

به نام خدا



# مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

[www.Iran-mavad.com](http://www.Iran-mavad.com)



## بررسی اثر میزان پیش کرنش خمشی بر رفتار استحاله فازی

### آلیاژ حافظه‌دار Fe-14Mn-9Cr-5Si-5Ni

آدلی آخوندزاده<sup>۱</sup>، سیدمهدی عباسی<sup>۲</sup>، کریم زنگنه‌مدار<sup>۳</sup>

#### چکیده

در پژوهش حاضر تاثیر میزان پیش کرنش خمشی به صورت تابعی از ضخامت نمونه‌ها در یک قطر خم کاری ثابت، بر رفتار استحاله فازی آلیاژ حافظه‌دار Fe-14Mn-9Cr-5Si-5Ni مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت نمونه‌ها و در نتیجه افزایش کرنش خمشی، اثر حافظه‌داری بواسطه تشکیل مارتنزیت  $\alpha$  تحت تنش در ریزساختار کاهش می‌یابد. این موضوع همچنین سبب افزایش نیروی محرکه لازم جهت انجام استحاله  $\gamma \rightarrow \epsilon$ ، و افزایش دماهای استحاله آستنیتی می‌گردد. در مقابل در کرنش‌های پایین به دلیل وجود مقادیر کافی مارتنزیت  $\epsilon$  تحت تنش در ریزساختار، اثر حافظه‌داری بالایی حاصل شده است.

**واژه‌های کلیدی:** آلیاژ حافظه‌دار پایه آهن، ریزساختار، رفتار استحاله فازی، پیش کرنش خمشی، مارتنزیت تحت تنش.

#### مقدمه

مطالعات نشان داده است که در آلیاژهای حافظه‌دار پایه آهن دو دگرگونی  $\gamma \rightarrow \epsilon$  یا  $\gamma \rightarrow \alpha'$  بعد از اعمال تغییر شکل اتفاق می‌افتد [۱]. مقدار این استحاله می‌تواند متأثر از عناصر آلیاژی و همچنین عملیات تربیت کردن یعنی دمای آنیل، سرعت سرد کردن، مقدار و دمای پیش کرنش و تعداد چرخه‌های عملیات تربیت کردن، متغیر باشد [۲-۵]. در این میان، کنترل میزان اعمال پیش کرنش می‌تواند نقش بسیار موثری بر نحوه وقوع استحاله فازی آلیاژ داشته باشد [۶، ۳]. فاز مارتنزیت  $\epsilon$  تحت تنش تنها فازی است که برای بهبود اثر حافظه‌داری ترجیح داده می‌شود [۷، ۶]. 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 [۹، ۸]. مارتنزیت  $\alpha$  تحت تنش (ایجاد شده در طی تغییر شکل اضافی) به دلیل ممانعت از حرکت معکوس

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

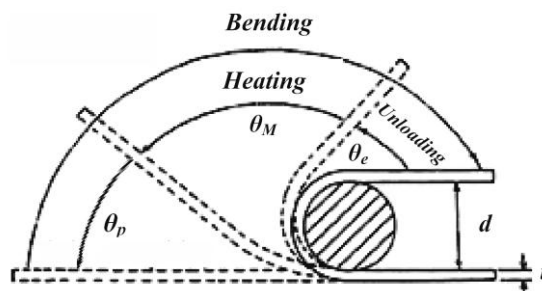
۲، ۳- دکتری - دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر - مجتمع دانشگاهی مواد و فرآیندهای ساخت

نابجايی های جری شاکلی و به دنبال آن کاهش استحاله  $\gamma \rightarrow \epsilon$  در طی حرارت دهی، رفتار حافظه داری آلیاژ را تضعیف می کند [۷،۳].

در تحقیق حاضر هدف، بررسی و تعیین میزان اعمال پیش کرنش خمشی، جهت دستیابی به یک ساختار فازی بهینه با بیشترین اثر حافظه داری در یک آلیاژ پایه Fe-Mn-Si-Cr-Ni می باشد.

### روش تحقیق

در این تحقیق، از یک آلیاژ حافظه دار پایه آهن با ترکیب اسمی (wt%) 5Ni و 9Cr، 5Si، 14Mn، که توسط ذوب القائی تحت اتمسفر گاز آرگون تهیه شده استفاده گردید. شمش های ریخته گی پس از همگن سازی، به صورت صفحاتی نورد گرم شدند. نهایتاً نمونه هایی توسط وایرکات تهیه و پس از آنیل و کوئنچ، تحت تغییر شکل خمشی مطابق با شکل ۱ قرار گرفتند.



شکل ۱: طرح نمادین آزمون خمش و موقعیت نمونه ها بعد از خمش و آنیل باز یابی.

شاخص های  $\theta_e$ ،  $\theta_M$  و  $\theta_p$  به ترتیب معرف کرنش های الاستیک، حافظه داری و پلاستیک می باشند. برای تعیین میزان پیش کرنش، از رابطه (۱) بهره گرفته شد [۱۰]:

$$(Pre - Strain) \ e = \frac{t}{d} \quad (1)$$

که در آن  $t$  ضخامت نمونه ها و  $d$  قطر غلطک خم کاری می باشد. در این مقاله به منظور بررسی میزان پیش کرنش خمشی در محدوده ۱۰-۲/۵ درصد، تغییرات ضخامت نمونه (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلیمتر) با قطر غلطک خم کاری ثابت (۲۰ میلیمتر) مورد بررسی قرار گرفته و اثر حافظه داری آنها ارزیابی شده است. بعد از اعمال کرنش خمشی، کرنش الاستیکی نمونه ها با اندازه گیری زاویه  $\theta_e$  تعیین گردید (شکل ۱). به منظور باز یابی شکل اولیه، نمونه ها تحت عملیات آنیل قرار گرفتند. سپس میزان اثر حافظه داری (FSME) توسط رابطه (۲) محاسبه گردید [۱۰]:

$$F_{SME} = \left[ \frac{\theta_M}{180 - \theta_e} \right] \times 100 \quad (2)$$

به منظور تحلیل رفتار حافظه‌داری، نمونه‌ها پس از اعمال کرنش تحت آزمون‌های مختلفی قرار گرفتند. جهت مشاهدات ریزساختاری، از میکروسکوپ الکترونی (SEM) بهره گرفته شد و به منظور تشخیص کیفی استحاله‌های فازی، از دستگاه تفرق اشعه ایکس (XRD) Bruker مدل D4 با تشعشع  $\text{Cu-K}\alpha$  ( $\alpha = 1/542^\circ$ ) 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

تغییرات اثر حافظه‌داری بر حسب کرنش (ناشی از تغییر ضخامت نمونه) در جدول ۱ آورده شده است. آنچه‌آنکه مشاهده می‌گردد با افزایش میزان کرنش اثر حافظه‌داری در ابتدا با نرخ بسیار کمی افزایش یافته و پس از آن بشدت کاهش می‌یابد. چگونگی چنین رفتاری را می‌بایست در نحوه تغییرات استحاله فازی جویا شد. با افزایش کرنش اعمالی ( $2/5 - 7/5$  درصد)، میزان مارتنزیت  $\varepsilon$  تحت تنش در ساختار افزایش و به دنبال آن اثر حافظه‌داری نیز بهبود می‌یابد. افزایش بیش از حد پیش کرنش ( $10 - 7/5$  درصد)، می‌تواند شرایط را برای تقاطع صفحات مارتنزیتی با یکدیگر فراهم سازد [۱۱]. در چنین شرایطی مارتنزیت  $\alpha$  تحت تنش از محل تقاطع صفحات مارتنزیت  $\varepsilon$  تحت تنش شروع به شکل‌گیری نموده و سبب کاهش در اثر حافظه‌داری می‌گردد [۱۲].

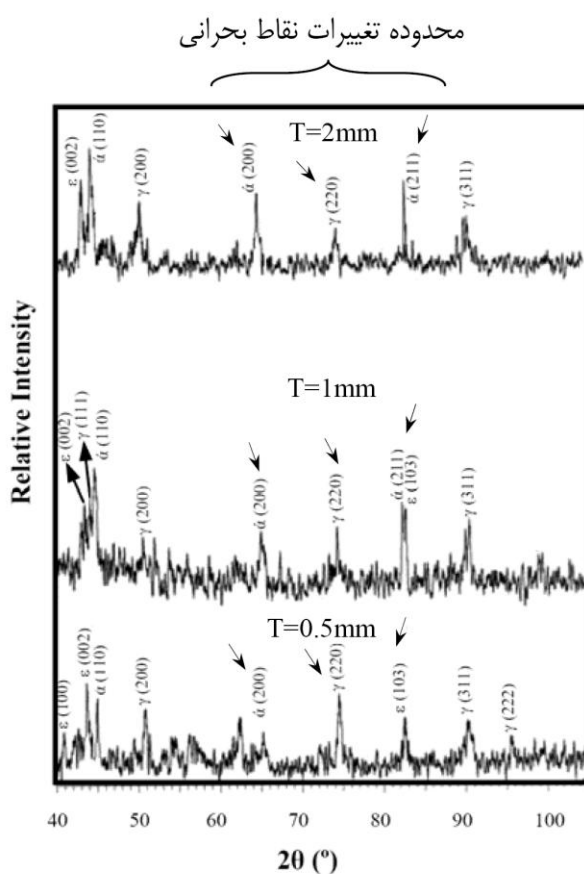
جدول ۱- تغییرات اثر حافظه‌داری با میزان اعمال پیش کرنش خمشی.				
۲	۱/۵	۱	۰/۵	ضخامت نمونه (میلی‌متر)
۱۰	۷/۵	۵	۲/۵	پیش کرنش اولیه (%)
۵۴	۷۴	۶۹	۶۵	اثر حافظه‌داری (%)

با تغییر ضخامت نمونه، دمای تغییر شکل (Md) نیز تغییر خواهد کرد. محیط تغییر شکل در این آزمایش بدین صورت تعریف شده است که نمونه‌ها در ابتدا به مدت زمان لازم در مخزن ازت مایع قرار گرفته و سپس بلافاصله در دمای محیط تغییر شکل خمشی داده می‌شوند. نمونه‌های نازکتر پس از قرارگیری در مخزن ازت مایع به محض آنکه در دمای محیط قرار می‌گیرند، میزان سرمایش‌شان به شدت نسبت به سایر نمونه‌ها افت خواهد کرد و در دماهای بالاتری (Md بالاتر) تغییر شکل بر روی آنها اعمال خواهد

شد. این موضوع سبب افزایش نیرو محرکه لازم ( $M_d-M_s$ ) جهت تشکیل مارتنزیت  $\epsilon$  تحت تنش و به

دومین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی ايران و جامعه ريخته گران ايران

روی آنها اعمال می گردد به دلیل نیاز کمتر به نیرو محرکه (تنش و یا پیش کرنش) جهت انجام استحاله مارتنزیتی، فازهای مارتنزیت  $\alpha$  بشدت افزایش یافته است و بلعکس در نمونه های با ضخامت کمتر، علاوه بر اعمال کرنش پایین، نیرو محرکه لازم برای تشکیل مارتنزیت  $\epsilon$  تحت تنش بالا می باشد، بنابراین مقادیر بسیار کمی از مارتنزیت های  $\epsilon$  و حتی  $\alpha$  در آنها تشکیل خواهد شد.



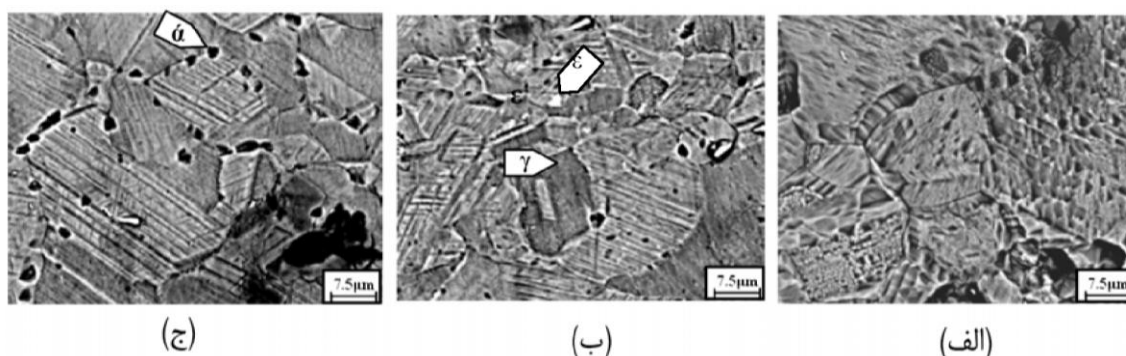
شکل ۲: آنالیز XRD نمونه های کرنش خمشی داده شده به مقادیر 2.5% (0.5mm)، 5% (1mm)، 10% (2mm).

این موضوع در تصاویر متالوگرافی شکل ۳ به وضوح مشاهده می گردد. (مناطق روشن مارتنزیت  $\epsilon$ ، مناطق تیره مارتنزیت  $\alpha$  و مناطق به رنگ خاکستری فاز آستنیت می باشد). همانطور که مشاهده می گردد به دلیل

[www.iran-mavad.com](http://www.iran-mavad.com)

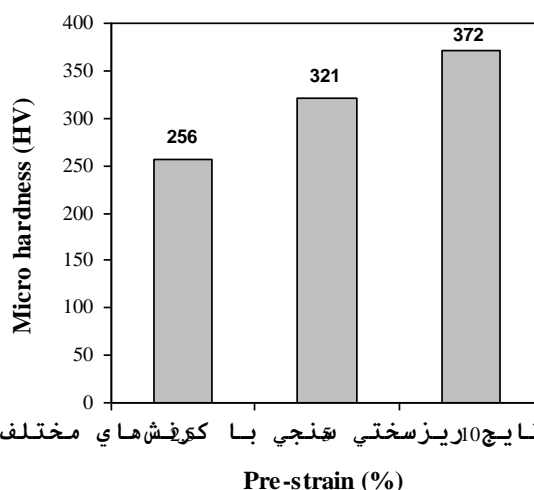
مرجع دانلود رایگان مهندسی مواد و متالورژی

ایجاد استحاله  $\epsilon \rightarrow \alpha'$  با افزایش اعمال پیش کرنش، مناطق تیره رنگ در داخل مناطق روشن تشکیل شده است [۱۳].



شکل ۳: ریز ساختار SEM نمونه‌های کرنش خمشی داده شده در مقادیر: (الف) ۲.۵٪ (۰.۵mm)، (ب) ۵٪ (۱mm) و (ج) ۱۰٪ (۲mm).

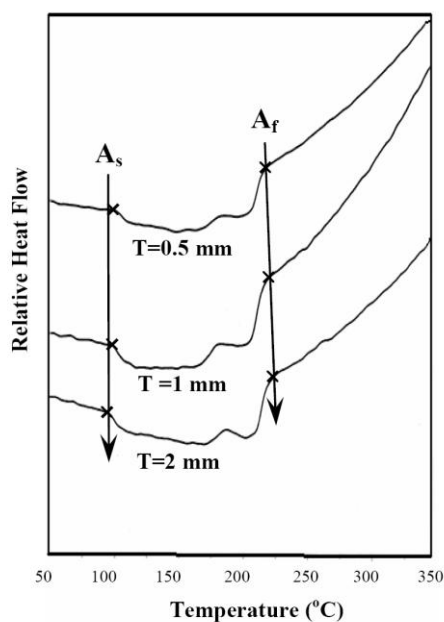
نتایج آزمون ریزسختی سنجی در شکل ۴ نشان می‌دهد که، با افزایش میزان پیش کرنش، مقدار سختی افزایش یافته که دلیل آن کارسختی آستنیت و افزایش کسر حجمی فاز مارتنزیت  $\epsilon$  تحت تنش در ساختار کریستالی می‌باشد. قابل ذکر است که تشکیل مارتنزیت  $\alpha$  در کرنش‌های بالا تأثیری بر میزان ریزسختی نخواهد گذاشت [۱۴].



شکل ۴: نتایج ۱۰ ریزسختی سنجی با کرنش‌های مختلف خمشی.

در شکل ۵ نمودارهای حاصل از آزمون DSC برای تغییرات دماهای استحالته آستنیت ( $A_s$  و  $A_f$ ) در پیش کرنش‌های مختلف آورده شده است. مطابق شکل، اولین تغییر شیب مربوط به استحالته شروع آستنیتی ( $A_s$ ) و آخرین تغییر شیب مربوط به استحالته خاتمه آستنیتی ( $A_f$ ) می‌باشد. با توجه به نتایج دومین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی ایران و جامعه ریخته گران ایران

(Af - As) رخ داده است.



شکل ۶: بررسی‌های DSC جهت تعیین دماهای  $A_s$  و  $A_f$  نمونه‌های با کرنش خمشی 2.5% (0.5mm)، 5% (1mm)، 10% (2mm).

در طی حرارت دهی، وقوع استحالته  $\gamma \rightarrow \epsilon$ ، مسبب ایجاد اثر حافظه‌داری در آلیاژهای حافظه‌دار پایه آهن خواهد بود. این استحالته به حرکت معکوس نابجایی‌های جزئی شاکی وابسته می‌باشد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که در کرنش‌های بالا با تقاطع مارتنزیت‌های  $\epsilon$  تحت تنش در طی تغییر شکل پلاستیک و افزایش کرنش پایدار برگشت ناپذیر توسط نابجایی‌های کامل، مارتنزیت‌های  $\alpha'$  تحت تنش شروع به تشکیل می‌نمایند، در چنین شرایطی حرکت برگشتی نابجایی‌های جزئی شاکی به تاخیر افتاده و دگرگونی معکوس تحت نیرو محرکه ( $A_f$ ) بالاتری شکل خواهد گرفت [۲، ۱۱].



### نتیجه‌گیری:

- ۱- با افزایش پیش کرنش، اثر حافظه‌داری در ابتدا به دلیل تشکیل و افزایش مارتنزیت  $\varepsilon$  تحت تنش افزایش یافته و سپس به دلیل وقوع استحاله  $\varepsilon \rightarrow \alpha'$  کاهش می‌یابد.
- ۲- با اعمال پیش کرنش‌های بالاتر، میزان استحاله  $\varepsilon \rightarrow \alpha'$  در نتیجه بالارفتن تنش اعمالی افزایش و مقادیر زیادی از فاز مارتنزیت  $\alpha'$  تحت تنش در ریزساختار تشکیل شده است.
- ۳- با بالارفتن مقدار پیش کرنش میزان سختی نمونه‌ها در نتیجه کارسختی آستنیت افزایش یافته است.
- ۴- افزایش پیش کرنش باعث تغییرات جزئی در دماهای استحاله  $A_f$  شده و اثر چندانی بر دمای  $A_s$  نداشته است.

### مراجع:

1. Q. Gu, L. Federzoni, W. Y. Jang, J. Van. Humbeek, G. Guenin and L. Delaey, ' $\gamma \rightarrow \varepsilon$  and  $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$  Transformation in a Fe-Mn-Si Based Shape Memory Steel', Pro. Shape Memory Materials and Hydrides, Held in Kanazawa, 1994, 488-492.
2. 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, 273-275, 1999, 517-523.
3. Q. Gu, J. Humbeek and L. Delaey, 'On the Improvement of Shape Memory Effect in Fe-16Mn-5Si-9Cr-4Ni Alloys by Thermomechanical Treatment', Scrip. Met., 30, 12, 1994, 1587-1592.
4. 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, 496-501.
5. 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, 489, 2008, 267-272.
6. T.Y. Hsu (Xu Zuyao), 'Fe-Mn-Si Based Shape Memory Alloys', Mat. Sci. Fru., 2000, 327-328, 199-206.
7. J. S. Robinson and P. G. McCormick, Fahr, 'Factors Influencing Shape Memory Behaviour in Fe-Mn-Si alloy', Scripta, 1989, 23, 1975-1978.
8. A. Sato, E. Chishima, Y. Yamaji and T. Mori, 'Orientation and Composition Dependencies of Shape Memory Effect in Fe-Mn-Si Alloys', Acta metall., 1984, 32. 4, 539-547.
9. K. Tsuzaki, 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., 33, 3, 1992, 263-270.
10. J.H. Yang, H. Chen and C.M. Wayman, 'Development of Fe-based Shape Memory Alloys Associated With Face-Centered Cubic-Hexagonal Close-packed Martensitic Transformations: Part I. Shape Memory Alloy Behaviour', Metall. Trans. A, 23, 1992, 1431-1437.



11. S.I. Nc, Z.H. Jia and L.B. Qi, 'Influence of Processing on Shape Memory Effect of Fe-Mn-Si-Ni-C-Re Shape Memory Alloy' , Acta metal. sinica (English letters), 16, 5, 2003, 385-394.
12. B.C. Maji, 'The Effect of Microstructure on the Shape Recovery of a Fe-Mn-Si-Cr-Ni Stainless Steel Shape Memory Alloy' , Jour. scripta materialia., 2003, 48, 62, 71-77.
13. N. Bergeon, G. Guenin, C. Esnouf, 'Microstructural Analysis of The Stress-Induced  $\epsilon$  Martensite in a Fe-Mn-Si-Cr-Ni Shape Memory Alloy: Part I-Calculated Description of The Microstructure ' , Mat. Sci. Eng. A, 242, 1998, 77-86.
14. A.A. Lebedev, , V.V. Kosarchuk, 'Influence of Phase Transformations on The Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steels' , International journal of plasticity, 16, 2000, 749-767.

دومین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی ايران و جامعه ريخته گران ايران

## Effect of Bending Pre\_Strain on the Phase Transformation Behaviour of Fe-14Mn-5Cr-9Si-5Ni Shape Memory Alloy

A. Akhondzadeh<sup>1</sup>, S.M. Abbasi<sup>2</sup>, K. Zangeneh<sup>3</sup>

1) adly\_3596@yahoo.com, 2) sma\_abbasi@yahoo.com, 3) zangenek@yahoo.com

### Abstract:

In the present paper, influence of condition and degree of bending pre\_strain as function of sample thicknesses in a bending roller constant on the phase transformation behaviour of a Fe-Mn-Cr-Si-Ni based shape memory alloy is investigation. It is shown that increase of thickness that lead to increase of bending strain, shape memory raised during information of stress-induced  $\alpha$  martensite. It also seen, increase of necessary driving force for formation of  $\gamma \rightarrow \varepsilon$  transformation that lead to increased austenite transformation temperature. On the other hand, in lower strain, SME increased due to Suffice of volume fraction of stress-induced  $\varepsilon$  martensite in microstructure.

**Keywords:** Fe-based Shape Memory Alloy; Microstructure; Phase Transformation Behaviour; Bending pre\_Strain; Stress-Induced  $\varepsilon$  Martensite.

---

1) M.Sc. – Department of technical engineering – Islamic Azad University of Saveh Branch

2,3) Ph.D –Department of Materials Engineering, M.U.T., Tehran, Iran