

ایجاد اثر حافظه‌داری دو طرفه در آلیاژ صفحه‌ای سوپرالاستیک NiTi به منظور ساخت عملگر اسفنکتر مصنوعی

ناهید حسن‌زاده نعمتی^۱، سیدخطیب‌الاسلام صدرنژاد^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده مهندسی پزشکی

۲- استاد، دانشگاه صنعتی شریف و پژوهشگاه مواد و انرژی

hasanzadeh@srbiau.ac.ir

چکیده

عملگرهای حرارتی برای عملکرد مناسب باید بتوانند بصورت متناوب تغییر شکل دهند و حداقل دو شکل را یکی در دمای پایین و دیگری در دمای بالا بازیابی کنند. در این پژوهش این ویژگی که خاصیت حافظه‌داری دو طرفه نام دارد در نمونه‌های صفحه‌ای آلیاژ سوپرالاستیک NiTi ایجاد گردید. همچنین مورفولوژی و ترکیبات رسوبات موجود در زمینه آلیاژ طی تحقیق با میکروسکوپ الکترونی SEM و دستگاه آنالیزی EDS مورد بررسی قرار گرفت. اثر نیرو و محیط آنیل انحلالی نیز بر دماهای استحاله عملگرهای حرارتی ساخته شده با استفاده از روش‌های ECR و DSC ارزیابی شد. آزمایشات نشان داد دماهای استحاله نمونه پیر شده که مرحله اول عملیات حرارتی آن در خلاء و عاری از هر گونه تنش اعمالی انجام شده است پایین‌تر و متناسب با عملگرهای قابل استفاده در اسفنکتر مصنوعی است.

کلید واژه: حافظه‌داری دو طرفه، آنیل انحلالی، پیری تحت نیرو، عملگرهای حرارتی، دمای استحاله فازی

۱- مقدمه

آلیاژهای حافظه دار NiTi از جمله مواد هوشمندی است که در سه دهه اخیر توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است [۱]. برخوردار بودن این دسته از مواد از خواصی مانند حافظه داری [۲]، سوپرالاستیسیته [۳]، مقاومت ویژه بالای الکتریکی، مقاومت به سایش، مقاومت به خوردگی [۴] و همچنین زیست سازگاری خوب [۵] جذابیت این مواد را در کاربردهای صنعتی و پزشکی [۶-۱۲] موجه می سازد.

اثر حافظه داری که از مهمترین و جذابترین خواص آلیاژ حافظه دار است [۶] به استحاله فازی ترموالاستیک برگشت پذیری اتلاق می گردد که طی آن فاز آستنیت (A) با ساختار کریستالی CsCl (B_۲) و پایدار در دمای بالا به فاز مارتنزیت (M) با ساختار کریستالی مونوکلینیک پایدار در دمای پایین تبدیل می شود. گاهی اوقات علاوه بر فازهای آستنیت و مارتنزیت در بعضی از ترکیبات آلیاژی و بعد از فرآیندهای عملیات حرارتی و ساخت، فاز میانه ای به نام فاز R ایجاد می گردد که ساختار کریستالی رمبوهدرال دارد. فاز A در این آلیاژها با کاهش دما ابتدا به فاز R و سپس به فاز M تبدیل می شود [۲].

عملگرهای حرارتی (Thermal actuators) از جمله کاربردهای آلیاژهای حافظه دار NiTi می باشد [۱۰] که هم در صنعت [۱۳] و هم در پزشکی [۱۱] مورد استفاده قرار می گیرد. عملگر اسفنکتر مصنوعی می تواند از دیگر کاربردهای ماکروسکوپی آلیاژ حافظه دار NiTi باشد که در این پژوهش مورد بررسی قرار خواهد گرفت. اسفنکترها ماهیچه های حلقوی هستند که به عنوان دریچه های کنترل کننده ورود و خروج مواد به مجراها و ارگان های توخالی بدن عمل می کنند.

عملگرهای حرارتی برای عملکرد مناسب باید بتوانند بصورت متناوب تغییر شکل دهند و حداقل دو شکل را یکی در دمای پایین و دیگری در دمای بالا بازیابی کنند. ساده ترین نوع از این محرک ها عملگری با خاصیت حافظه داری یک طرفه است که از یک بایاس بهره می گیرد. اما مونتاز نمودن چنین ابزاری با مشکلات تکنیکی همراه است. لذا ایجاد خاصیت

حافظه‌داری دوطرفه در آلیاژ NiTi که در نتیجه تربیت کردن آن امکان‌پذیر است یکی از راه‌حل‌های پیشنهادی برای حل این مشکل می‌باشد [۱۳].

اثر حافظه‌داری دوطرفه از جوانه‌زنی و رشد مرجح واریانت‌های مارتنزیتی هدایت شده توسط تنش‌های داخلی نشأت می‌گیرد [۱۴]. آلیاژی که به صورت دوطرفه حافظه‌دار شده است بدون دخالت هرگونه اعمال نیروی خارجی شکل‌های دمایی پایین و دمایی بالای خود را بازیابی می‌کند. این پدیده طی استحاله‌فازی مارتنزیت به آستنیت و بالعکس که در اثر افزایش و کاهش دما رخ می‌دهد اتفاق می‌افتد [۱۴]. حافظه‌داری دوطرفه با استفاده از روش‌های مختلف در اثر تربیت‌های خاص ترمومکانیکی در آلیاژ NiTi ایجاد می‌شود [۱۶-۱۳].

ترکیب آلیاژ و روش آنیل کردن از پارامترهای اثرگذار بر خاصیت حافظه‌داری دوطرفه در آلیاژ می‌باشند [۱۳]. تحقیقات متعددی نشان داده است که ترکیبات هم‌اتمی یا غنی از نیکل آلیاژهای NiTi بعد از یک عملیات حرارتی مناسب مانند پیری تحت نیرو [۱۶] قابلیت به نمایش گذاشتن خاصیت فوق‌الذکر را دارند. اما تحقیقات در زمینه آلیاژهای غنی از تیتانیوم محدود می‌باشد. ایجاد حافظه‌داری دوطرفه در نوارهای آلیاژ سوپرالاستیک NiTi از طریق عملیات حرارتی تحت نیرو به منظور خم و راست شدن در دماهای مناسب از اهداف پژوهش حاضر می‌باشد.

۲- روش تحقیق

ابتدا نوارهایی به ابعاد $40 \times 2 \times 0.77 \text{ mm}^3$ از صفحه آلیاژی سوپرالاستیک NiTi ساخت شرکت Memory-Metalle GmbH آلمان بوسیله دستگاه وایرکات بریده شدند. این قطعات مسطح با تقسیم شدن به سه گروه در دمای 850°C به مدت ۱h در کوره ATBIN با اتمسفر کنترل نشده آنیل انحلالی و سپس در آب سرد شدند. گروه اول در لوله کوارتزی حاوی خلاء 10^{-6} torr ، گروه دوم در لوله چدنی حاوی آهن با خلوص ۹۹/۹۹٪ ساخت شرکت Fluka و

گروه سوم تحت نیرو (نوارها بین دو صفحه فولادی به هم پیچ شده قرار گرفتند) آنیل شدند. سپس نمونه هایی از گروه اول و سوم تحت نیرو برای برخوردار شدن از خاصیت حافظه داری دو طرفه در دمای 450°C به مدت ۸h پیر شدند. دماهای استحاله آلیاژ بوسیله دستگاه سنجش مقاومت الکتریکی ساخت داخل و دستگاه DSC-NETSCHE ساخت آلمان با سرعت سرد و گرم کردن $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ مورد ارزیابی قرار گرفت.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM (Scanning Electron Microscopy) نمونه ها با دکتورهای SE (Secondary Electron) و BS (Backscattered electron) به ترتیب بوسیله میکروسکوپ های ساخت شرکت های VEGA/TESCAN و Oxford تهیه شدند. آنالیز عنصری زمینه و رسوبات موجود در نمونه ها نیز توسط دستگاه EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) ساخت شرکت RONTEC آلمان مورد ارزیابی قرار گرفت. طیف XRD (X-Ray Diffraction) از آلیاژ اولیه با دستگاه SEIFERT مدل 3003PTS ساخت کشور آلمان تهیه شد. پرتو X در این تست با طول موج 1.54\AA از آند $\text{Cu-K}\alpha$ با فیلتر نیکلی با ولتاژ 40 kv و جریان 30mA به نمونه تابانده شد. محدوده زاویه تابش (2θ) زوایای 20 و 80 درجه تعیین گردیدند. سرعت اسکن دستگاه نیز $0.1^{\circ}/\text{s}$ تنظیم گردید.

۳- نتایج و بحث

تصویر SEM از آلیاژ که توسط شرکت سازنده در شرایط عاری از اکسیژن آنیل مسطح^۱ شده بود در شکل ۱ آورده شده است. دانه بندی فاز آستنیت در شکل ۱-الف قابل تشخیص می باشد.

طیف XRD مربوط به آلیاژ خام نیز که آستنیتی بودن ساختار آلیاژ را در دمای آزمایشگاه تأیید می نماید، در شکل ۲ آورده شده است. دو پیک شاخص در طیف XRD که در زوایای

^۱-Flat annealed

۴۲/۲۶ و ۷۷/۳۱ قابل مشاهده است به ترتیب متعلق به صفحات کریستالی (۱۱۰) B_2 و (۲۱۱) B_2 می باشند [۱۷-۱۹].

آنالیز EDS انجام شده (شکل ۳) نشان می دهد که ترکیب زمینه آلیاژ بصورت $Ti-49/30at\%Ni$ است. ترکیب رسوبات نیز که در زمینه آلیاژ خام با تنوع شکلی تیغه ای عریض، تیغه ای باریک و رسوبات گوشه دار در شکل ۱-ب به ترتیب با حروف A, B و C نمایش داده شده است در جدول ۱ گزارش شده است. آنالیز انجام شده بر رسوبات نشان می دهد که همه آنها غنی از تیتانیم بوده و میزان کربن موجود در آنها نیز در مقایسه با مقدار نیکل و اکسیژن ترکیبشان قابل ملاحظه است. بدین ترتیب می توان ادعا نمود رسوبات از نوع کاربید تیتانیم می باشد که استفاده از بوته گرافیتی در حین ساخت و فرآوری آلیاژ می تواند مسبب ظهورشان باشد [۲۰].

دمای آنیل در مرحله اول عملیات حرارتی به منظور دیکنه کردن حالت مسطح به آلیاژ (در دماهای پایین) $850^{\circ}C$ تعیین شد. چرا که آنیل کردن در دماهای پایین باعث افزایش دانسیته نابجایی‌ها و استحکام شده، جهت گیری مجدد مارتنزیت را به تاخیر انداخته و حافظه‌داری را تضعیف می کند [۲۰]. آنیل انحلالی نمونه های گروه اول و سرد کردن آنها در آب باعث توزیع نسبتاً همگن رسوبات در زمینه با حفظ تنوع شکلی شد (شکل ۴-الف). تصویر BSD از نمونه متعلق به گروه دوم که بعد از آنیل شدن در آب سرد شده است (شکل ۴-ب) نشان می دهد که عمده رسوبات به شکل تیغه ای و در یک جهت گیری هماهنگ در زمینه به شکل همگن توزیع شده اند. سرعت سرد شدن در نمونه های گروه دوم نسبت به گروه اول سریعتر می باشد چرا که ضریب رسانش گرمایی آهن از حلال 10^{-6} torr بالاتر است [۲۱].

ترکیب زمینه در نمونه های هر دو گروه اول و دوم تقریباً $Ti-49/79at\%Ni$ بود که نیکل آن در حدود ۰/۵۲٪ نسبت به آلیاژ خام بیشتر می باشد. افزایش نیکل در زمینه باعث کاهش دماهای استحاله می شود [۲۰]. دماهای استحاله نمونه های خام و آنیل شده با استفاده از نمودار های مقاومت الکتریکی/دما تعیین گردید. مقاومت الکتریکی همه فازهای کریستالی با

افزایش دما بصورت خطی افزایش می یابد اما شیب خطوط فازهای مختلف متفاوت از هم می باشد [۲۲]. فاز R مقاومت الکتریکی بالاتری نسبت به فاز A دارد اما مقدار آن با توجه به افزایش زاویه کجی با کاهش دما افزایش می یابد [۲۲]. مقایسه نمودارهای مقاومت الکتریکی/دما نمونه خام و نمونه متعلق به گروه اول در شکل ۵ الف-ب این مساله را تایید می نماید. دماهای استحاله فازی در جدول ۲ گزارش گردیده اند. همانطور که مشخص است دماهای استحاله فازی حتی در نمونه خام بدلیل حضور ناخالصی های کربن و اکسیژن پایین می باشد [۲۳].

در مرحله دوم عملیات حرارتی به منظور دیکته نمودن حالت خمیده به آلیاژ برای بازیابی شکل کماتی در دماهای بالا نمونه ها تحت نیرو پیر شدند. بدین منظور نمونه هایی از گروه اول و سوم تحت نیرو در قالب فولادی دو تکه ای مشتمل بر سنبه (شکل ۶) و ماتریس در دمای 450°C به مدت ۸h به شکل خمیده در آمده پیر شدند و سپس در آب سرد شدند (این نمونه ها به ترتیب نمونه ۱ و ۲ نامگذاری شدند). تصویر BSD از نمونه ۱ در شکل ۷-الف آورده شده است. رسوبات کاربیدی غنی از تیتانیم در این نمونه به شکل های نامنظم و گوشه دار و رسوبات کوچکی از Ti_2Ni در زمینه آلیاژ هویدا است. ذرات تیره در تصویر نمایشگر رسوبات Ti_2Ni است [۲۳]. آنالیز EDS گرفته شده از این نمونه نشان می دهد که نیکل موجود در زمینه نسبت به نمونه آنیل شده از مقدار $49/79$ درصد اتمی به $48/36$ درصد اتمی کاهش یافته است. کاهش مقدار نیکل در زمینه باعث افزایش دماهای استحاله گردیده است (شکل ۵-ج و جدول ۲).

تصویر BSD از نمونه ۲ در شکل ۶-ب آورده شده است. اعمال فشار در مرحله آنیلینگ توسط دو قطعه فولادی و سرعت بالای سرد شدن نسبت به نمونه های گروه اول باعث شده است تا رسوبات با اندازه کوچکتری در زمینه ظاهر شوند. طیف DSC گرفته شده از نمونه ۲ در شکل ۸ آمده است و دماهای استحاله آن نیز در جدول ۲ گزارش شده است. مقایسه اشکال ۷-الف و ۷-ب نشان می دهد که رسوبات در نمونه ۱ نسبت به نمونه ۲ بزرگتر بوده ،

زمینه برای رشد فاز R مساعدتر می باشد لذا تشکیل آن در دمای پایین تر رخ داده است. پیر نمودن آلیاژ در دمای کمتر از 500°C باعث شده است تا استحاله فاز مارتنزیت از آستنیت دو مرحله ای شود ($M \leftarrow R \leftarrow A$) و میزان هیستریزیس به کمتر از 10°C برسد [۱۳]. شماتیک رفتار حافظه داری دو طرفه ایجاد شده در نمونه های ۱ و ۲ در شکل ۹ نشان داده شده است. دماهای استحاله نمونه ۱ برای کاربردهای پزشکی مناسب تر می باشد چرا که نمونه نواری تهیه شده از آلیاژ در دمای بدن دارای ساختار فازی R بوده و شکل ماکروسکوپی مسطح دارد و در موارد مورد نیاز با اعمال جریان و افزایش دمای آلیاژ به 55°C به شکل خمیده در می آید.

۴- نتیجه گیری

- ۱- رسوبات کاربید تیتانیم حاضر در زمینه آلیاژ دارای تنوع شکلی می باشد.
- ۲- کاهش نیکل زمینه در زمینه آلیاژ بعد از آنیل انحلالی در دمای 850°C به مدت ۱h باعث کاهش دماهای استحاله شده است.
- ۳- سرعت سرد کردن بالاتر نمونه آنیل شده در پودر آهن نسبت به نمونه محصور شده در لوله کوارتزی باعث شده است تا رسوبات به شکل تیغه ای و با جهت گیری یکسان در زمینه پراکنده شوند.
- ۴- دماهای استحاله با پیر کردن نمونه ها به شدت افزایش یافته است و استحاله فاز مارتنزیت از آستنیت دو مرحله ای شده است.
- ۵- ایجاد اثر حافظه داری دو طرفه در آلیاژ مورد استفاده نشان داده است که این خاصیت در آلیاژهای سوپرالاستیک غنی از تیتانیم نیز قابل دستیابی است.
- ۶- اعمال نیرو در مرحله آنیل بر نمونه ۲ و نیز کوچکتر بودن رسوبات باعث شده است تا دماهای استحاله آن نسبت به نمونه ۱ بالاتر باشد.

۵- مراجع

- [1] Zhang X., Sehitoglu, H.; Crystallography of the B2-R-B19' phase transformation in NiTi; *Materials Science and Engineering A* 2004;374:292-302.
- [2] Ucil J., Baraz Ferdanandes F.M., Mahesh K.K.; X-ray diffraction study of the phase transformation in NiTi shape memory alloy; *Materials Characterization* 2007; 58:243-248.
- [3] Antonucci V., Faiella G., Giordano M., Mennella F., Nicolais L.; Electrical resistivity study and characterization during NiTi phase transformations; *Thermochimica Acta* 2007; 462:64-69.
- [4] Wang J., Li N., Han E., Ke W.; Effect of PH, temperature and Cl⁻ concentration on electrochemical behavior of NiTi shape memory alloy in artificial saliva; *Mat.Sci.:Mater.Med.* 2006; 17:885-890.
- [5] Li C.Y., Yang X.J., Zhang L.Y., Chen M.F., Cui Z.D.; In vivo histological evaluation of bioactive NiTi alloy after two years implantation; *Materials Science and Engineering C* 2007;27:122-126.
- [6] Iijima M., Ohno H., Kawashima I., Endo K. and Misoguchi I.; Mechanical behavior at different temperatures and stresses for superelastic Nickel-Titanium orthodontic wires having different transformation temperatures; *Dental Materials* 2002; 18: 88-93.
- [7] Kugala S., Ryhanen J., Jamsa T., Danilov A., Saaranen J., Pramila A. and Tuukkanen J.; Bone modeling controlled by a Ni-Ti shape memory alloy intramedullary nail; *Biomaterials* 2002; 23: 2535-2543.
- [8] M. Takashi, M. Toshiaki, W. Yushiyuki, K. Seiya, H. Youichi and E. Masayoshi, "An active guide wire with shape memory alloy bending actuator fabricated by room temperature process", *Sensors and Actuators A*, Vol. 97-98, pp. 632-637, 2002.
- [9] Koray K., George G. and Adams S.; Modeling and simulation of an artificial muscle and its application to biomimetic robot posture control; *Robotics and Autonomous Systems* 2002; 41: 225-243.
- [۱۰] س.خ. صدر نژاد، س. ت. نعیمی، م. فتحی، ن. حسن زاده نعمتی، "تاثير زاويه خم شدگی بر عملکرد بست‌های حافظه دار در کاربردهای پزشکی"، مجموعه مقالات هشتمین کنگره مهندسی متالورژی، مهر ماه ۱۳۸۳.
- [11] Fu Y., Du H., Huang W., Zhang S., Hu M.; TiNi-based thin films in MEMS applications: a review; *Sensors and Actuators A* 2004;112: 395-408.
- [12] Nah S.K. and Zhong Z.W.; A microgripper using piezoelectric actuation for micro-object manipulation; *Sensors and Actuators A: Physical* 2007; 133(1): 218-224.

- [13] Wang Zh., Xiaotao Z., Xiangdong F., Jingyi D.; Effect of Thermomechanical Treatment on the Two Way Shape Memory Effect of NiTi Alloy Spring; *Materials Letters* 2002; 54:55-61.
- [14] Wada K., Liu Y.; Thermomechanical training and shape recovery characteristics of NiTi alloys; *Materials Science and Engineering A* 2008; 481-482:166-169.
- [15] P.Ryklina E., D.Prokoshkin S., Yu.Khmelevskaya I., A.Shakhmina A.; One-way and Two-way Shape Memory Effect in Thermomechanically Treated TiNi-based Alloys; *Materials Science and Engineering A* 2008; 481-482:134-137.
- [16] Gyobu A., Kawamura Y., Horikawa H., Suburi T.; Martensitic Transformation and Two-way Shape Memory Effect of Sputter Deposited Ni-rich Ti-Ni Alloy Films; *Materials Science and Engineering A* 1999; 273-375:749-753.
- [17] Liu A.L., Gao Z.Y., Cai w., Wu Y.; Effect of Dy addition on the microstructure and martensitic transformation of Ni-rich TiNi shape memory alloy; *Journal of Alloys and Compounds* 2007; 437:339-343.
- [18] Holec D., Bojda O., Dlouhy A.; Ni₄Ti₃ precipitate structures Ni-rich NiTi shape memory alloy; *Materials Science and Engineering A* 2008;481-482:462-465.
- 19- Yongqing F., Huang W., Du H., Huang Xu, Junping T. Gao X.; Characterization of TiNi shape-memory alloy thin films for MEMS applications; *Surface Coating and Technology* 2001; 145:107-112.
- [20] Mehrabi K., Bahmanpour H., Shokuhfar A., Kneissi A.; Influence of chemical composition and manufacturing conditions on properties of NiTi shape memory alloys; *Materials Science and Engineering A* 2007
- [۲۱] هالیدی د.، رزینیک ر.، واکر ج.، ترجمه جلیلیان نصرتی م.، عابدینی م.، خوش بین خوش نظر؛ مبانی فیزیک؛ انتشارات صفار، ویرایش هفتم، ۲۰۰۵.
- [22] Novák V., Sittner P., Dayananda G.N., Braz-Fernandes F.M., Mahesh K.K.; Electric resistance variation of NiTi shape memory alloy wires in thermomechanical tests: Experiments and simulation; *Materials Science and Engineering A* 2008;481-482:127-133.
- [23] Otubo J., Rigo O.D., Moura Neto C., Mei P.R. ;The Effects of Vacuum Induction Melting and Electron Beam Melting Techniques on the Purity of NiTi Shape Memory Alloys; *Materials Science and Engineering A* 2006;438-440:679-682.

۶- جدول‌ها

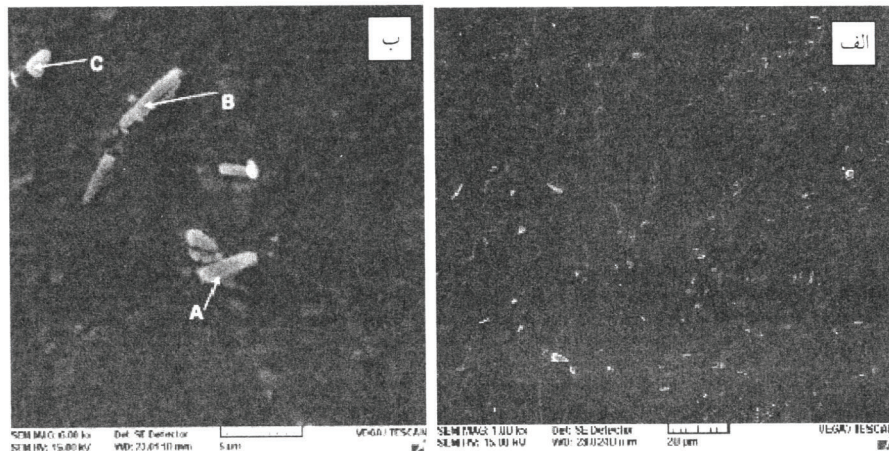
جدول ۱- نتایج حاصل از EDS آلیاژ خام

| عنصر (درصد) | کربن | | اکسیژن | | تیتانیم | | نیکل | | |
|-------------|-------|-------|--------|------|---------|-------|-------|-------|------|
| | ناحیه | وزنی | اتمی | وزنی | اتمی | وزنی | اتمی | وزنی | اتمی |
| زمینه | | | | | ۴۵/۳۹ | ۵۰/۴۷ | ۵۴/۶۱ | ۴۹/۵۳ | |
| رسوب A | ۱۰/۶۷ | ۳۰/۹۳ | ۳/۶۹ | ۸/۰۳ | ۷۶/۱۴ | ۵۵/۳۹ | ۹/۰۵ | ۵/۶۴ | |
| رسوب B | ۱۰/۱۰ | ۲۹/۴۵ | ۴/۱۸ | ۹/۱۶ | ۷۵/۸۶ | ۵۵/۵۱ | ۹/۸۶ | ۵/۸۸ | |
| رسوب C | ۸/۱۹ | ۲۴/۸۷ | ۳/۶۵ | ۸/۳۲ | ۸۵/۷۴ | ۶۵/۳۰ | ۲/۴۲ | ۱/۰۵ | |

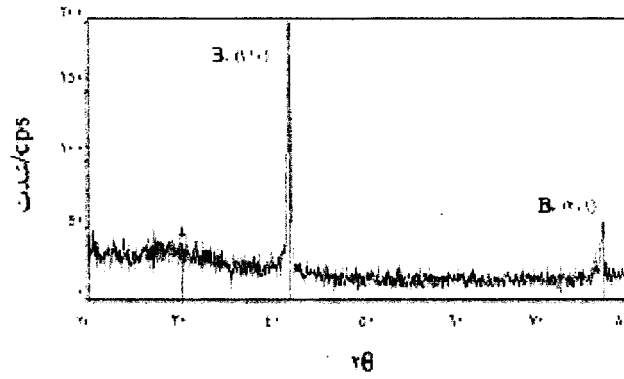
جدول ۲- دماهای استحاله نمونه خام، آنیل شده و نمونه های ۱ و ۲ (°C)

| | M _f | M _s | R _f | R _s | A _s | A _f |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| نمونه خام | -۶۸ | -۶۱ | -۲۳ | ۱ | -۱۰ | ۳ |
| نمونه آنیل شده (متعلق به گروه اول) | -۴۹ | -۳۹ | -۳۲ | -۳۰ | -۱۱ | -۶ |
| نمونه ۱ | -۴۸ | -۳۴ | ۲۷ | ۳۷ | ۴۷ | ۵۵ |
| نمونه ۲ | -۳۵ | - | - | ۵۷ | ۵۲ | ۸۷ |

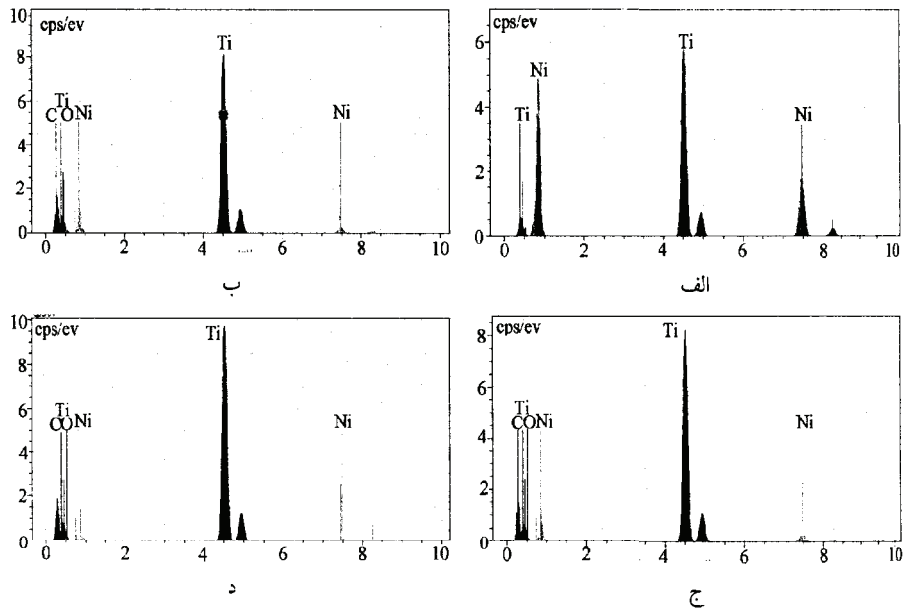
۷- شکل‌ها



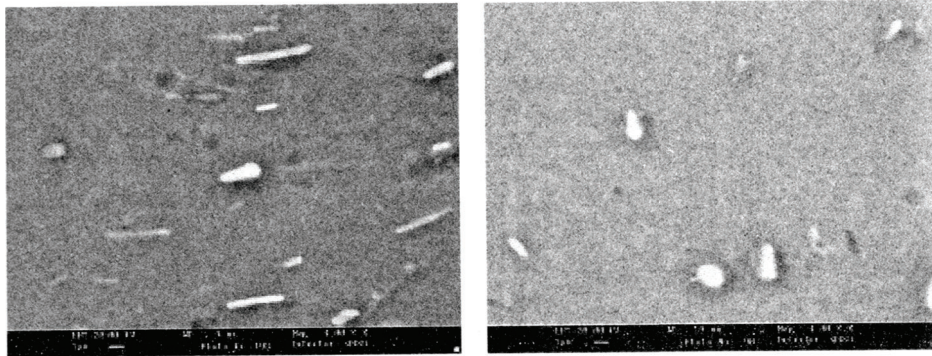
شکل ۱: تصویر SEM از آلیاژ اولیه با بزرگنمایی (الف): ۱۰۰۰ و (ب) ۶۰۰۰ برابر



شکل ۲: طیف XRD آلیاژ خام



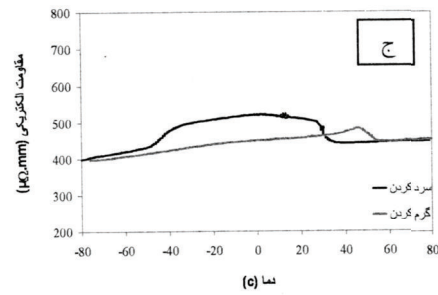
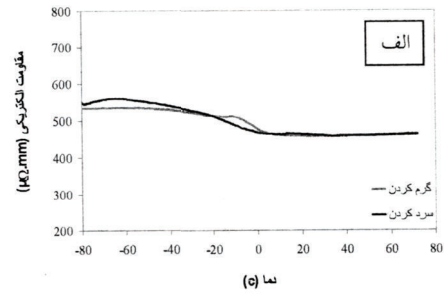
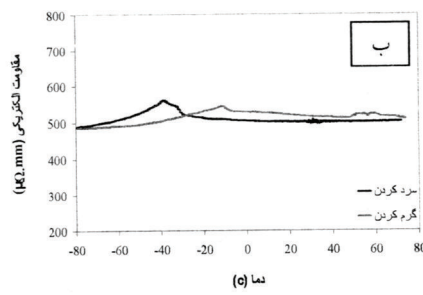
شکل ۳: طیف EDS نمونه‌های: (الف) زمینه، رسوبات: (ب) A، (ج) B و (د) C



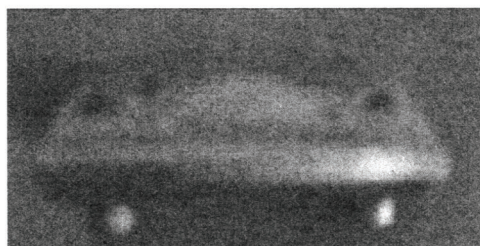
(ب)

(الف)

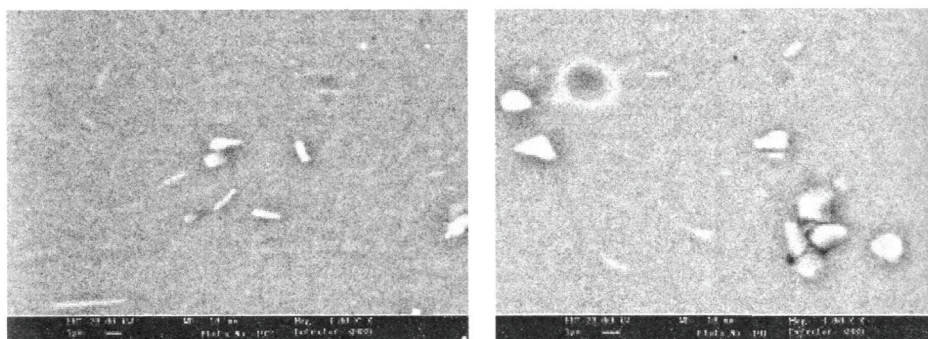
شکل ۴: تصویر BSD از آلیاژ بعد از آنیل شدن در دمای ۸۵۰°C به مدت ۱h در (الف) خلاء، (ب) پودر آهن خالص



شکل ۵: نمودار مقاومت الکتریکی/دمای (الف): آلیاژ اولیه، (ب): آلیاژ آنیل شده تحت خلاء و (ج): نمونه ۱



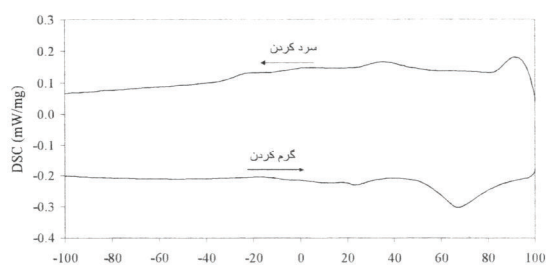
شکل ۶: تصویر قسمت سنبه‌ای قالب فولادی



(ب)

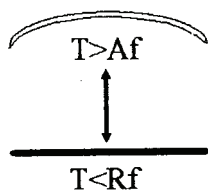
(الف)

شکل ۷: تصویر BSD از آلیاژ بعد از پیر شدن در دمای ۴۵۰°C به مدت ۸h تحت نیرو پس از آنیل شدن در دمای ۸۵۰°C به مدت ۱h در حالت (الف) بدون اعمال تنش ، (ب) تحت اعمال فشار



نما (C)

شکل ۸: طیف DSC از نمونه ۲



شکل ۹: شماتیک اثر حافظه‌داری دوطرفه در نمونه ۱ و ۲