



تأثير نرخ کرنش بر رفتار سوپرالاستيک آلياژ حافظه دار NiTi تحت کرنش بالا

سميه نورمحمدزاده^۱، سيد مجتبي زيرجدآ، سيد عبدالکريم سجادي^۲

دانشکده مهندسي، دانشگاه فردوسي مشهد

چکیده

استحاله مارتنزیتی متأثر از تنش (Stress-Induced Martensitic) شدیداً وابسته به دماست و نرخ کرنش با تأثیر مستقیم بر دمای ماده، نقش مهمی در تعیین رفتار سوپرالاستیک بازی می‌کند. در تحقیق حاضر منحنی‌های تنش-کرنش سیم حافظه دار NiTi، به منظور بررسی رفتار سوپرالاستیک در نرخ‌های کرنش مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور آزمون کشش در محدوده نرخ کرنش $0.06/min$ تا $1/2/min$ و دامنه کرنش 10% ، در دمای اتاق انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ کرنش، ناحیه تنش ثابت در مرحله بارگذاری به سمت بالا جابجا می‌شود و ناحیه تنش ثابت در مرحله باربرداری ابتدا به سمت پایین و سپس به بالا جابجا می‌گردد. همچنین با افزایش نرخ کرنش، کرنش دائمی افزایش و کرنش سوپرالاستیک ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت.

واژه های کلیدی: رفتار سوپرالاستیک، استحاله مارتنزیتی متأثر از تنش، نرخ کرنش، ناحیه تنش ثابت، کرنش دائمی، کرنش سوپرالاستیک

۱- کارشناس ارشد

۲- دانشیار

۳- دانشیار

تأثير نرخ کرنش بر رفتار سوپرالاستيک آلياژ حافظه دار NiTi تحت کرنش بالا

سميه نورمحمدزاده^۱، سيد مجتبي زبرجد^۲، سيد عبدالکريم سجادي^۳

چکيده

استحاله مارتنزيتي متأثر از تنش (Stress-Induced Martensitic) شديداً وابسته به دماست و نرخ کرنش با تأثير مستقيم بر دماي ماده، نقش مهمي در تعيين رفتار سوپرالاستيک بازي مي کند. در تحقيق حاضر منحنی های تنش-کرنش سيم حافظه دار NiTi، به منظور بررسی رفتار سوپرالاستيک در نرخ های کرنش مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور آزمون کشش در محدوده نرخ کرنش ۰/۰۰۶/min تا ۱/۲/min و دامنه کرنش ۱۰٪، در دمای اتاق انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ کرنش، ناحیه تنش ثابت در مرحله بارگذاری به سمت بالا جابجا می شود و ناحیه تنش ثابت در مرحله باربرداری ابتدا به سمت پایین و سپس به بالا جابجا می گردد. همچنین با افزایش نرخ کرنش، کرنش دائمی افزایش و کرنش سوپرالاستيک ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت.

واژه های کلیدی: رفتار سوپرالاستيک، استحاله مارتنزيتي متأثر از تنش، نرخ کرنش، ناحیه تنش ثابت، کرنش دائمی، کرنش

سوپرالاستيک

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، nourmohammadzadeh@gmail.com

۲- دانشيار گروه مواد و متالورژی دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشيار گروه مواد و متالورژی دانشگاه فردوسی مشهد

مقدمه

استحاله‌های مارتنزیتی در آلیاژ حافظه‌دار NiTi موجب ایجاد ویژگی‌های منحصر به فرد حافظه‌داری و سوپرالاستیک می‌شود که آنها را از دیگر مواد متمایز می‌کند. رفتار سوپرالاستیک در حالتی رخ می‌دهد که نمونه در فاز آستنیتی قرار دارد. در این حالت اعمال نیروی به اندازه کافی بزرگ موجب می‌شود که نمونه پس از رسیدن به یک تنش بحرانی دچار استحاله مارتنزیتی از آستنیت به مارتنزیت شود که به صورت یک ناحیه تنش ثابت در منحنی تنش-کرنش ظاهر می‌گردد. اگر باربرداری صورت گیرد استحاله مارتنزیتی بازگشتی رخ می‌دهد و در یک تنش ثابت مارتنزیت به آستنیت تبدیل می‌شود. در نتیجه این رفتار یک حلقه هیستریزیس در طول یک سیکل بارگذاری و باربرداری در منحنی‌های تنش-کرنش ایجاد می‌شود. این رفتار موجب می‌شود که نمونه پس از صرف انرژی تغییر شکل بالا در طول بارگذاری، مقدار زیادی از این انرژی را در طول باربرداری بازیابی کند. این انرژی قابل بازیابی که به عنوان ظرفیت جذب ماده در نظر گرفته می‌شود، مربوط به اصطکاک درونی ماده است که در طول حرکت فصل مشترک بین واریانت‌های مارتنزیتی و مرزهای فازی زمینه آستنیتی رخ می‌دهد [۱].

آزمایش کشش در نرخ‌های کرنش مختلف با تغییر تنش‌های بحرانی استحاله‌های مارتنزیتی رفت و برگشت و روند استحاله‌ها موجب تغییر رفتار سوپرالاستیک می‌شود و بر مقدار انرژی‌های تغییر شکل و قابل بازیابی اثر می‌گذارد.

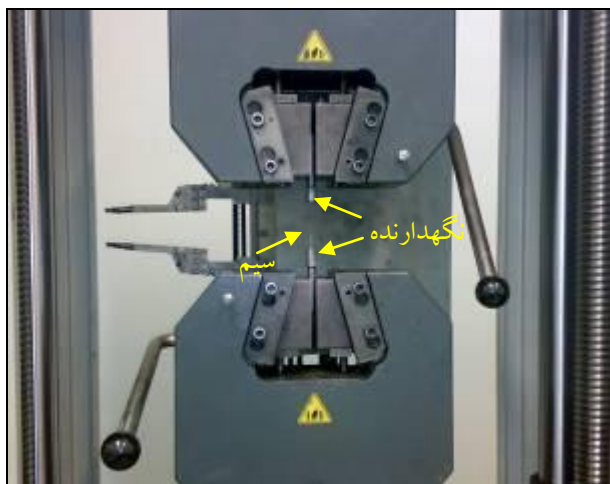
در این تحقیق اثر نرخ کرنش بر رفتار استحاله مارتنزیتی متأثر از تنش به کمک آزمون کشش بررسی شد و پارامترهای به دست آمده از این منحنی مورد مقایسه قرار گرفت.

مواد و روش تحقیق

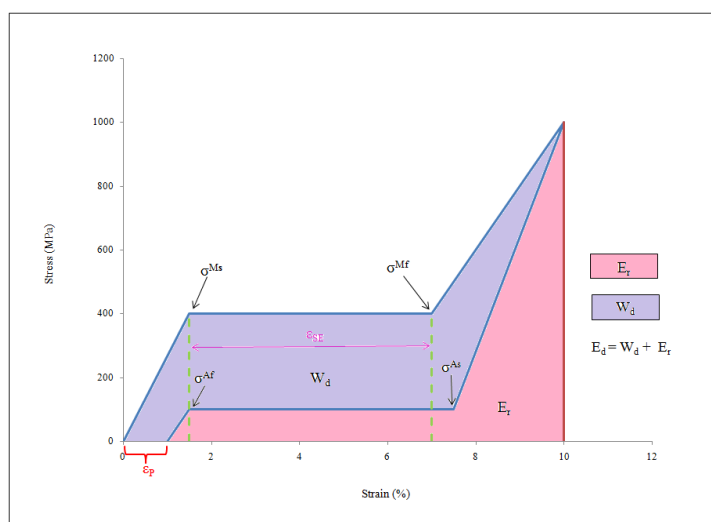
در این تحقیق، از سیم‌های حافظه‌دار NiTi با ترکیب شیمیایی غنی از نیکل استفاده شد. نمونه‌های مورد آزمایش دارای مقطع دایره و قطر ۰/۴۶mm بودند. به منظور انجام آزمایش کشش از دستگاه کشش Zwick با لودسل ۲۵۰KN استفاده شد. برای انجام این آزمایش نگهدارنده‌ای با طراحی ساده ساخته شد. شکل ۱ این نگهدارنده به همراه سیم داخل آن و نحوه قرارگیری آن در دستگاه کشش را نشان می‌دهد. طول نمونه‌ها جهت آزمایش کشش ۸۰mm انتخاب شد. آزمایش کشش سیکلی در نرخ‌های کرنش ۰/۰۰۶/min، ۰/۰۲/min، ۰/۰۶/min، ۱/۲/min تا حداکثر کرنش ۱۰٪ در دمای اتاق انجام شد. جهت بررسی مشخصات منحنی‌های تنش-کرنش در نرخ‌های کرنش مختلف پارامترهای مربوطه از این منحنی‌ها استخراج شدند که در زیر آورده شده‌اند.

σ^{Ms} ، تنش اولیه استحاله پیشرونده به مارتنزیت. σ^{Mf} ، تنش پایانی استحاله پیشرونده به مارتنزیت. σ^{As} ، تنش اولیه

استحاله بازگشتي به آستنيت. σ^{Af} ، تنش پاياني استحاله بازگشتي به آستنيت. E_d ، انرژي تغيير شکل که انرژي مورد نیاز برای تغيير شکل ماده تا کرنش ماکزيمم است. این انرژي از مساحت زیر منحنی بارگذاري به دست می آید و بر حسب انرژي بر واحد حجم می باشد. E_r ، انرژي قابل بازیابی که از مساحت زیر منحنی باربرداري به دست می آید و بر حسب انرژي کرنش قابل بازیابی بر واحد حجم می باشد. W_d ، انرژي هدر رفته که از مساحت درون حلقه هیستریزيس در طول یک سیکل بارگذاري - باربرداري به دست می آید و بر حسب کار هدر رفته بر واحد حجم می باشد. ϵ_{SE} ، تغییر شکل سوپرالاستیک در طول استحاله SIM که از اندازه گیری کرنش در امتداد ناحیه تنش ثابت در مرحله بارگذاري به دست می آید. ϵ_p ، کرنش دائمی غير قابل بازیابی. شکل ۲ این پارامترها را بر روی یک منحنی تنش - کرنش شماتیک نشان می دهد.



شکل ۱. تصویر دستگاه کشش به همراه نگهدارنده و سیم.



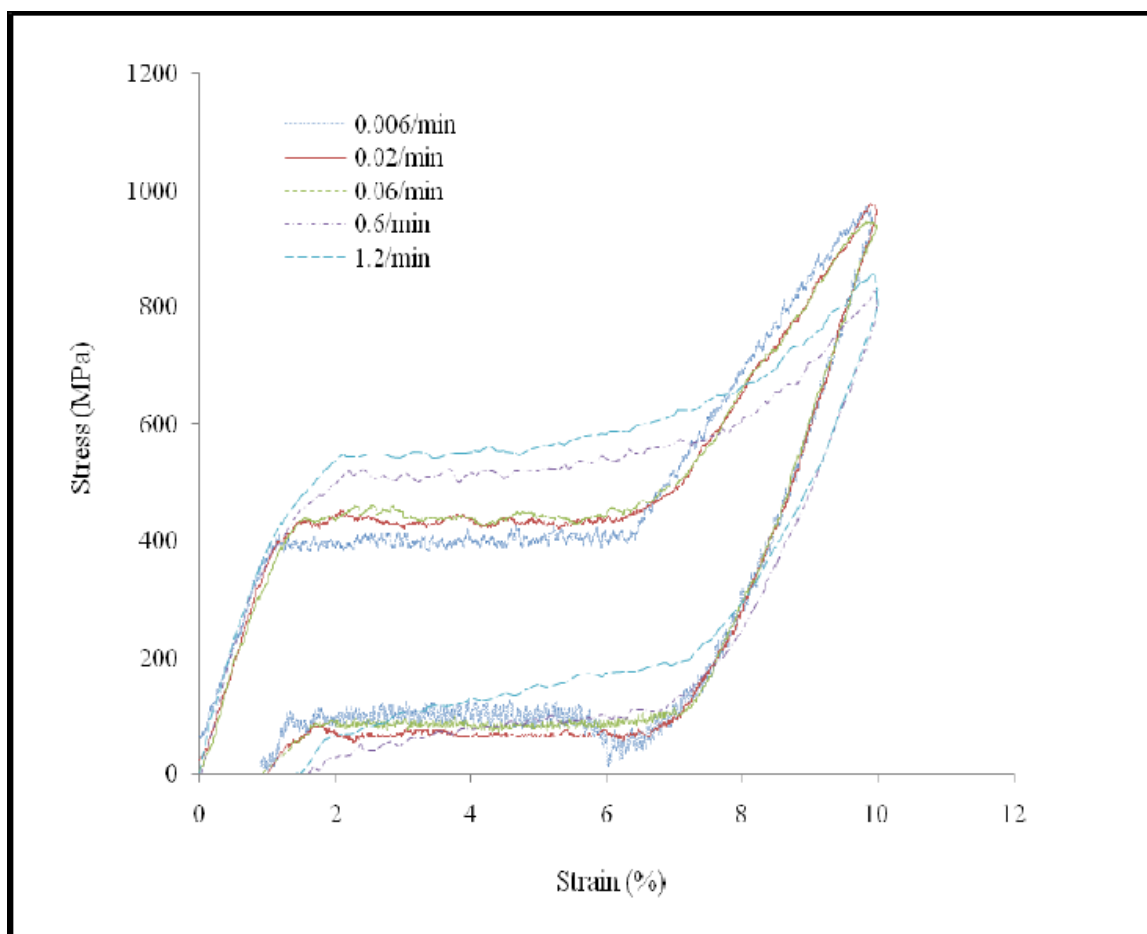
شکل ۲. منحنی تنش - کرنش آلیاژ حافظه دار NiTi.

نتایج و بحث

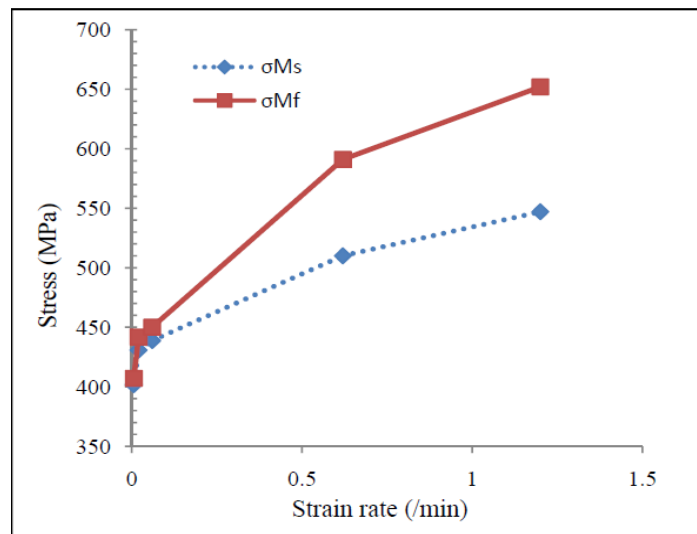
۱- تأثیر نرخ کرنش بر تنش‌های استحاله‌های مارتنزیتی

شکل ۳ منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها را در نرخ‌های کرنش مختلف نشان می‌دهد. شکل ۴ تغییرات σ^{Ms} و σ^{Mf} با افزایش نرخ کرنش را نشان می‌دهد. در نرخ کرنش $0.006/\text{min}$ که در محدوده نرخ‌های کرنش شبه استاتیک^۱ قرار دارد، ناحیه‌های تنش ثابت در مراحل بارگذاری و باربرداری به صورت کاملاً یکنواخت ظاهر می‌شوند. در نرخ‌های کرنش بالاتر با افزایش نرخ کرنش، σ^{Ms} و σ^{Mf} افزایش می‌یابند. σ^{Ms} در نرخ کرنش $0.006/\text{min}$ ، حدود 40MPa و در نرخ کرنش $1/2/\text{min}$ حدود 550MPa می‌باشد. همچنین تغییرات σ^{Mf} از 420MPa تا 650MPa است. در نتیجه با افزایش نرخ کرنش، ناحیه تنش ثابت در مرحله بارگذاری به سمت بالا جابجا می‌شود. استحاله مارتنزیتی رفت یک استحاله گرمازا و استحاله مارتنزیتی بازگشت یک استحاله گرماگیر است. در دماهای بالاتر، استحاله SIM پیشرونده در تنش‌های بالاتر رخ می‌دهد و در دماهای پایین‌تر استحاله SIM بازگشتی در تنش‌های پایین‌تر انجام می‌شود. هنگامی که نرخ کرنش در محدوده $0.006/\text{min}$ است، زمان کافی برای تبادل گرمای استحاله با محیط و نگهدارنده آزمون کشش وجود دارد. بنابراین دمای نمونه تغییر نمی‌کند و می‌توان فرض کرد که تغییر شکل به صورت یک فرایند هم‌دما انجام می‌شود و تنش‌های استحاله در طول استحاله ثابت باقی می‌مانند [۱]. با افزایش نرخ کرنش به مقادیر بالاتر زمان قابل دستیابی برای تبادل حرارت با محیط کاهش می‌یابد. در نتیجه در طول استحاله SIM رفت، دما افزایش می‌یابد و نمونه اصطلاحاً دچار خود گرمایش^۲ می‌شود. بنابراین استحاله SIM رفت در تنش‌های بالاتری انجام می‌شود [۳]. همچنین پس از شروع استحاله به دلیل افزایش تدریجی دما با افزایش مقدار کرنش، تغییرات تنشی در انتهای استحاله نسبت به شروع آن بیشتر است و ناحیه تنش ثابت به صورت شیب‌دار پدیدار می‌شود [۲ و ۴]. در نرخ کرنش $0.006/\text{min}$ ، در طول بارگذاری، تغییر شکل الاستیکی نمودار شامل سه قسمت می‌شود، اما در نرخ‌های کرنش بالاتر، تغییر شکل الاستیکی نمودار شامل چهار قسمت می‌شود. به ویژه در منحنی‌های تنش-کرنش مربوط به نرخ‌های کرنش $0.006/\text{min}$ و $1/2/\text{min}$ ، این موضوع به طور واضح مشاهده می‌شود. یک ناحیه میانی بین بخش‌های تشکیل SIM و تغییر شکل الاستیکی مارتنزیت وجود دارد که مقدار شیب آن بین مقادیر شیب این دو بخش قرار دارد. این ناحیه در نتایج مقالات پیشین گزارش شده است [۲]. شیب این ناحیه نشان می‌دهد که در این ناحیه تشکیل SIM و تغییر شکل الاستیکی آن به طور هم‌زمان رخ می‌دهد و این دو مرحله در این ناحیه با هم، هم‌پوشانی دارند و با افزایش نرخ کرنش طول این ناحیه افزایش می‌یابد.

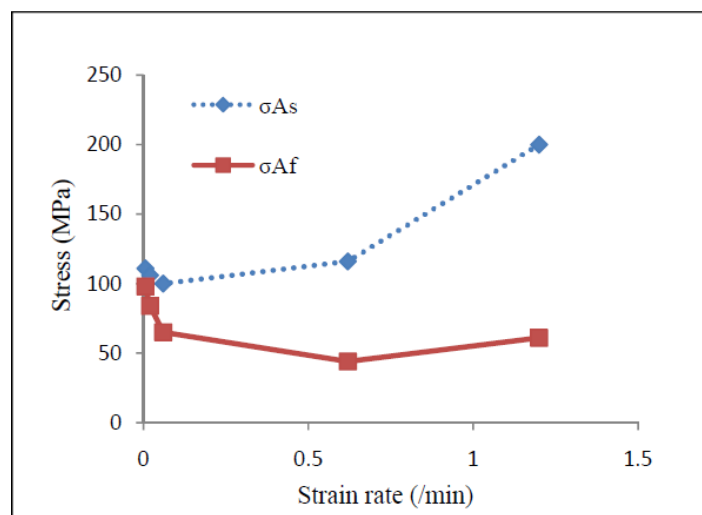
شکل ۵ تغییرات σ^{As} و σ^{Af} با افزایش نرخ کرنش را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که σ^{As} و σ^{Af} با افزایش نرخ کرنش ابتدا تغییرات کاهشی اندکی نشان می‌دهند و سپس σ^{As} افزایش شدیدی می‌یابد و σ^{Af} روند کاهشی را ادامه داده و با افزایش نرخ کرنش تا $1/2/min$ افزایش می‌یابد. با توجه به تغییرات σ^{As} و σ^{Af} در این شکل و شکل ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ کرنش شیب ناحیه تنش ثابت افزایش می‌یابد. از آنجا که در استحالۀ SIM بازگشتی با افزایش نرخ کرنش تا $0/06/min$ ، دمای نمونه کاهش می‌یابد، ناحیه تنش ثابت در مرحله باربرداری در تنش‌های پایین‌تری رخ می‌دهد. افزایش ناگهانی σ^{As} در نرخ‌های کرنش بسیار بالا به این دلیل است که در پایان مرحله بارگذاری افزایش دمای نمونه‌ها نسبت به نرخ‌های کرنش پایین‌تر بسیار بیشتر است. بنابراین در آغاز باربرداری نمونه‌ها در دمای بالایی قرار دارند و همان‌طور که گفته شد به دلیل گرماگیر بودن استحالۀ SIM بازگشتی تنش شروع استحالۀ بالاتر خواهد بود [۲]. از آنجا که استحالۀ SIM بازگشتی گرماگیر است در طول استحالۀ بازگشتی دمای نمونه کاهش خواهد یافت و σ^{Af} در تنش‌های پایین‌تری رخ می‌دهد.



شکل ۳. منحنی تنش-کرنش در نرخ‌های کرنش مختلف.



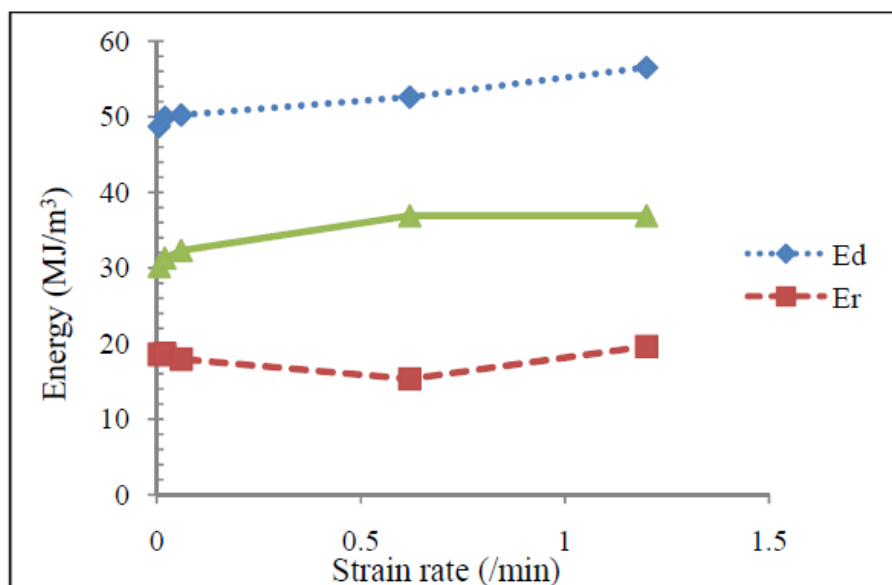
شکل ۴. تغییرات تنش‌های استحاله SIM پیشرونده با افزایش نرخ کرنش.



شکل ۵. تغییرات تنش‌های استحاله SIM بازگشتی با افزایش نرخ کرنش.

۲- تأثیر نرخ کرنش بر انرژی‌های E_d ، E_r و W_d

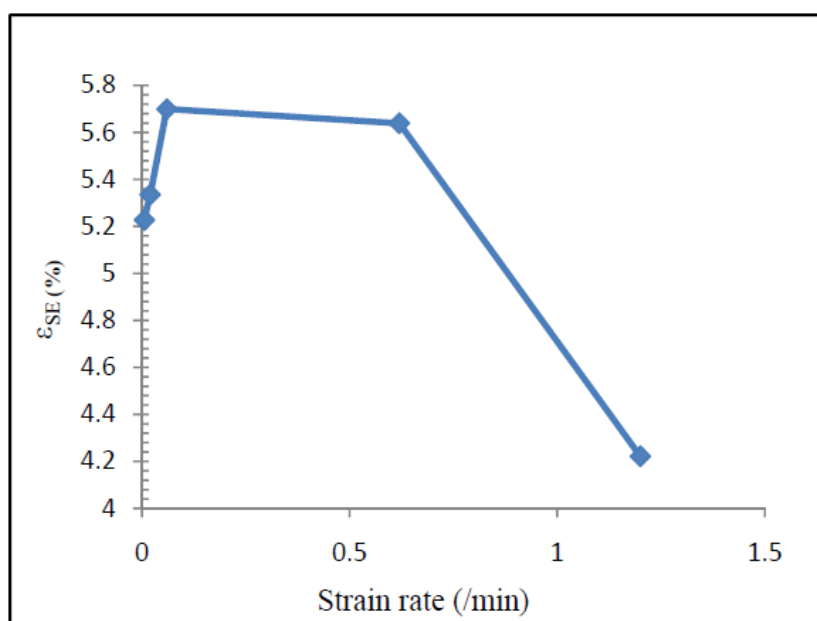
در شکل ۶ تغییرات E_d ، E_r و W_d با افزایش نرخ کرنش رسم شده است. این تغییرات مطابق با تغییرات تنش‌های استحاله در شکل‌های ۳ و ۴ و ۵ می‌باشد. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ کرنش تا نرخ کرنش $0.6/min$ ، E_d افزایش، E_r کاهش و W_d افزایش می‌یابد. به دلیل افزایش σ^{Ms} و σ^{Mf} با افزایش نرخ کرنش، E_d افزایش می‌یابد و به دلیل کاهش σ^{As} و σ^{Af} با افزایش نرخ کرنش E_r کاهش می‌یابد و W_d تحت تأثیر این دو پارامتر افزایش می‌یابد. هنگامی که نرخ کرنش از مقدار $0.6/min$ بالاتر می‌رود، E_d همچنان افزایش می‌یابد، E_r نیز افزایش و W_d کاهش می‌یابد و در این نرخ کرنش کمترین E_r و بیشترین W_d به دست می‌آید. از آنجا که σ^{Ms} و σ^{Mf} با افزایش نرخ کرنش همچنان افزایش می‌یابند، E_d نیز افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات E_r و W_d ناشی از تغییرات σ^{As} و σ^{Af} می‌باشد.



شکل ۶. تغییرات انرژی تغییر شکل (E_d)، انرژی قابل بازیابی (E_r) و کار تلف شده (W_d) با افزایش نرخ کرنش.

۳- تأثیر نرخ کرنش بر کرنش سوپرالاستیک

شکل ۷ تغییرات ϵ_{SE} با افزایش نرخ کرنش را نشان می‌دهد. با افزایش نرخ کرنش تا نرخ کرنش $0.06/min$ ، ϵ_{SE} افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. ϵ_{SE} عمدتاً مربوط به تغییر شکل شبکه در طول استحاله فازی می‌شود [۵]. تغییر شکل در تنش ثابت می‌تواند تحت تأثیر عوامل دیگری در نتیجه واکنش سرتاسری ماده نیز باشد. این عوامل شامل تغییر شکل آستنیت باقی‌مانده، افزایش دانسیته نابجایی در بارهای بالا یا تغییر دما با افزایش نرخ کرنش می‌باشد. بنابراین افزایش اولیه نشان داده شده در شکل ۷ به این دلیل است که با افزایش نرخ کرنش، استحاله SIM نهایی در سطوح کرنش بالاتری رخ می‌دهد. در رابطه با کاهش ϵ_{SE} که با افزایش بیشتر نرخ کرنش رخ می‌دهد می‌توان گفت در این حالت توده‌های آستنیت باقی‌مانده نیاز به تنش بیشتری برای استحاله به مارتنزیت دارند. بنابراین در کرنش پایین‌تر سطح تنش بالاتر رفته و ϵ_{SE} کاهش می‌یابد [۳].



شکل ۷- تغییرات ϵ_{SE} با افزایش نرخ کرنش.

۴- تأثیر نرخ کرنش بر کرنش دائمی

ϵ_p وابسته به دامنه کرنش و دمای تغییر شکل است [۶]. با توجه به منحنی‌های تنش-کرنش در شکل ۳ مشاهده می‌شود که پس از باربرداری مقدار قابل توجهی ϵ_p در نمونه باقی مانده است. مشاهده می‌شود که در نرخ‌های کرنش بالا مقدار ϵ_p پس از باربرداری در نمونه افزایش می‌یابد. همان‌طور که قبلاً گفته شد وجود ϵ_p در این منحنی نشان‌دهنده این است که فاز SIM پس از استحاله دچار تغییر شکل پلاستیک شده است. با توجه به اینکه در نرخ‌های کرنش بالا، مقدار ϵ_p افزایش یافته است می‌توان نتیجه گرفت که خود گرمایش نمونه در نرخ-های کرنش بالا موجب کاهش شبکه نابجایی‌ها و کاهش استحکام زمینه می‌شود و بنابراین مقدار تنش بحرانی مورد نیاز برای لغزش کاهش می‌یابد و فاز SIM سریع‌تر وارد منطقه تغییر شکل پلاستیکی می‌شود.

نتیجه‌گیری

- ۱- افزایش نرخ کرنش موجب شد که سطح تنش ناحیه تنش ثابت در مرحله بارگذاری افزایش و سطح تنش ناحیه تنش ثابت در مرحله باربرداری ابتدا کاهش و سپس افزایش یابد.
- ۲- با افزایش نرخ کرنش انرژی تغییر شکل مطابق با افزایش سطح تنش ناحیه تنش ثابت در مرحله بارگذاری افزایش یافت.

۳- انرژی قابل بازیابی با افزایش نرخ کرنش ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت که مطابق با تغییرات سطح

تنش ناحیه تنش ثابت در مرحله باربرداری بود.

۴- با افزایش نرخ کرنش، کرنش سوپرالاستیک ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت.

۵- افزایش نرخ کرنش موجب افزایش کرنش دائمی گردید.

مراجع

1. J.V. Humbeeck, J. Stoiber, L. Delaey, R. Gotthardt, "The High Damping CaPacity of shape memory alloys", Z. Metallkd., 86, 1995, 176-183.
2. G.N. Dayananda, M. Subba Rao, "Effect of strain rate on properties of superelastic NiTi thin wires", Materials Science and Engineering A, 486, 2008, 96-103.
3. J. Zurbitu, G. Castillo, I. Urrutibeascoa, J. Aurrekoetxea, "Low-energy tensile-impact behavior of superelastic NiTi shape memory alloy wires", Mechanics of Materials, 41, 2009, 1050-1058.
4. J. Zurbitu, S. Kustov, G. Castillo, L. Aretxabaleta, E. Cesari, J. Aurrekoetxea, "Instrumented tensile-impact test method for shape memory alloy wires", Materials Science and Engineering A, 524, 2009, 108-111.
5. K. Otsuka, C.M. Wayman, Shape Memory Materials, Cambridge University Press, 1998.
6. S. Nemat-Nasser, W.G. Guo, "Superelastic and cyclic response of NiTi SMA at various strain rates and temperatures", Mechanics of Materials, 38, 2006, 463-473. J.V. Humbeeck, J. Stoiber, L. Delaey, R. Gotthardt, The High Damping CaPacity of shape memory alloys, Z. Metallkd., 1995, Vol. 86, pp 176-183.

Effect of strain rate on superelastic behavior of NiTi shape memory alloy under large strain

S. Nourmohammadzadeh*, S.M. Zebarjad. S.A. Sajjadi, S.M.S. Aghamiri

** Materials and metallurgical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Box 91775-1111, Mashhad, Iran.
nourmohammadzadeh@gmail.com*

Abstract

Stress Induced Martensitic (SIM) transformation is strongly induced by temperature. Strain rate influences on temperature of material and plays an important role in determination of superelastic behavior. In the present paper, the stress-strain curves of NiTi shape memory wire studied to investigate superelastic behavior in various strain rates. The tensile test was done in the range 0.006-1.2/min strain rates for strain amplitude of 10%. The results revealed that forward SIM transformation stresses increase with strain rate. Reverse SIM transformation stresses first decreased and then increased by increase in the strain rate. Also the permanent strain increased and superelastic strain first increased and then decreased as the strain rate increased.

Keywords: Stress induced martensitic transformation, Strain rate, Superelastic behavior , Stress plateau, Permanent strain, superelastic strain