



گروه ملی صنعتی فولاد ایران



انجمن آهن و فولاد ایران



دانشگاه شهید چمران اهواز

سمپوزیوم فولاد ۸۷

۱۳ و ۱۴ اسفند ماه ۸۷

اهواز - دانشگاه شهید چمران

بررسی اثر محیط سرد کردن بر رفتار استحاله فازی آلیاژ حافظه‌دار

Fe-Mn-Si-Cr-Ni

آدلی آخوندزاده^۱، کریم زنگنه‌مدار^۲، سیدمهدی عباسی^۳

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه

۲ و ۳- مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

چکیده

در پژوهش حاضر تأثیر نرخ سرد شدن در محیط‌های کوره و آب بر رفتار استحاله فازی آلیاژ حافظه‌داری با ترکیب Fe-14Mn-5Si-9Cr-5Ni، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که با افزایش نرخ سرد شدن به دلیل افزایش فاز مارتنزیت متأثر از حرارت و به دنبال آن تشکیل مقادیر بیشتری از فاز مارتنزیت ϵ تحت تنش، رفتار حافظه‌داری به مقدار قابل توجهی بهبود یافته است. سایر نتایج حاکی از افزایش دماهای استحاله آستنیتی برای نرخ‌های بالای سرد کردن در نتیجه افزایش مارتنزیت‌های متأثر از حرارت و α تحت تنش می‌باشد.

کلمات کلیدی: آلیاژ حافظه‌دار پایه آهن، اثر حافظه‌داری، نرخ سرد کردن، استحاله فازی، دماهای استحاله آستنیتی، مارتنزیت متأثر از حرارت و تنش.

¹ adly_3596@yahoo.com

² zangenek@yahoo.com

³ sma_abbasi@yahoo.com

مقدمه

مطالعات نشان داده است که در آلیاژهای حافظه‌دار پایه آهن دو دگرگونی $\gamma \rightarrow \varepsilon$ یا $\gamma \rightarrow \alpha'$ بعد از اعمال تغییر شکل اتفاق می‌افتد [۱]. فاز مارتنزیت ε تحت تنش تنها فازی است که برای بهبود اثر حافظه‌داری مفید می‌باشد. [۲]. این فاز بوسیله حرکت معکوس نابجایی‌های جزئی شاکلی در جهت $\langle 112 \rangle / a/6$ بر روی صفحه (111) آستنیت تشکیل شده و در هنگام حرارت‌دهی با حرکت معکوس نابجایی‌های جزئی به فاز آستنیت، استحاله یافته و سبب بروز اثر حافظه‌داری می‌گردد [۳]. مارتنزیت α' تحت تنش به دلیل ممانعت از حرکت معکوس نابجایی‌های جزئی شاکلی و به دنبال آن کاهش استحاله $\gamma \rightarrow \varepsilon$ در طی حرارت‌دهی، رفتار حافظه‌داری آلیاژ را تضعیف می‌کند [۴، ۲]. مقدار این استحاله‌ها می‌تواند متأثر از عناصر آلیاژی و همچنین عملیات تربیت‌کردن یعنی دمای آویل، سرعت سردکردن، مقدار و دمای پیش‌کرنش و تعداد چرخه‌های عملیات تربیت‌کردن، متغیر باشد [۷-۵]. در این میان، کنترل نرخ سردکردن می‌تواند نقش بسیار موثری بر بهبود خواص حافظه‌داری داشته باشد. مطابق نتایج سایر محققین [۸]، با افزایش مقدار بهینه‌ای از مارتنزیت‌های ناشی از سرمایش، به دلیل تشکیل مناطق مستعدی همچون تقاطع و لبه‌های صفحات مارتنزیت متأثر از حرارت جهت جوانه‌زنی مارتنزیت‌های ε به هنگام بارگذاری، اثر حافظه‌داری به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است.

در تحقیق حاضر هدف، بررسی و تعیین میزان نرخ سرمایش مناسب، برای ایجاد ساختارهای فازی و در نتیجه اثر حافظه‌داری بهینه در یک آلیاژ پایه Fe-Mn-Si-Cr-Ni می‌باشد.

روش تحقیق

در این تحقیق، از یک آلیاژ حافظه‌دار پایه آهن با ترکیب 5.12Ni و 9.43Cr، 5.14Si، 14.25Mn، که توسط ذوب القائی تحت اتمسفر گاز آرگون تهیه شده، استفاده گردید. شمش‌های ریخته‌گی پس از همگن‌سازی، به صورت صفحاتی نورد گرم شدند و نهایتاً نمونه‌هایی توسط برش‌سیم^۱ تهیه و پس از آویل‌حل‌سازی در دو محیط کوره و آب سرد شده و اثر حافظه‌داری در آن‌ها با اعمال ۵ درصد پیش‌کرنش در محیط ازن مایع+هوا، بررسی و ارزیابی شده است. روش اعمال پیش‌کرنش و نیز تعیین میزان اثر حافظه‌داری قبلاً در مقاله دیگری آورده شده است [۷].

به منظور تحلیل رفتار حافظه‌داری، نمونه‌ها پس از اعمال کرنش تحت آزمون‌های مختلفی قرار گرفتند. جهت مشاهدات ریزساختاری، از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی (SEM) بهره گرفته شد و به منظور تشخیص کیفی استحاله‌های فازی، از دستگاه تفرق اشعه ایکس (XRD) Bruker مدل D4 با

^۱ Wire Cutting

تشعشع $\text{Cu-K}\alpha$ ($\alpha=1/542\text{\AA}$) و جهت تعیین دماهای استحاله A_s و A_f از آزمون DSC با دستگاه Dupont Instrument مدل 910S با نرخ گرم کردن $10^\circ\text{C}/\text{min}$ استفاده شد. در نهایت نمونه‌ها پس از اعمال پیش کرنش تحت آزمون ریزسختی سنجی قرار گرفتند.

نتایج و بحث

در جدول ۱ نتایج حاصل از تغییرات اثر حافظه‌داری با نرخ سرد شدن آورده شده است. با تغییر میزان نرخ سرمایش و کنترل مقدار مارتنزیت‌های متأثر از حرارت در ریزساختار می‌توان اثر حافظه‌داری را به مقدار قابل توجهی بهبود بخشید.

همانطور که در جدول مشاهده می‌گردد، میزان اثر حافظه‌داری با افزایش سرعت سرد کردن، افزایش یافته است. با افزایش مارتنزیت‌های متأثر از حرارت طی نرخ‌های بالاتر سرمایش، میزان استحکام فاز زمینه (آستنیت) افزایش خواهد یافت. افزایش استحکام فاز اولیه سبب ممانعت از تغییر شکل به صورت لغزش و همچنین کاهش تنش لازم جهت انجام استحاله‌های تحت تنش می‌گردد. لذا در یک شرایط ثابت اعمال پیش کرنش، مارتنزیت‌های ϵ تحت تنش بیشتری در نرخ‌های بالاتر سرد کردن تشکیل می‌شود. از طرف دیگر به هنگام برخورد صفحات مارتنزیت‌های متأثر از حرارت با مارتنزیت‌های تحت تنش، مقداری واریانت‌های جدید ممکن است در محل تقاطع آن‌ها شکل بگیرد. در نرخ‌های بالای سرد کردن، با افزایش مقدار مارتنزیت‌های متأثر از حرارت و تداخل آن‌ها با مارتنزیت‌های تحت تنش، تطبیق واریانت‌های مارتنزیت حرارتی با یکدیگر به راحتی صورت نگرفته و با جلوگیری از رشد مارتنزیت‌های تحت تنش، اثر حافظه‌داری کاهش خواهد یافت [۱۸،۹].

مارتنزیت‌های متأثر از حرارت که در ساختار کریستالی شکل می‌گیرند می‌توانند به عنوان نطفه جهت جوانه‌زنی مارتنزیت‌های تحت تنش عمل نمایند [۸]. بنابراین با افزایش نرخ سرد کردن میزان مارتنزیت متأثر از حرارت و به دنبال آن مارتنزیت تحت تنش بیشتری را در ساختار کریستالی می‌توان انتظار داشت. نتایج XRD ارائه شده در شکل ۱ برای نمونه‌های کوینچ شده در آب و نمونه‌های سرد شده در کوره، مؤید این موضوع می‌باشد. آنچنانکه مشاهده می‌گردد نمونه سرد شده در آب دارای پیک‌های مارتنزیتی (تحت تنش ϵ ، $\alpha(211)$ و متأثر از حرارت $\alpha(110)$) شدیدتری نسبت به نمونه سرد شده در کوره می‌باشد.

همانطور که ذکر گردید، با افزایش نرخ سرد کردن و بدنبال آن افزایش میزان فاز مارتنزیت ϵ تحت تنش، مقدار اثر حافظه‌داری افزایش یافته است. در شکل ۲ (الف و ب)، تصاویر متالوگرافی نمونه‌های کوینچ شده در آب و نمونه‌های سرد شده در کوره آورده شده است. مناطق به رنگ سفید، سیاه و

خاکستری به ترتیب مارتنزیت ϵ تحت تنش، مارتنزیت α' تحت تنش و آستنیت بوده و مناطق تیغه‌ای شکل با واریانت‌های مختلف که بر روی یک دیگر قرار گرفته‌اند مارتنزیت‌های متأثر از حرارت می‌باشند [۴،۱۰]. این وضعیت در تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی قابل رویت است.

با توجه به تصاویر متالوگرافی، در ساختار کریستالی نمونه‌های سرد شده در کوره، مقادیر کمتری مارتنزیت ϵ تحت تنش (به سبب کاهش تشکیل مارتنزیت ناشی از سرمایش) مشاهده می‌شود. این موضوع با نتایج ریز سختی سنجی که در آن نمونه کویچ شده در آب به میزان 35HV سخت‌تر از نمونه سرد شده در کوره می‌باشد منطبق است (شکل ۳).

نتایج حاصل از آزمون DSC به همراه تغییرات دماهای استحاله آستنیتی با محیط سرد کردن، در شکل ۴ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در نمونه کویچ شده در آب، دماهای استحاله A_s و A_f به میزان ۱۰ تا ۱۵ درجه سانتیگراد نسبت به نمونه سرد شده در کوره افزایش یافته است. مطابق با نتایج XRD، در صورتی که نرخ سرد شدن زیاد باشد، علاوه بر مارتنزیت‌های ناشی از سرمایش، مارتنزیت‌های α' تحت تنش بیشتری نیز در ریزساختار تشکیل و سبب جلوگیری از استحاله معکوس $\gamma \rightarrow \epsilon$ طی حرارت‌دهی و بدنبال آن کاهش بازیابی شکل و اثر حافظه‌داری می‌گردد [۱۸،۹]. لذا برای نمونه‌های سرد شده در سرعت‌های بالا به اعمال نیرو محرکه (حرارت) بیشتری جهت انجام استحاله معکوس نیاز می‌باشد.

نتیجه‌گیری

- ۱- با افزایش نرخ سرد کردن به دلیل تشکیل و افزایش مارتنزیت‌های متأثر از حرارت و متعاقب آن ایجاد مارتنزیت تحت تنش بیشتر، خواص حافظه‌داری افزایش می‌یابد.
- ۲- دماهای استحاله آستنیتی با افزایش نرخ سرد کردن به دلیل تشکیل مارتنزیت‌های متأثر از حرارت و همچنین وقوع استحاله مارتنزیت α' تحت تنش افزایش یافته است.

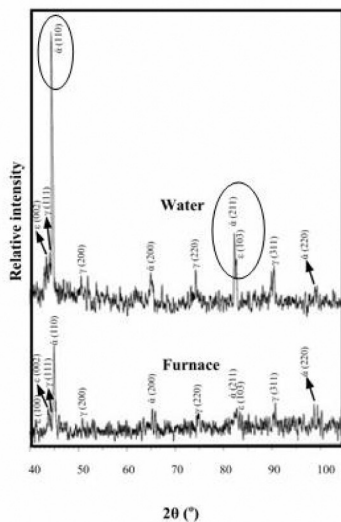
مراجع

- [1] Q. Gu, L. Federzoni, W. Y. Jang, J. Van. Humbeek, G. Guenin and L. Delaey, " $\gamma \rightarrow \epsilon$ and $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$ Transformation in a Fe-Mn-Si Based Shape Memory Steel", Pro. Shape Memory Materials and Hydrides, Held in Kanazawa, 1994, pp. 488-492.
- [2] J. S. Robinson and P. G. McCormick, Fahr, "Factors Influencing Shape Memory Behaviour in Fe-Mn-Si alloy", Scripta, 1989, 23, pp. 1975-1978.
- [3] K. Tszuzaki, M. Ikegami, Y. Tomota, Y. Kurokawa, W. Nakagawara and T. Maki, "Effect of Thermal Cycling on The Martensitic Transformation in an Fe-24Mn-6Si Shape Memory Alloy", Mat. Trans., 1992, 33, 3, pp. 263-270.

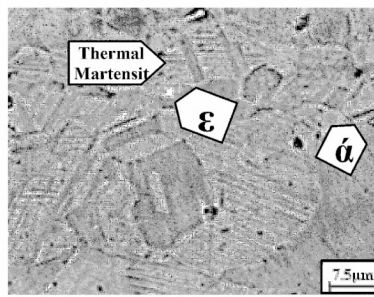
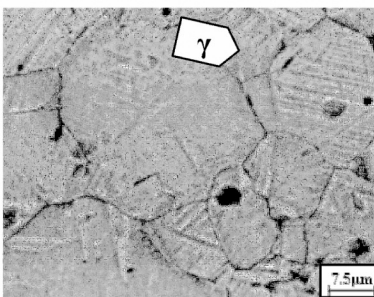
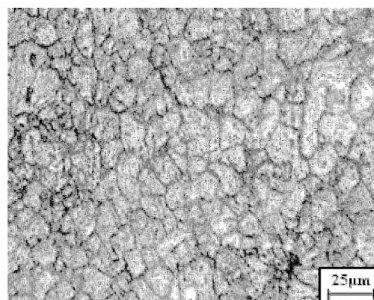
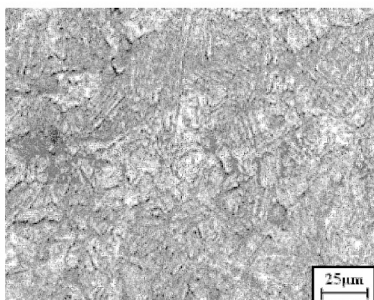
- [4] Q. Gu, J. Humbeeck and L. Delaey, "On the Improvement of Shape Memory Effect in Fe-16Mn-5Si-9Cr-4Ni Alloys by Thermomechanical Treatment", *Scrip. Met.*, 1994, 30, 12, pp. 1587-1592.
- [5] H. Li, D. Dunne, N. Kennon, "Factors Influencing Shape Memory Effect and Phase Transformation Behaviour of Fe-Mn-Si Based Shape Memory Alloys" , *Mat. Sci. Eng. A*, 1999, 273-275, pp. 517-523.
- [6] J. Bohong, S. Limin, L. Ruchun and T. Y. Hsu (Xu Zuyao), "Influence of Grain Size of Austenite on M_s and SME in Fe-Mn-Si-Cr Alloys", *Pro. Shape Memory Materials and Hydrides*, Held in Kanazawa, 1994, pp. 496-501.
- [7] A. Akhondzadeh, K. Zangeneh and S.M. Abbasi, "Influence of Annealing Temperature on the Shape Memory Effect of Fe-14Mn-5Si-9Cr-5Ni Alloy After Training Treatment", *Mat. Sci. Eng. A*, 2008, 489, p. 267-272.
- [8] J.V Humbeeck, G. GU, and L.Delaey, "Shape Memory Behaviour of a Fe-Mn-Si-Cr-Ni steel", *Pro. Int. Sym. Exh. Sha. Mem. Mat.*, 1994, pp. 469-473.
- [9] D. Wang, 2000, "Effect of pre-Deformation temperature on reverse transformation characteristic in Fe-Mn-Si based alloys", *Shape Memory Materials*, (Edited by T. Saburi), *Pro. Int. Sym. Exh. Sha. Mem. Mat. (SMM 99)*, held in Kanazawa, Japan pp. 251-254.
- [10] N. Bergeon, G. Guenin, C. Esnouf, "Microstructural Analysis of The Stress-Induced ϵ martensite in a Fe-Mn-Si-Cr-Ni shape memory alloy: Part I-calculated description of the microstructure", *Mat. Sci. Eng.*, 1998, Vol A. 242, pp 77-86.

جدول ۱. تغییرات اثر حافظه‌داری با تغییر نوع محیط سرد کردن.

آب	کوره	محیط سرد کردن
۷۵	۶۱	اثر حافظه‌داری (%)



شکل ۱. آنالیز XRD نمونه‌های کوبنج شده در آب و نمونه‌های سرد شده در کوره.

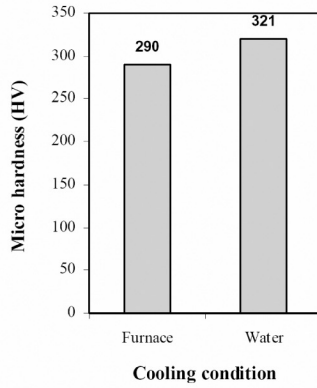


(ب)

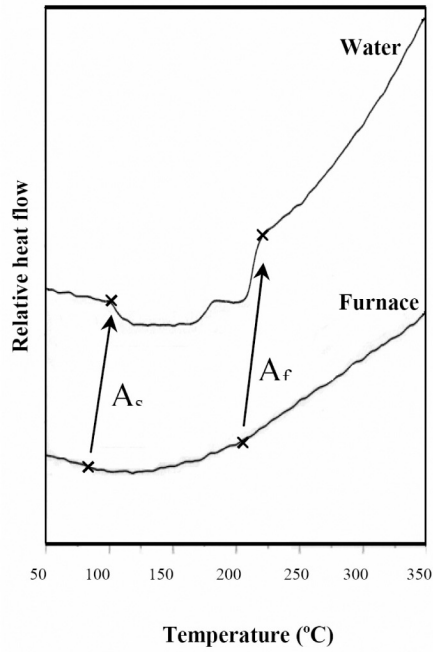
(الف)

شکل ۲. ریز ساختار نمونه‌های الف) کوبنج شده در آب و ب) سرد شده در کوره.

دو تصویر بالایی مربوط به تصاویر حاصل از میکروسکوپ نوری و دو تصویر پایینی مربوط به تصاویر حاصل از SEM می‌باشد).



شکل ۳. نتایج ویزسختی سنجی بر اساس نوع نرخ سرد کردن.



شکل ۴. منحنی‌های DSC و دماهای A_f و A_c نمونه‌های سرد شده با نرخ‌های متفاوت سرمایش.