

تأثیر چرخه‌های حرارتی بر دمای تبدیل^۱ و برگشت پذیری شکل در آلیاژ

حافظه‌دار^۲ ۵Ti/۰/۹۲Al۱۰/۰۸Zn۲/۰۸Cu۲۷/۸۵/۶۹

سید خطیب‌الاسلام صدرنژاد (استاد)

حمید خرسند (دانشجوی دکترا)

عبدالرضا ناکیر (کارشناس)

دانشکده‌ی مهندسی و علم مواد

دانشگاه صنعتی شریف

هدف این بررسی مشخص کردن چگونگی و میزان تأثیر چرخه‌های حرارتی بر دماهای تبدیل و خاصیت حافظه‌داری در آلیاژ دارای ۶۹/۸۵ درصد وزنی مس، ۲۷/۰۸ درصد وزنی روی، ۲/۹۲ درصد وزنی آلومینیم و ۰/۰۵ درصد وزنی تیتانیوم است. برای این منظور ابتدا آلیاژ مورد نظر از طریق ذوب در کوره برقی، و سپس ریخته‌گری در قالب فولادی تولید شد. سپس برای ایجاد اثر حافظه‌داری، عملیات ترمومکانیکی (همگن‌سازی، نورد گرم و آبدادن^۳ سریع در مخلوط آب و یخ) بر آلیاژ انجام شد. آنگاه مقاومت الکتریکی برحسب دما اندازه‌گیری و رسم شد. برای تعیین تأثیر چرخه‌های حرارتی^۴ بر دمای تبدیل، ۱۳۶ چرخه شامل آبدادن آلیاژ با ازت مایع به میزان کمتر از دمای شروع تشکیل مارتنزیت (Ms)، و گرم کردن به میزان بیش از دمای خاتمه‌ی تولید آستنیت (Af)، بر آلیاژ اعمال شد. مطالعات ساختاری و دماسنجی نشان داد که با افزایش تعداد چرخه‌ها، تیغه‌های مارتنزیت تدریجاً درشت‌تر، درصد حجمی مارتنزیت باقی‌مانده کمتر، حلقه‌های پسماند^۵ حرارتی کوچک‌تر، و سرانجام خاصیت بازگشت شکل^۶ کم‌تر می‌شود.

مقدمه

«متالورژی پودر» و «اتصال نفوذی» به‌علت گرانی نسبی پودر و زمان‌بر بودن عملیات، از نظر اقتصادی چندان مقرون به صرفه نیست.^[۱ و ۲]

یکی از عوامل اساسی در کاربرد برنج‌های حافظه‌دار، دمای تبدیل است. تحقیقات نشان می‌دهد که در برنج حاوی ۴۰/۶ درصد وزنی روی، اعمال ۵۰ چرخه‌ی حرارتی می‌تواند دمای Ms را تا حدود ۵۰°C افزایش دهد.^[۳ و ۴] تحقیق دیگر درخصوص برنج حاوی ۳۹/۶۳ درصد وزنی روی نشان می‌دهد که اعمال همین تعداد چرخه‌ی حرارتی، دمای Ms را حدوداً ۳°C کاهش می‌دهد.

بنابراین به نظر می‌رسد که در باره‌ی تأثیر چرخه‌های حرارتی بر دمای تبدیل مارتنزیت در سیستم برنج «بتا» اطلاعات کاملاً روشن و قانونمندی وجود ندارد. بنابراین، دسترسی به اطلاعات لازم مستلزم طراحی نمونه‌ی از آلیاژ حافظه‌دار برنجی، و قراردادن آن تحت چرخه‌های پی‌درپی حرارتی است.

طراحی یک نمونه آلیاژ حافظه‌دار

در این طراحی، برای ساخت آلیاژ حافظه‌دار برنجی، نوعی کوره‌ی الکتریکی مقاومتی، حاوی دو محفظه‌ی ذوب در نظر گرفته شد. هر محفظه‌ی این کوره شامل یک بوتله‌ی گرافیتی بود که برای نگه‌داری و

در سال‌های اخیر، پدیده‌ی حافظه‌داری و خاصیت مارتنزیت گرماکشسان^۶، در بسیاری از آلیاژها و از جمله برنج آلومینیم‌دار Cu-Zn-Al مورد توجه و تحقیق قرار گرفته است.^[۱ و ۲] حافظه‌داری در تبدیل از مارتنزیت به آستنیت پدیدار می‌شود، به گونه‌ی که اگر بر نمونه‌ی آلیاژ در حالت کاملاً مارتنزیتی تغییر شکل معینی اعمال شود با برگشت به حالت آستنیتی، کرنش ذخیره‌شده را آزاد کرده و به شکل اولیه‌ی خود برمی‌گردد.

کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار اخیراً افزایش چشمگیری یافته است. از جمله می‌توان به کاربرد این مواد در ترموستات‌های حرارتی، ابزارهای اتصال استخوان، مبخ‌های ارتوپدی، اتصالات فلزی، کلیدهای خودکار، قاب‌های عینک، سیستم‌های کنترل خودرو و حتی قطعات در معرض تضاد در بدنه‌ی اتموبیل اشاره کرد.^[۳ و ۴] برای ساخت برنج‌های حافظه‌دار از روش‌های متنوعی مانند «ذوب و ریخته‌گری»، «متالورژی پودر» و «اتصال نفوذی» استفاده می‌شود، که در این میان روش «ذوب و ریخته‌گری» در مقایسه با دیگر روش‌ها، ساده‌تر است. برای مثال، عناصر سازنده را در یک کوره‌ی برقی القایی یا قوسی می‌توان بار کرد و تحت اتمسفر کنترل‌شده، ذوب و سپس ریخته‌گری کرد.^[۵ و ۶] استفاده از روش‌های

آهنی قرار گرفته و روی آن با گرافیت و در آن با گل نسوز پوشانیده شد.

پس از همگن‌سازی، آلیاژ تا ضخامت 0.5mm نورد گرم، و سپس نمونه‌های کوچک‌تری به ابعاد $60\text{mm} \times 2\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ از تسمه‌ی نورد شده تهیه شد. برای ایجاد خاصیت حافظه‌داری، به نمونه‌ها شکل خاصی داده شد و سپس به مدت 10° دقیقه در دمای 850°C قرار گرفتند تا فاز بتا در آنها پایدار شود. سپس در مخلوط آب و یخ سریعاً سرد شدند.

برای اندازه‌گیری دمای تبدیل، دستگاهی ساخته شد متشکل از سه بخش: الف) بخش الکترونیکی که مقاومت الکتریکی را با دقت 10^{-6} اهم اندازه‌گیری می‌کرد؛ ب) بخش تجهیزات مربوط به سرد و گرم کردن، که از نیتروژن مایع و از آب گرم استفاده می‌کرد؛ ج) سیستم سخت‌افزاری A/D و رایانه که در صورت اتصال به دستگاه مقاومت‌سنج، اطلاعات را دریافت و منحنی‌های مقاومت الکتریکی را برحسب دما رسم می‌کرد. ترموکوپلی از نوع Pt100 دما را با دقت $1^\circ\text{C} \pm$ اندازه‌گیری می‌کرد.

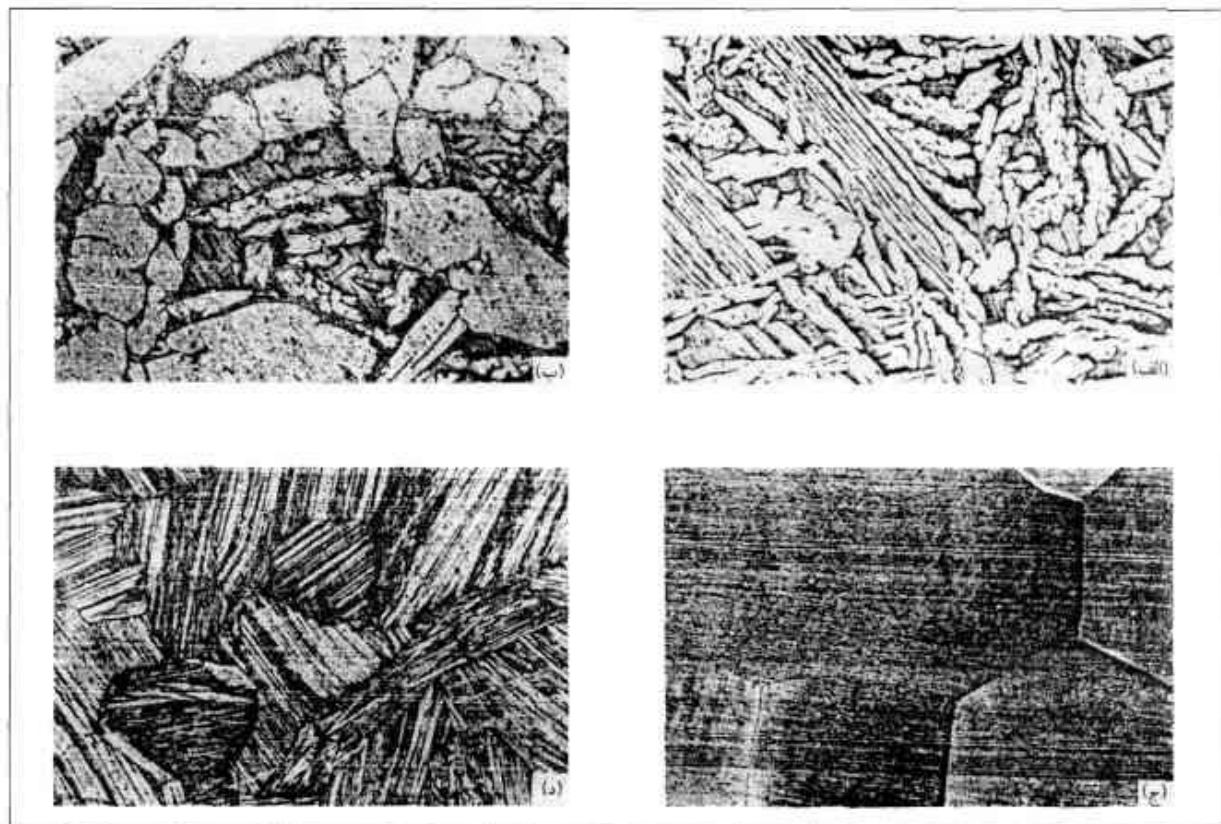
سرد و گرم کردن‌های متوالی تا زیر دمای M_f و تا بالای دمای A_f ، دمای تبدیل آلیاژ را دستخوش تغییراتی می‌ساخت. برای بررسی این تغییرات، آلیاژ ساخته‌شده تحت 3° ، 10° ، 21° ، 56° و 136° چرخه‌ی

گرم کردن بوت‌هی آلومینای حاوی مواد اولیه‌ی فلزی به کار می‌رفت. این آلیاژ از قطعات مس با خلوص 99.99% درصد (ساخت شرکت صنایع مس ایران)، روی با خلوص 99.99% درصد (محصول فنلاند)، آلومینیم با خلوص 99.9% درصد (محصول شرکت ایرالکو) و تیتانیوم اسفنجی با خلوص 99.4% درصد (به‌عنوان جوانه‌زا) ساخته شد. ذوب کردن این قطعات، با استفاده از یک بوت‌هی آلومینا به قطر 5cm ارتفاع 8cm و ظرفیت 250°C گرم انجام گرفت.

برای ریخته‌گری، لازم بود ابتدا قالب‌های فولادی تخت تا 400°C پیش‌گرم شوند. دمای کوره‌ی ذوب توسط یک رشته ترموکوپل از نوع Pt-Pt/Rd اندازه‌گیری، و سپس به کمک یک دستگاه نمایشگر خوانده شد.

آزمایش نشان داد که به‌هنگام افزودن روی (دمای ذوب برابر 419°C و دمای تبخیر برابر 907°C) به مس مذاب (دمای ذوب برابر 1083°C) حدود 16% درصد از روی تلف می‌شود. مقدار این اتلاف برای آلومینیم حدود 8% درصد بود. بنابراین، لازم بود مقدار مواد اولیه‌ی مورد نظر در هر بار تصحیح شود.

آلیاژ ریخته‌شده به مدت 24 ساعت در یک کوره‌ی الکتریکی و در درجه‌ی حرارت 850°C همگن شد. طی این مدت، برای جلوگیری از جذب اکسیژن و نیتروژن هوا، نمونه داخل یک ظرف



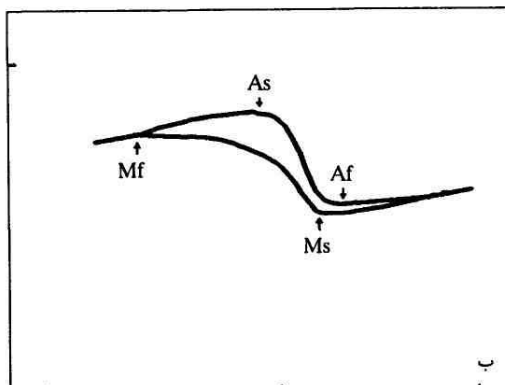
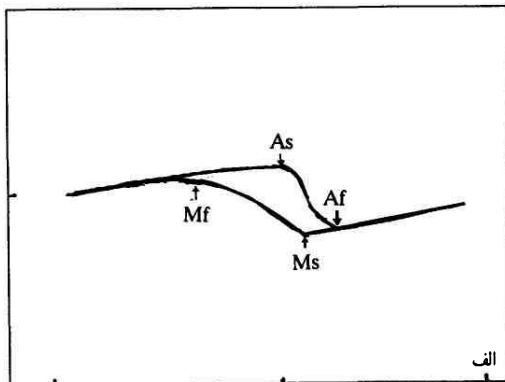
شکل ۱. ساختار میکروسکوپی آلیاژ بعد از: الف) ریخته‌گری؛ ب) همگن‌سازی؛ ج) نورد گرم؛ د) عملیات آیدادن سریع.

جدول ۱. تأثیر ۳۰ دقیقه پیری در دمای ۱۰۰°C بر دماهای تبدیل

$\Delta = Af - Ms$	Af	As	Mf	Ms	دمای تغییر حالت
۳	۲۷	۱۱	-۱۷	۲۴	بعد از عملیات آبدادن (°C)
۴	۲۸	۹	-۲۰	۲۴	بعد از عملیات پیرسازی (°C)

شده است. این تأثیر می‌تواند سبب بسط منحنی پسماند (مقاومت الکتریکی بر حسب دما) در امتداد محور دما شود. [۱۱ و ۹] علت این پدیده، نزدیک شدن فاز مارتنزیت به شرایط تعادل و تشکیل فازهای شبه متعادل جدید در زمینه است. این تغییر در کاربردهایی که تغییر شکل سریع نیاز دارند مطلوب نیست (شکل ۲).

تأثیر چرخه‌های حرارتی بر دمای تبدیل و میزان برگشت پذیری^۹ تاکنون نتایج کامل و نظام‌مندی در خصوص تأثیر چرخه‌های حرارتی بر دماهای تبدیل آلیاژهای برنج گزارش نشده است. بسته به نوع سیستم آلیاژی، ترکیب شیمیایی نمونه، تاریخچه‌ی عملیات حرارتی و یک طرفه یا دوطرفه بودن آلیاژ، تأثیر چرخه‌های حرارتی بر آلیاژهای حافظه‌دار متفاوت است. تأثیر تعداد چرخه‌های حرارتی بر دماهای تبدیل آلیاژ طراحی شده در این تحقیق در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲. منحنی تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب دما: الف) بعد از آبدادن؛ ب) بعد از پیرکردن.

حرارتی قرار گرفته، و دمای تبدیل آن هر بار اندازه‌گیری شد.

ساختار میکروسکوپی آلیاژ طراحی شده

در شکل ۱-الف) ساختار میکروسکوپی آلیاژ بعد از عملیات ریخته‌گری نشان داده شده است. این ساختار شامل دندریت^۷های آلفا و بتاست. شکل ۱-ب) ساختار میکروسکوپی آلیاژ را بعد از عملیات همگن‌سازی نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود، با قرار گرفتن آلیاژ به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۵°C دانه‌ها رشد کرده و دندریت‌ها بزرگ می‌شوند. شکل ۱-ج) ساختار میکروسکوپی آلیاژ را بعد از نورد گرم نشان می‌دهد. بر اثر نورد گرم، دانه‌ها در یک جهت کشیده می‌شوند و ابعادشان وسیع‌تر می‌شود. شکل ۱-د) تیغه‌های مارتنزیت به وجود آمده را پس از عملیات بتاسازی و آبدادن سریع که عامل ایجاد خاصیت حافظه‌داری هستند، نشان می‌دهد. وجود فاز آلفا در لابلای تیغه‌های مارتنزیت می‌تواند به علت پایین بودن سرعت آبدادن و نزدیکی به حالت تعادل باشد.

چگونگی ایجاد تیغه‌های مارتنزیت در آلیاژهای حافظه‌دار با آلیاژهای معمولی فرق دارد؛ به این ترتیب که در آلیاژهای حافظه‌دار این تیغه‌ها با به کارگیری سازوکار دوقلوبی، ولی در آلیاژهای معمولی از طریق سازوکار لغزش به وجود می‌آیند. سازوکار دوقلوبی سبب ذخیره‌ی کرنش در فاز مارتنزیت و حافظه‌داری آن بر اثر تبدیل مجدد به آستنیت می‌شود، در حالی که سازوکار لغزش به تغییر شکل پلاستیک و ذخیره‌ی کرنش می‌انجامد. [۱۰ و ۱۱]

بررسی خاصیت حافظه‌داری

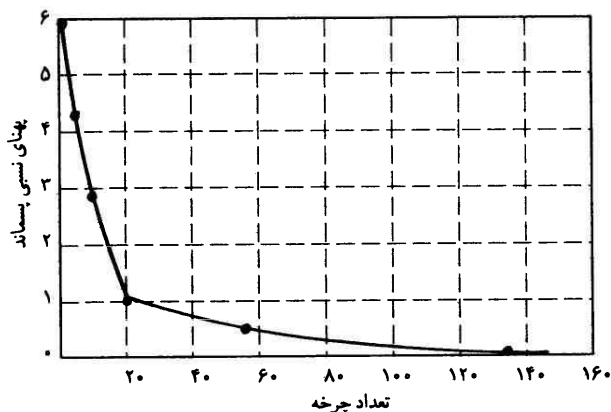
برای بررسی خاصیت حافظه‌داری، نمونه با استفاده از نیتروژن مایع تا حدود ۵۰°C- سرد، و سپس تا ۹۰°C خنک شد. سپس در مجاورت هوا قرار گرفت تا از محیط گرما دریافت کند و به شکل اول (قبل از خم شدن) برگردد. در این حالت بازگشت تقریباً به طور کامل میسر بود. برای حفظ این خصوصیت، باید از پیرکردن^۸ نمونه - بویژه در نزدیکی دمای شروع ایجاد مارتنزیت - خودداری کرد، چرا که پیری عامل بسیار مؤثری در سوق مارتنزیت به سمت پایداری و کاهش قدرت بازگشت تنش و کرنش ذخیره‌شده است. این فرایند برای آلیاژهایی که دمای Mf آنها پایین‌تر از ۰°C است اهمیت بسیاری دارد زیرا نمونه در دمای محیط به سرعت از کار افتاده می‌شود. در جدول ۱ تأثیر ۳۰ دقیقه پیری بر دمای تبدیل، در دمای ۱۰۰°C، نشان داده

جدول ۲ نیز تأثیر تعداد چرخه‌های حرارتی را بر دماهای تبدیل نشان می‌دهد. دماهای Ms و Mf با افزایش تعداد چرخه‌ها، افزایش یافته و سپس تقریباً ثابت می‌مانند، در حالی که دمای Af با افزایش تعداد چرخه‌های حرارتی، ابتدا سریع‌تر و سپس با آهنگی کندتر افزوده می‌شود. دمای As نیز ابتدا با افزایش تعداد چرخه‌های حرارتی افزون‌تر می‌شود، ولی بعد کاهش می‌یابد.

شکل ۴ تأثیر تعداد چرخه‌های حرارتی را بر مقاومت الکتریکی، برحسب دما، و شکل ۵ تأثیر کاهنده‌ی این چرخه‌ها را بر پهنای حلقه‌ی پسماند نشان می‌دهد. این تأثیر به‌خصوص طی ۲۰ چرخه‌ی اول کاملاً محسوس است. در شکل ۶ تأثیر اعمال چرخه‌های حرارتی بر اندازه‌ی تیغه‌های مارتزیت مشخص شده است. مقایسه‌ی ریزساختارهای ارائه شده، نشان‌دهنده‌ی درشت‌شدن تدریجی تیغه‌های مارتزیت بر اثر اعمال چرخه‌های حرارتی است. بررسی این ریزساختارها نشان می‌دهد که درشت‌شدن تدریجی تیغه‌های مارتزیت با کاهش درصد مارتزیت باقی‌مانده و حذف خاصیت حافظه‌داری توأم است (شکل ۷).

مقایسه‌ی اطلاعات فلزنگاری^{۱۰} با خواص حافظه‌داری، نشان می‌دهد که رشد ضخامت تیغه‌های مارتزیت همراه با کاهش درصد مارتزیت باقی‌مانده به‌علت تشکیل تقص‌های ساختاری همچون ناهمبایی در زمان اعمال چرخه‌های حرارتی در مرز مارتزیت با فاز مادر است که با جلوگیری از ایجاد مارتزیت‌های جدید، باعث کاهش حجم نسبی دوقلوهای متحرک شده و خواص حافظه‌داری را پایین می‌آورد.^[۸] کاهش درصد مارتزیت باقی‌مانده و برگشت حافظه (شکل ۸) بر اثر افزایش تعداد چرخه‌های حرارتی مؤید این مطلب است.

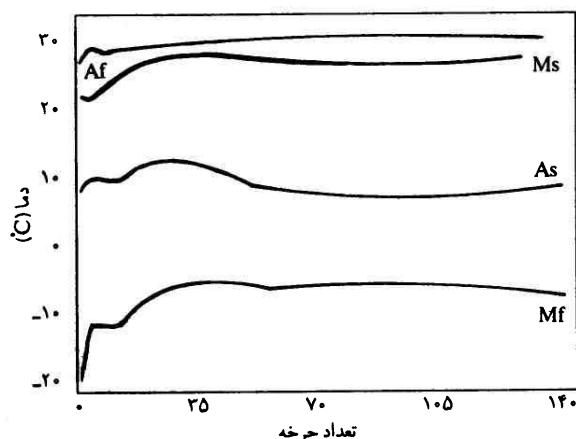
برای تعیین میزان حافظه‌داری در این طراحی، ابتدا نمونه را به



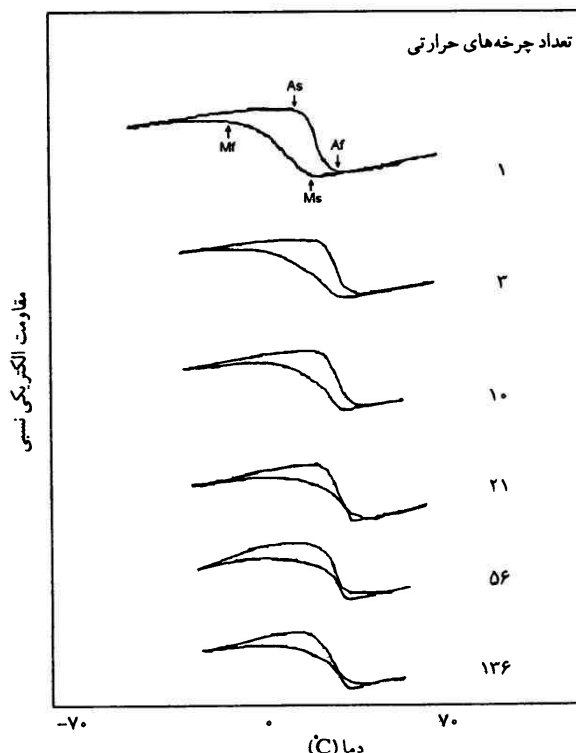
شکل ۵. تأثیر تعداد چرخه‌های حرارتی بر پهنای حلقه پسماند.

جدول ۲. تأثیر تعداد چرخه‌های حرارتی بر دماهای تبدیل.

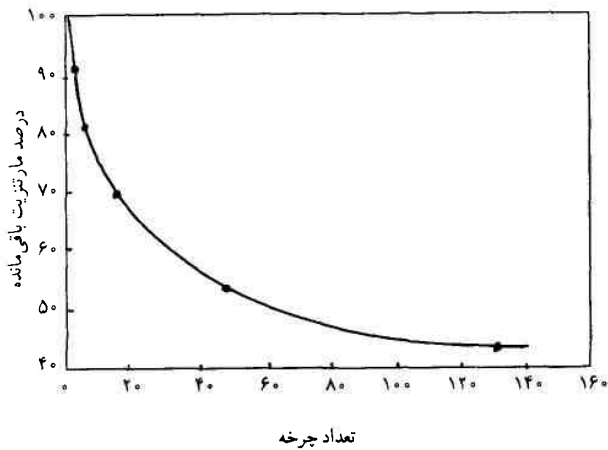
تعداد چرخه	دمای تغییر حالت (°C)				پسماند حرارتی (°C)
	Af	As	Mf	Ms	
۱	۲۴	۱۱	-۱۷	۲۷	Af-Ms
۳	۲۴	۱۲	-۱۰	۳۱	
۱۰	۲۶	۱۲	-۱۰	۳۱	
۲۱	۳۰	۱۵	-۵	۳۲	
۵۶	۳۰	۱۱	-۴	۳۳	
۱۳۶	۳۰	۱۱	-۵	۳۳	



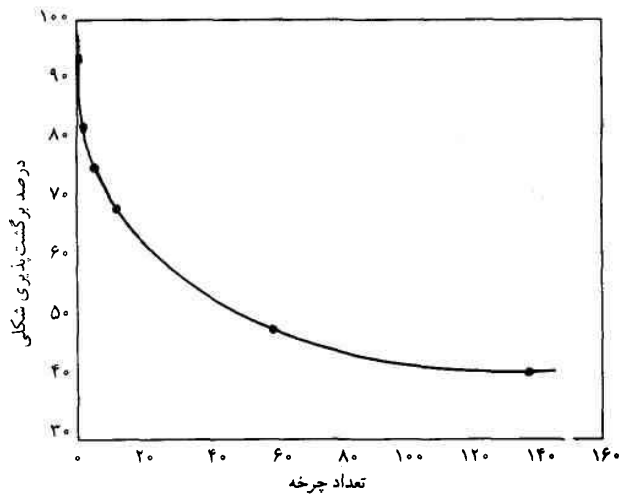
شکل ۳. تأثیر تعداد چرخه‌های حرارتی بر دماهای تبدیل.



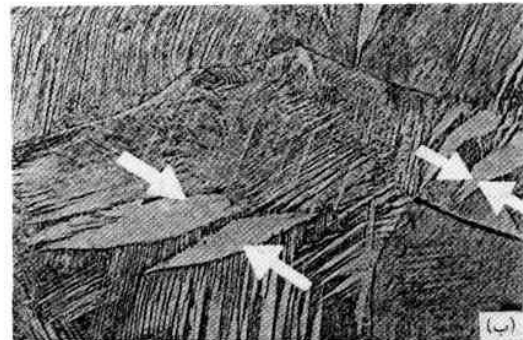
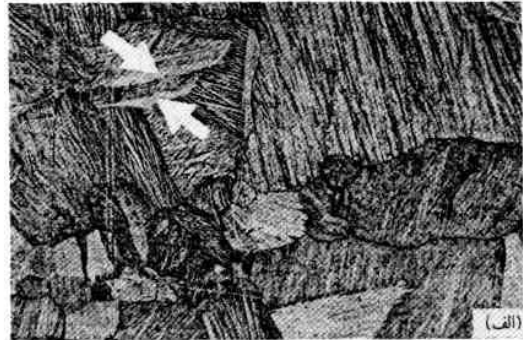
شکل ۴. تأثیر دما و تعداد چرخه‌های حرارتی بر مقاومت الکتریکی.



شکل ۷. تأثیر تعداد چرخه‌های حرارتی بر درصد مارتنزیت باقی مانده.



شکل ۸. تأثیر تعداد چرخه‌های حرارتی بر برگشت پذیری شکلی آلیاژ.



شکل ۶. تصویر ریزساختار آلیاژ: الف) بعد از آبدادن (X100؛ ب) پس از ۱۳۶ چرخه‌ی حرارتی X100. چند نمونه از تیغه‌های مارتنزیت، برای مقایسه با علامت فلش مشخص شده‌اند.

دمای پایداری مارتنزیت رسانده، آن را به میزان ۵۰° خم کردیم. سپس با افزایش دمای نمونه تا بالای دمای Af، میزان بازگشت زاویه (D) را اندازه گیری، و درصد حافظه‌داری شکل را با استفاده از زاویه‌ی اندازه گیری شده، از رابطه‌ی « $2D =$ برگشت پذیری شکلی» محاسبه کردیم. در شکل ۸ نتایج به دست آمده ارائه شده است.

پانویس

1. transformation temperature
2. quenching
3. thermal cycling
4. hysteresis
5. shape recovery
6. thermoelastic
7. dendrite
8. ageing
9. reversible
10. metallography

منابع

1. Otsuka, K. and Shimizu, K. "Pseudoelasticity and shape memory effects in alloys", *International Metals Reviews*, pp. 93-114, (1986).
2. Michael, A.D. and Hart, W.B. "SME brass, a new engineering material", *The Metallurgist and Materials Technologist*, p. 434, (1980).
3. Stoeckel, D. "Shape-memory alloys, prompt new actuator designs" *Advanced Materials and Processes*, **10/90**, pp. 33-38.
4. Borden, T. "Shape-memory alloys : forming a tight fit", *Mechanical Engineering*, pp. 67-72, (Oct. 1991).

5. Sadrnezhaad, K., Mashhadi, F. and Sharghi, R. "Heat treatment of Ni-Ti alloy for improvement of shape memory effect", *Materials and Manufacturing Processes*, **12**, No. 1, pp. 107-115, (1997).
6. Zarandi, F.M. and Sadrnezhaad, K. "Thermomechanical study in combustion synthesized Ti-Ni shape memory alloy", *Materials and Manufacturing Processes*, **12**, No. 6&9, pp. 1093-1105, (1997).
۷. محمدتیا، علی؛ حسینی، سعید؛ صدرزاد، خطیب‌الاسلام. پایان‌نامه کارشناسی مهندسی متالورژی دانشگاه صنعتی شریف، شهریور ۱۳۷۳.
8. Shimizu, K. "Ageing and thermal cycling effects in shape memory alloys", *J. Electron Microsc.*, **34**, No. 4, pp.277-288, (1985).
9. Li, J. and Ansell, G.S. "The effect of thermal cycling on the thermoelastic martensitic transformation in a Cu-Zn-Al alloy", *Metallurgical Transactions A.*, **14A**, pp. 1293-1297, (July, 1983).
10. Dunne, D.P. and Kennon, N.F. "The structure of martensite in a Cu-Zn-Al alloy", *Scripta Metallurgica*, **16**, pp. 729-734, (1982).
۱۱. صدرزاد، خطیب‌الاسلام و احمدیان، حمید. «خواص حافظه‌داری در آلیاژ مس-روی-آلومینیم». مجله استقلال، سال ۱۷، شماره ۲، اسفند ۱۳۷۷، صص. ۱۳۹-۱۵۳.