

تأثیر میزان تیتانیوم بر خواص حافظه‌داری آلیاژ نیکل-تیتانیوم تربیت شده تحت چرخه‌های ترمومکانیکی

زهره بلک*، سیدمهدی عباسی، محبوبه نفری قلعه و کریم زنگنه‌مدار

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مهندسی مواد

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۷/۵/۱۳، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۸/۳/۲۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۸/۸/۲۸

چکیده در این مقاله تأثیر میزان تیتانیوم و تعداد سیکل‌های تربیت کردن بر روی رفتار حافظه‌داری آلیاژهای نیکل-تیتانیوم بررسی شده است. به این منظور شمش‌های تهیه شده به روش ذوب و ریخته‌گری در کوره القایی تحت خلأ (VIM) با مقادیر مختلف تیتانیوم، تحت فرآیند نورد گرم و آنیل قرار گرفتند. پس از بررسی خواص حافظه‌داری یک‌طرفه، برای بررسی خواص حافظه‌داری دوطرفه، همه نمونه‌ها با روش تربیت کردن در شرایط تغییرشکل خمشی درحالت مارتنزیتی، تربیت شدند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان تیتانیوم، خواص حافظه‌داری کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد سیکل‌های تربیت کردن، کرنش حافظه‌داری دوطرفه افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی آلیاژ حافظه‌دار، نیکل-تیتانیوم، تربیت کردن، خواص حافظه‌داری.

Influence of Ti Content on Shape Memory Effect of Trained NiTi Alloy under Thermomechanical Cycles

Z. Blak*, S.M. Abbasi, M. Nafari Ghale and K. Zanganehmadar

Department of Materials Engineering, Maleke Ashtar University of Technology

Abstract In this paper, the effect of Ti content and the number of training cycles on the shape memory behavior of TiNi alloys were investigated. For this purpose, four ingots with different composition were casted in VIM furnace and then hot-rolled and annealed. After the investigation of the shape memory effect, in order to study the two-way shape memory effect, all samples were trained in martensitic state. The results show that with increasing Ti content, shape memory effect reduces. Also, it can be seen that with increasing the number of training cycles, two-way shape memory effect increases.

Keywords Shape Memory Alloy, NiTi, Training, Shape Memory Effect.

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مهندسی مواد.

تلفن: ۰۲۲۳۵۷۹۳-۰۶۱۱، دورنگار: ۰۲۱-۲۹۳۲۲۵۶، پیام‌نگار: Homa55ir@yahoo.com

۱- مقدمه

در میان آلیاژهای حافظه دار، آلیاژهای پایه نیکل-تیتانیوم، به علت داشتن اثر حافظه داری و سوپرالاستیسیته عالی، خواص مکانیکی، مقاومت خوردگی و قابلیت سازگاری مناسب با بدن انسان از لحاظ تجاری سودمندتر هستند. امروزه این آلیاژها بیشترین سهم از بازار را در زمینه حافظه داری به خود اختصاص داده اند [۱-۵]. از مهم ترین کاربردهای این آلیاژها می توان به پره در دستگاه تهویه مطبوع، شیرهای اطمینان، اجزاء بال های هوشمند در هواپیما، روبات ها، کاربردهای پزشکی مانند سیم ارتودنسی، سیم راهنما و غیره اشاره کرد [۵].

آلیاژهای نیکل-تیتانیوم می توانند خواص حافظه داری یک طرفه و دوطرفه قابل چشمگیری نشان دهند. خاصیت حافظه داری یک طرفه، خاصیتی ذاتی و متأثر از پارامترهایی چون میزان کرنش اولیه اعمالی و ترکیب شیمیایی است؛ درحالی که خاصیت حافظه داری دوطرفه جزء خواص ذاتی نیست و با اعمال سیکل های ترمومکانیکی ایجاد می شود که تربیت کردن نام دارد [۶].

میزان کرنش حافظه داری دوطرفه ایجاد شده در آلیاژهای نیکل-تیتانیوم به پارامترهایی نظیر عملیات حرارتی، ترکیب شیمیایی، کرنش اولیه اعمالی، روش و تعداد سیکل های تربیت کردن بستگی دارد [۱، ۷]. تأثیر پارامترهای مختلف بر خواص حافظه داری آلیاژهای تربیت شده به روش تغییر شکل کششی درحالت مارتنزیتی را محققان متعددی بررسی کرده اند [۸-۱۰].

هدف این تحقیق بررسی تأثیر میزان تیتانیوم بر خواص حافظه داری یک طرفه و همچنین تأثیر میزان تیتانیوم و تعداد سیکل های تربیت کردن بر کرنش حافظه داری دوطرفه آلیاژ نیکل-تیتانیوم تربیت شده به روش خمشی درحالت مارتنزیتی است.

۲- نحوه انجام آزمایش

شمش های آلیاژ نیکل-تیتانیوم به وزن تقریبی ۳۰۰ گرم، در کوره ذوب القایی تحت خلأ (VIM)، با بوتله و قالب گرافیتی، ذوب و ریخته گری شد. آنالیز این شمش ها به روش EDS انجام شد. جدول ۱ ترکیب شیمیایی نمونه های ریخته شده پس از نورد گرم و آنیل را نشان می دهد. شمش های ریخته گری شده پس از فرآیند همگن سازی تحت فرآیند نورد گرم قرار گرفتند. نمونه ها در ابعاد $100 \times 40 \times 4/5$ میلیمتر در جهت عمود بر سطح نورد شده، بریده شدند و تحت فرآیند آنیل قرار گرفتند. نمونه های آنیل شده برای بررسی های DSC و خواص حافظه داری استفاده شدند. آنالیز DSC برای تعیین دماهای استحاله نمونه ها با نرخ گرم و سرد کردن $10^\circ\text{C}/\text{min}$ با دستگاه مدل Pyris1، انجام شد. برای بررسی رفتار حافظه داری، تغییر شکل نمونه ها به صورت خمشی انجام شد. نتایج EDS و DSC با سایر محققان سازگاری دارد [۳، ۱۱].

برای ارزیابی میزان حافظه داری یک طرفه، نمونه ها به دور غلطکی با قطر ۷ میلیمتر تا زاویه 180° خم شدند. برای محاسبه میزان کرنش اعمالی (ϵ_d) بر نمونه ها و میزان بازیابی شکل (R) به ترتیب از روابط (۱) و (۲) استفاده شد [۱۲]:

جدول ۱. ترکیب شیمیایی شمش های ریخته گری شده پس از نورد گرم و آنیل (درصد اتمی).

Ni (at%)	Ti (at%)	نمونه
۵۰/۱	۴۹/۹	A
۴۹/۵	۵۰/۵	B
۴۹/۳	۵۰/۷	C
۴۹/۲	۵۰/۸	D

$$\varepsilon_{tw} = (\theta_c - \theta_h) \varepsilon_d / 180$$

رابطه (۳)

$$\varepsilon_d = d / (d + 2r)$$

رابطه (۱)

$$R = (\theta_d - \theta_h) / \theta_d \times 100$$

رابطه (۲)

۳- نتایج و بحث

۳-۱. تأثیر میزان تیتانیوم بر خاصیت حافظه‌داری یک‌طرفه

آلیاژ نیکل-تیتانیوم

منحنی‌های DSC همه نمونه‌ها در شکل ۲ ارائه شده است. جدول ۲ دمای استحاله نمونه‌ها با ترکیب شیمیایی مختلف را نشان می‌دهد. نتایج DSC همه نمونه‌ها حضور فاز آستنیت (A) را در استحاله رفت (طی گرم کردن) و فاز مارتنزیت (M) را در استحاله برگشت (طی سرد کردن) نشان می‌دهد.

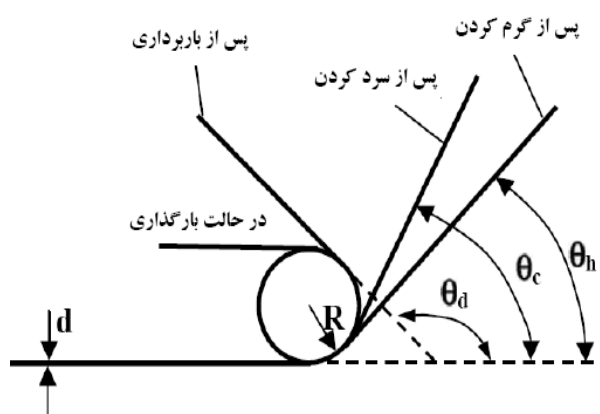
دماهای استحاله فازها در آلیاژهای نیکل-تیتانیوم به ترکیب شیمیایی، پارامترهای فرآیند کار سرد و عملیات حرارتی وابسته است. در فرآیند عملیات حرارتی، سرعت سردکردن، دما و زمان عملیات حرارتی بر دماهای استحاله درحین گرم و سردکردن تأثیرگذار است [۱۳].

در محدوده باریک ترکیب شیمیایی آلیاژ نیکل-تیتانیوم (۴۹/۳ تا ۵۱ درصد اتمی نیکل) می‌توان آلیاژهایی با دمای A_f در محدوده ۲۰- تا 100°C به دست آورد [۱۴]. شکل ۳ تأثیر ترکیب شیمیایی بر خواص حافظه‌داری یک‌طرفه آلیاژها را نشان می‌دهد. با افزایش میزان تیتانیوم، درصد بازیابی شکل کاهش می‌یابد. نایان و همکارانش [۱۵]، علت این امر را تشکیل رسوباتی چون Ti_2Ni در زمینه آلیاژهای حافظه‌دار غنی از تیتانیوم گزارش کرده‌اند. در واقع درمیان آلیاژهای نایتینول با ترکیب شیمیایی استوکیومتری، NiTi بالاترین و بهترین خواص حافظه‌داری را دارد [۱۶]. نتایج حاضر مؤید این امر است و ترکیب حاوی ۴۹/۹ تیتانیوم بهترین خواص را نشان داده است.

در رابطه (۱)، d ضخامت نمونه و r شعاع غلطک و در رابطه (۲)، θ_d زاویه نمونه با افق پس از باربرداری و θ_h زاویه نمونه با افق پس از گرم کردن است. پس از ارزیابی خاصیت حافظه‌داری یک‌طرفه، نمونه‌ها به روش تغییرشکل درحالت مارتنزیتی تربیت شدند. عملیات تربیت کردن نمونه‌ها طبق مراحل ذکرشده در مرجع [۹] و به‌صورت زیر انجام شد:

۱. سرد کردن نمونه‌ها از دمای محیط تا زیر دمای M_f .
۲. خمش نمونه‌ها حول یک غلطک با قطر ۷ میلیمتر.
۳. باربرداری و گرم کردن نمونه‌ها تا بالای دمای A_f برای ایجاد حافظه‌داری دوطرفه، تعداد ۳۰ سیکل تربیت کردن بر نمونه‌ها اعمال شد.

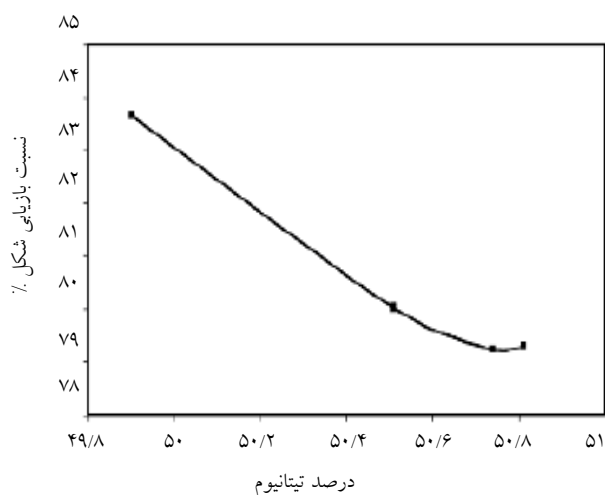
تعیین میزان حافظه‌داری دوطرفه (ε_{tw}) با استفاده از شکل (۱) و رابطه (۳) انجام شد [۱۲]:



شکل ۱. طرح نمادین اندازه‌گیری میزان حافظه‌داری دوطرفه [۱۳].

جدول ۲. دماهای استحاله (درجه سانتی‌گراد) آلیاژهای مورد بررسی.

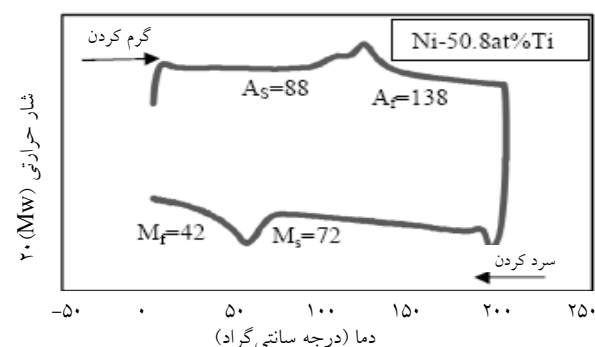
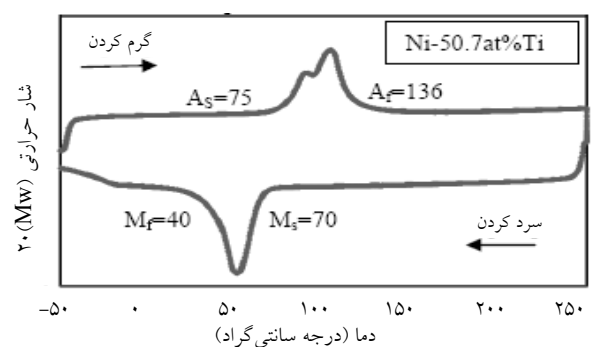
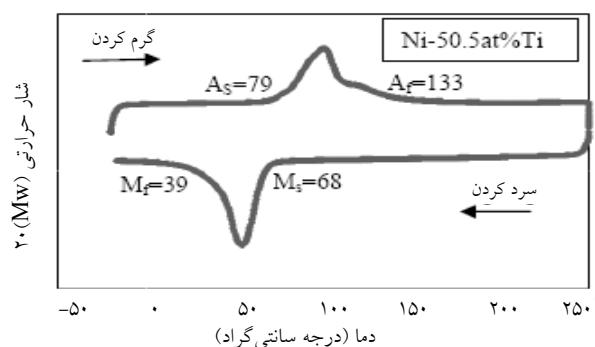
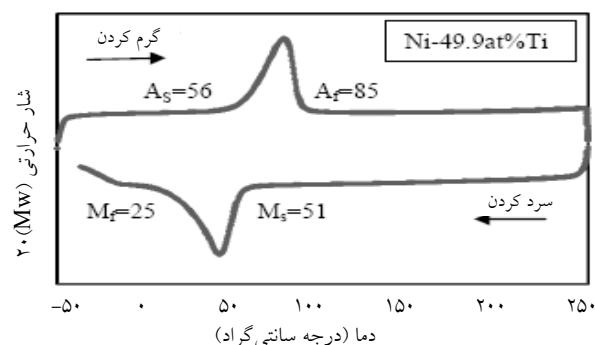
کد نمونه	M_f	M_s	A_f	A_s
A	۲۵	۵۱	۸۵	۵۶
B	۳۹	۶۸	۱۳۳	۷۹
C	۴۰	۷۰	۱۳۶	۷۵
D	۴۲	۷۲	۱۳۸	۸۸



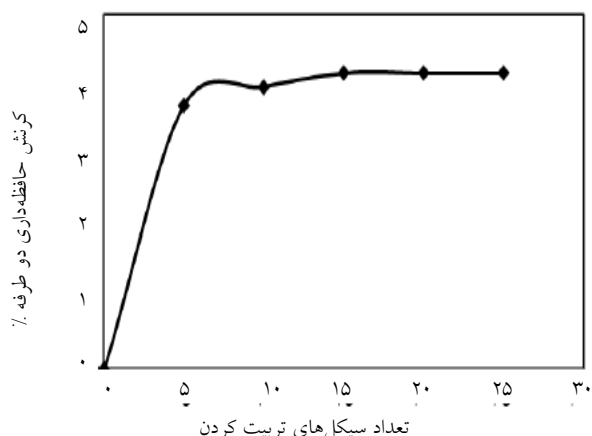
شکل ۳. تأثیر ترکیب شیمیایی بر میزان بازیابی شکل آلیاژهای مورد بررسی.

۲-۳. تأثیر میزان تیتانیوم بر خاصیت حافظه داری دوطرفه آلیاژ نیکل-تیتانیوم

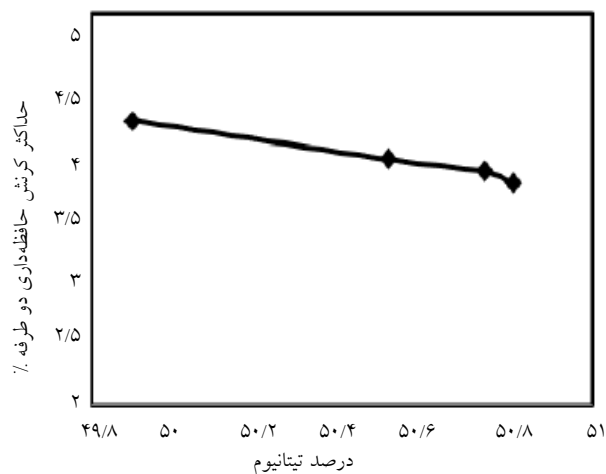
در شکل ۴ مشاهده می‌شود که حداکثر میزان کرنش حافظه‌داری دوطرفه با کاهش درصد اتمی تیتانیوم موجود در ترکیب شیمیایی، افزایش می‌یابد. با توجه به این شکل حداکثر میزان کرنش حافظه‌داری آلیاژهای مورد بررسی تربیت شده به روش تغییر شکل خمشی در حالت مارتنزیتی به ترتیب برابر ۴/۲،



شکل ۲. منحنی DSC آلیاژهای مورد بررسی.



شکل ۵. تأثیر تعداد سیکل تربیت کردن بر میزان کرنش حافظه‌داری دو طرفه، پیش‌کرنش ۱۶/۷ درصد.



شکل ۴. تأثیر ترکیب شیمیایی بر میزان کرنش حافظه‌داری دو طرفه.

به‌طور کلی در طی فرآیند تربیت کردن، ابتدا نابعایی‌ها به‌طور پیوسته تولید می‌شوند. این نابعایی‌ها سبب ایجاد تنش داخلی در زمینه می‌شوند که به‌طور تدریجی با افزایش تعداد سیکل‌های تربیت کردن، بیشتر می‌شود. با افزایش تعداد سیکل‌های تربیت کردن، تنش داخلی ایجاد شده در طی چند سیکل اولیه، تولید نابعایی‌های بیشتر در طی سیکل‌های بعدی تربیت کردن را متوقف می‌نماید. به‌همین دلیل کرنش حافظه‌داری دو طرفه پس از چند سیکل اولیه تربیت کردن پایدار می‌شود [۱۲].

۴- نتیجه‌گیری

۱. با افزایش میزان تیتانیوم، درصد بازایی شکل و خاصیت حافظه‌داری دو طرفه کاهش می‌یابد.
۲. کرنش حافظه‌داری دو طرفه ابتدا با افزایش تعداد سیکل‌های تربیت کردن افزایش می‌یابد و سپس با افزایش بیشتر تعداد سیکل‌ها، تغییر محسوسی نمی‌کند.

۳/۹، ۳/۸ و ۳/۷ درصد است.

این امر ناشی از آن است که با افزایش درصد اتمی تیتانیوم از ۴۹/۸ تا ۵۰/۸، میزان رسوبات موجود در ساختار افزایش می‌یابد؛ زیرا رسوبات تشکیل شده در درون دانه‌ها و در امتداد مرز دانه‌ها موانعی در برابر تشکیل و جهت‌گیری واریانت‌های مارتنزیتی هستند [۱۷] و باعث کاهش خاصیت حافظه‌داری می‌شوند.

۳-۳. تأثیر تعداد سیکل‌های تربیت کردن بر میزان خاصیت حافظه‌داری دو طرفه آلیاژ نیکل-تیتانیوم

شکل ۵ تأثیر تعداد سیکل‌های تربیت کردن بر میزان کرنش حافظه‌داری دو طرفه را برای آلیاژ غنی از نیکل نشان می‌دهد. کرنش حافظه‌داری دو طرفه در سیکل‌های ابتدایی به سرعت افزایش می‌یابد و پس از آن با تعداد سیکل بیشتر تغییر محسوسی ندارد. نتیجه به دست آمده با نتایج سایر محققان [۱۳، ۱۲، ۸] سازگاری دارد.

6. Zhang, X.M. and Fernandez, J., "Role of External Applied Stress on the Two-Way Shape Memory Effect", *J. of Mat. Sci. Eng. A*, Vol. 438-440 (2006) 431-435.
7. Ryklina, E.P., Khmelevskaya, I.Y., Prokoshkin, S.D., Inakyan, K.E. and Ipatkin, R.V., "Effects of Strain Aging on Two-Way Shape Memory Effect in a Nickel-Titanium Alloy for Medical Application", *J. of Mat. Sci. Eng. A*, Vol. 438-440 (2006) 1093-1096.
8. Liu, Y. and McCormick, P.G., "Factors Influencing the Development of Two-Way Shape Memory in NiTi", *J. of Acta. Met. Mate*, Vol. 38 No. 7 (1990) 1321-1326.
9. Liu, Y.N., Liu, Y. and Humbeeck, J.V., "Two-Way Shape Memory Effect Developed by Martensite Deformation", *J. of Acta. Met. Mate*, Vol. 47 No. 1 (1999) 199-209.
10. Lahoz, R. and Purtolas, J.A., "Training and Two Way Shape Memory in NiTi Alloys: Influence on Thermal Parameters", *J. of All. Comp.*, Vol. 381 No. 1-2 (2004) 130-136.
11. Otsuka, K. and Ren, X., "Physical Metallurgy of Ti-Ni-based Shape Memory Alloys", *J. of Mat. Sci.*, Vol. 50 No. 5 (2005) 511-678.
12. Meng, X.L., Zheng, Y.F., Cai, W. and Zhao, L.C., "Two-Way Shape Memory Effect of a TiNiHf High Temperature Shape Memory Alloy", *J. of All. Comp.*, Vol. 372 No. 1-2 (2004) 180-186.
13. Yeung, K.W.K., Cheung, K.M.C., Lu, W.W. and Chung, C.Y., "Optimization of Thermal Treatment Parameters to Alter Austenitic Phase Transition Temperature of NiTi Alloy for Medical Implant", *J. of Mat. Sci. Eng. A.*, Vol. 383 No. 2 (2004) 213-218.
14. Badakhshan Raz, S. and Sadrnezhaad, S.K., "Effects of VIM Frequency on Chemical Composition, Homogeneity and Microstructure", *J. of Mat. Sci. Tech.*, Vol. 20 No. 5 (2004) 593-598.
15. Nayan, N., Govinda, N., Saikrishnab, C.N. Ramaiahb, K.V., Bhaumikb, S.K., Naira, K.S and Mittala, M.C., "Vacuum Induction Melting of NiTi Shape Memory Alloys in Graphite Crucible", *J. of Mat. Sci. Eng. A.*, Vol. 465 (2007) 44-48.
16. Schwartz, M., Encyclopedia of Smart Materials, John Wiley and Sons, Vol. 2 Edits. 1 (2002) 951-954.
17. Miyazaki, S., and Ishida, A., "Martensitic Transformation and Shape Memory Behavior in Sputter-Deposited TiNi-Base Thin Films", *J. of Mat. Sci. Eng. A.*, Vol. 273-275 (1999) 106-133.

۳. کرنش حافظه‌داری دوطرفه در نمونه‌های غنی از نیکل بیشتر از نمونه‌های غنی از تیتانیوم است.

تشکر و قدردانی

گردآورندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از مسئولان محترم آزمایشگاه‌های مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت دانشگاه صنعتی مالک اشتر کمال تشکر و قدردانی خویش را ابراز نمایند.

مراجع

1. Ramaiah, K.V., Saikrishna, C.N. and Bhaumik, S.K., "Processing of Ni-Ti Shape Memory Alloy Wires", *International Conference on Smart Materials Structures and Systems (ISSS)*, (2005) 141-147.
2. Zhang, C., NiTi and NiTiHf Shape Memory Thin Films, Bell and Howell Information and Learning Company, PhD Dissertation, (2000).
3. Duerig, T.W., Melton, K.N., Stockel, D. and Wayman, C.M., TiNi Based Shape Memory Alloy, Engineering Aspect of Shape Memory Alloys, ISBN: 0-750-61009-3, (1990) 21-35.
4. Haasters, J., Salis-Soho, G.V. and Bensmann, C., The Use of Ni-Ti as Implant Material in Orthopedics, Eng. Aspects of Shape Memory Alloys, Butterworth-Heinemann, ISBN: 0-750-61009-3 (1990) 426-444.
5. Chen, L.P. and Si, N.C., "Influence of Thermomechanical Training Deformations on TWSME in TiNiCu Alloy Spring", *J. of All. Comp.*, Vol. 448 No. 1-2 (2006) 219-222.