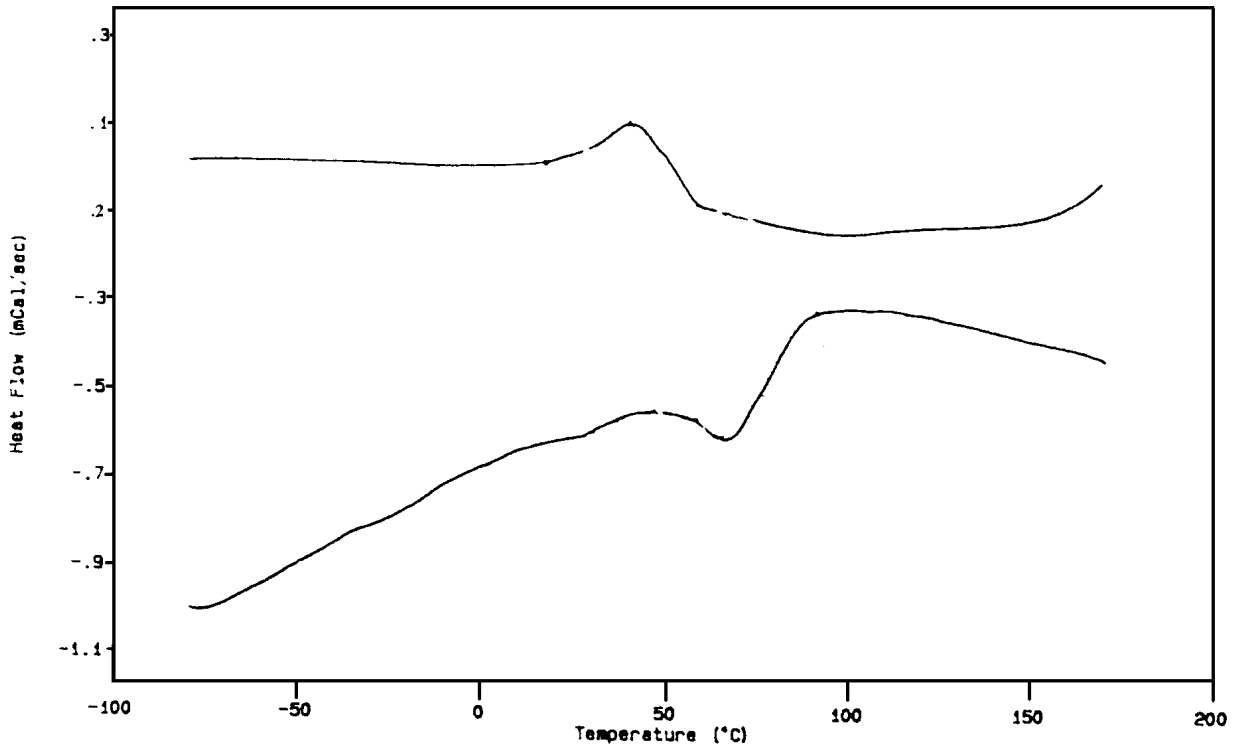
گزارش‌های ارائه شده توسط Keith Melton [۱] افزایش سختی تا ۶۰۰HV که موجب ترد شدن آلیاژ می‌شود راه حل شدن اکسیژن نسبت می‌دهد که در توافق با نتایج بدست آمده در مورد نمونه شماره ۲ می‌باشد. در عملیات نورد به لحاظ جامد بودن نمونه و احتمال جذب گاز کمتری نیاز به اتمسفر کنترل شده نمی‌باشد در حالیکه در فرایند ذوب و ریخته‌گری به لحاظ تمایل مذاب برای واکنش با اتمسفر و احتمال جذب گاز بالا استفاده از اتمسفر کنترل شده (خلأ یا گاز خنثی) ضروری به نظر می‌رسد.

دلیل انتخاب دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد جهت تک فاز کردن، فراهم آوردن شرایط لازم برای تغییر حالت آستنیت (B2) به مارتنزیت (M) در یک مرحله (در نیم سیکل سرد کردن) و حذف تغییر حالت گذرای آستنیت به یک ساختار رمبوئدرال است. [۲] قابل توجه است که اندازه‌گیری‌های انجام شده با دستگاه D.S.C (شکل ۲)

انجام تغییر حالت در یک مرحله رادرنیم سیکل سرد کردن تائید می نماید .

STA 625

SMPL ID : DATE RUN: Oct/03/1994
 RUN ID : SHARIF GAS 1 : N2
 SIZE : 11.100 MG GAS 2 :
 OPERATOR: COMMENT : 11.7.73

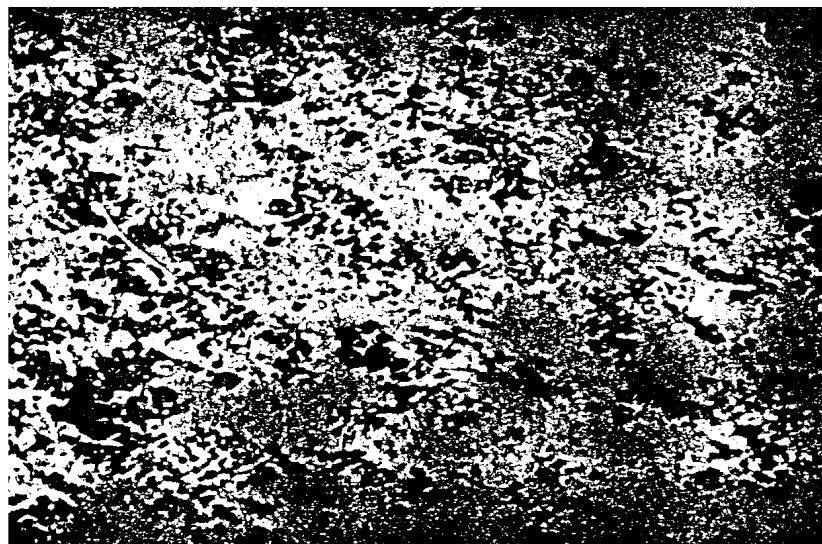


شکل ۲: اندازه گیری دماهای تغییر حالت با استفاده از دستگاه D.S.C،
 نمونه در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد و به مدت یک ساعت
 تک فاز شده و پس از سریع سرد شدن، در دمای ۴۵۰ درجه
 سانتیگراد به مدت ۲ ساعت پیر شده است .

شکل فوق گرمای آزاد شده در نمونه را بر حسب دما نشان میدهد. همانطوریکه میدانیم تغییر حالت از یک فاز به فاز دیگر گرماگیر و یا گرمازایی باشد که موجب بوجود آمدن پیک هایی بر روی منحنی فوق می گردد و از روی تعداد این پیک ها میتوان تعداد تغییر حالت های بوجود آمده در هر نیم سیکل را پیش بینی کرد. با توجه به شکل ۲ در حین سرد کردن نمونه ما فقط یک پیک داریم که ناشی از تغییر حالت $B2 \rightarrow M$ میباشد و در صورتیکه تغییر حالت بصورت $B2 \rightarrow R \rightarrow M$ انجام بگیرد، بدلیل دو مرحله ای بودن تغییر حالت باید دو پیک بر روی منحنی سرد کردن ظاهر شود. پیک ظاهر شده در منحنی گرم کردن نیز مربوط به تغییر حالت مارتنزیت به آستنیت میباشد.

در صورتیکه دمای تک فاز کردن پایین انتخاب شود، تغییر حالت در نیم سیکل سرد کردن بصورت

دو مرحله‌ای خواهد بود که موجب پایین آمدن خصوصیات حافظه داری از قبیل میزان بازیابی^(۱) شکل اولیه و دمای تغییر حالت خواهد شد. [۳]
 با پیرکردن آلیاژ در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد، رسوبهای غنی از نیکل در داخل زمینه رسوب می‌کند. شکل ۳ این رسوبها در زمینه TiNi نشان می‌دهد.



شکل ۳: رسوبهای تشکیل شده در اثر پیرکردن در زمینه TiNi
 نمونه در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۲
 ساعت پیر شده است برزگنمایی ۴۰۰X

تحقیقات بعمل آمده [۴] نشان داده است که بهترین دما برای پیرکردن آلیاژ ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد.

بوجود آمدن این رسوبها موجب کاهش کوهرنسی در فصل مشترک رسوب و زمینه شده و در نتیجه یک میدان تنش در اطراف رسوبها ایجاد می‌شود. همچنین تشکیل رسوبهای غنی از نیکل موجب کاهش مقدار نیکل در زمینه می‌شود که در نتیجه دمای شروع تغییر حالت مارتنزیتی (Ms) افزایش پیدا می‌کند. [۵] و از این موضوع میتوان برای تغییر دادن دمای تغییر حالت استفاده کرد.

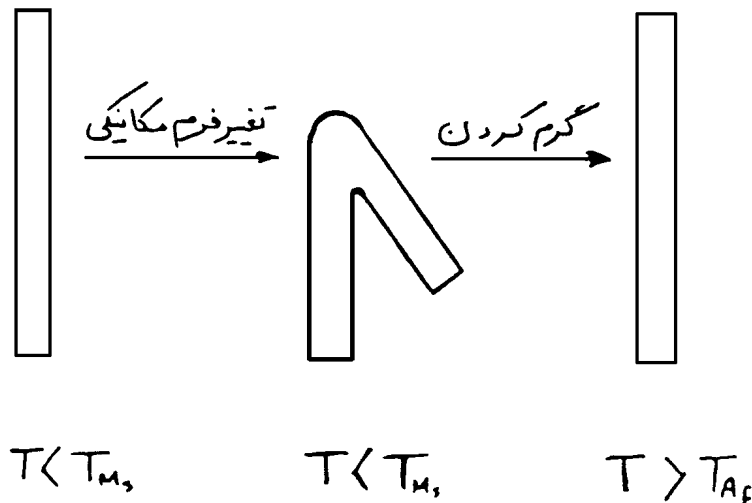
دماهای تغییر حالت بدست آمده برای بسیاری از کاربردها از قبیل قطعات عملگر و روباتها ایده آل می‌باشند. همچنین با تغییر سیکل‌های عملیات حرارتی می‌توان دماهای تغییر حالت آلیاژ را به محدوده دمای بدن برای کاربردهای پزشکی منتقل کرد.

پس از این مرحله خاصیت حافظه داری از طریق ایجاد تغییر شکل مکانیکی در حالت مارتنزیتی و حرارت

۱- Recovery

دادن نمونه نادمای $T > A_f$ و بازیابی شکل اولیه مشاهده شد که این خاصیت بصورت یکطرفه در نمونه‌ها بوجود آمده بود. (شکل ۴)

برخی کاربردهای مهندسی پزشکی دوطرفه بودن خاصیت حافظه داری در آلیاژ را ضروری می‌سازند. از اینرو تلاشهایی به منظور تربیت آلیاژ برای منظور فوق در حال انجام است.



شکل ۴: پیدایش پدیده حافظه داری یکطرفه در نمونه های پیرشده در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت

نتیجه گیری

در اثر قطع جریان گازخشی و حل شدن اکسیژن در نمونه ها، سختی به شدت افزایش پیدا کرده و موجب ترد شدن آلیاژ می شود که این پدیده موجب کاهش قابلیت تغییر فرم پلاستیک می شود. از اینرو فرایند ذوب باید در اتمسفر کنترل شده (خلأ یا گازخشی) انجام بگیرد.

به دلیل حلالیت پایین اکسیژن در حالت جامد، فرایند نورد میتواند در اتمسفر کنترل نشده انجام شود. با بالا رفتن دمای عملیات حرارتی، تغییر حالت گذرای آستنیت به یک فاز رمبوئیدرال $B2 \rightarrow R$ در نیم سیکل سرد کردن حذف شده و دماهای تغییر حالت نیز جابجایی شوند، از اینرو با تغییر سیکل های عملیات حرارتی میتوان دماهای تغییر حالت را بصورت کنترل شده ای جابجا کرد.

سپاسگزاری

از پژوهشکده مهندسی و علوم پزشکی جانبازان بخاطر تامین مالی و از دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی شریف بخاطر اینکه تحقیق در آنجا انجام شده است، سپاسگزاری می شود.