

تأثير دما و نرخ کرنش روی فرآیندهای ترمیم دینامیکی آلیاژ نیکل - تیتانیوم

مریم مرکباتی^۱، شهرام خیراندیش^۲، محمدرضا ابوطالبی^۳، علی کریمی طاهری^۴، سید مهدی عباسی^۵

چکیده

در تحقیق حاضر تاثیر پارامترهای تغییر شکل داغ از جمله دما و نرخ کرنش روی فرآیندهای ترمیم دینامیکی آلیاژ حافظه دار نیکل - تیتانیوم در شرایط ریختگی بررسی شد. بدین منظور، نمونه‌هایی از این آلیاژ در محدوده دمایی $700-1000^{\circ}\text{C}$ ، نرخ کرنش $1-10^{-1}\text{ s}^{-1}$ تحت آزمون فشار داغ قرار گرفتند. در منحنی‌های تنش - کرنش حاصل از آزمون فشار و در نرخ کرنشهای بالا، دلایل وقوع کار نرمی ناشی از وقوع تبلور مجدد دینامیکی و همچنین حرارت آدیاباتیک است. اما در نرخ کرنشهای اندک، فرآیند غالب ترمیم بازیابی دینامیکی است. همچنین بر اساس نتایج منحنی‌های تنش - کرنش، انرژی اکتیواسیون تغییر شکل داغ این آلیاژ در شرایط ریختگی 242 kJ/mol محاسبه گردید.

واژه‌های کلیدی: تغییر شکل داغ، آلیاژ نیکل - تیتانیوم، آزمون فشار داغ، فرآیند ترمیم دینامیکی

۱- مقدمه

آلیاژهای نیکل - تیتانیوم از زمان کشف خود تاکنون، موضوع بسیاری از تحقیقات را به خود اختصاص داده‌اند. علت این امر را می‌توان به خواص حافظه‌داری و سوپرالاستیسیته بالا، همچنین مقاومت به خوردگی و سازگاری عالی با بدن و خواص مکانیکی مناسب آنها نسبت داد. این دسته از آلیاژها در چرخه تولید خود تحت عملیات ترمومکانیکی قرار می‌گیرند، که این عملیات علاوه بر رساندن شمش به ابعاد نیمه نهایی، منجر به از بین رفتن ساختار ریختگی و بهبود خواص مکانیکی می‌گردد [۱-۳].

۱- دانشجوی دکتری دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استاد دانشگاه علم و صنعت ایران

۴- استاد دانشگاه صنعتی شریف

۵- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر

در محدوده انجام کار داغ، کاهش تنش سیلان با افزایش درجه حرارت و کاهش نرخ کرنش منجر به وقوع پدیده‌های ترمیم دینامیکی می‌شود. درک رفتار آلیاژها در حین تغییر شکل داغ اهمیت قابل ملاحظه‌ای جهت طراحی فرآیندهای تغییر شکل همانند نورد داغ، اکستروژن و آهنگری در دمای بالا دارد [۴]. نتایج تحقیقات لین و همکارانش [۵] درباره تأثیر کار گرم روی استحاله مارتزیتی آلیاژ $Ni_{50}Ti_{50}$ نشان داد که در دماهای بالای نورد، بازیابی و تبلور مجدد روی می‌دهد که البته به دلیل اندک بودن زمان نورد، این دو فرآیند به صورت ناقص اتفاق می‌افتند.

اصولاً عواملی که باعث محدودیت در شکل‌دهی فلزات می‌شوند، شامل فاکتورهای فرآیندی و عوامل متالورژیکی (خواص ذاتی فلز) می‌باشند [۶]. آلیاژهای نیکل-تیتانیم از دسته ترکیبات بین‌فلزی هستند که داکتیلیته آنها نسبت به ترکیبات بین‌فلزی دیگر بیشتر است. با این وجود، کم بودن خاصیت کارپذیری داغ آلیاژهای نیکل-تیتانیم یکی از مشکلات آنها حین تغییر شکل محسوب می‌شود [۷، ۱]. لذا انجام موفقیت آمیز تغییر شکل داغ این آلیاژها منوط به درک کاملتری از مکانیزمهای ترمیم آنها می‌باشد. به منظور تعیین و پیش‌بینی رفتار تغییر شکل داغ فلزات و آلیاژها می‌توان از معادلات بنیادی آنها استفاده نمود. زیرا به کمک این معادلات می‌توان تنش سیلان فلز را به پارامترهای فرآیند از جمله کرنش، نرخ کرنش و دما مرتبط نمود. جهت بیان تأثیر دما و نرخ کرنش و بدست آوردن معادله بنیادی و تعیین انرژی اکتیواسیون کار داغ از پارامتر زنر-هولمن طبق رابطه (۱) استفاده می‌شود [۸، ۹]:

$$Z = A(\sinh(\alpha\sigma_p))^n = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

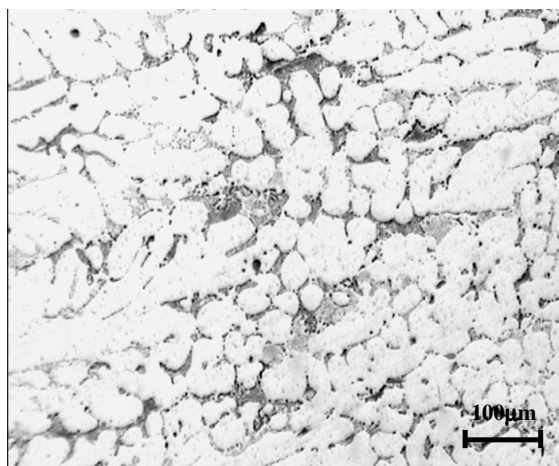
در این روابط Z پارامتر زنر-هولمن، A و α ثوابت ماده، σ_p تنش پیک، n توان تنش، $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش، Q انرژی اکتیواسیون کار داغ و T دما است. با بدست آوردن ثوابت ذکر شده و انرژی اکتیواسیون می‌توان معادله حاکم برای این آلیاژ را در دماها و نرخ کرنشهای متفاوت بدست آورد. اغلب مطالعات انجام شده در ارتباط با رفتار تغییر شکل آلیاژهای نیکل-تیتانیم روی کار سرد و عملیات حرارتی پس از آن متمرکز شده و به عملیات تغییر شکل داغ آنها کمتر پرداخته شده است. لذا در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر دما و نرخ کرنش روی وقوع فرآیندهای ترمیم دینامیکی حاکم حین تغییر شکل داغ آلیاژ نیکل-تیتانیم پرداخته شده است. همچنین معادله بنیادی این آلیاژ در شرایط ریختگی بدست آمده است.

۲- مواد و روش تحقيق

آلياژ حافظه دار نیکل - تیتانیوم با ترکیب شیمیایی $50.4\text{at}\% \text{Ti}-49.6\text{at}\% \text{Ni}$ ابتدا در کوره ذوب القایی تحت خلاء (VIM) ذوب و ریخته گری شد. سپس نمونه های تهیه شده در دمای 1000 درجه سانتیگراد به مدت 45 دقیقه تحت عملیات همگن سازی قرار گرفتند و در آب کوئنچ شدند. پس از آن نمونه های آزمون فشار به شکل استوانه هایی با قطر 10 میلیمتر و ارتفاع 15 میلیمتر تهیه گردید. برای انجام آزمون فشار داغ، از یک دستگاه سرویدرولیک Instron 8502 متصل به کامپیوتر استفاده شد. جهت کاهش اصطکاک حین آزمون فشار و جلوگیری از به وجود آمدن کرنش ناهمگن در نمونه ها، از گرافیت به عنوان روانکار استفاده شد. آزمون فشار تک مرحله ای در دماهای 700 ، 850 و 1000 درجه سانتیگراد و نرخ کرنشهای 1 s^{-1} ، 0.1 و 0.01 انجام شد. نمونه ها پس از تغییر شکل در آب کوئنچ شدند. سپس نمونه ها در جهت محور طولی مقطع زده شدند و پس از آماده سازی به وسیله میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند. برای آشکارسازی ریزساختار نمونه ها در شرایط قبل از تغییر شکل و پس از آن از محلول حکاکی $\text{Hf}-\text{HNO}_3-\text{H}_2\text{O}$ استفاده شد.

۳- یافته ها

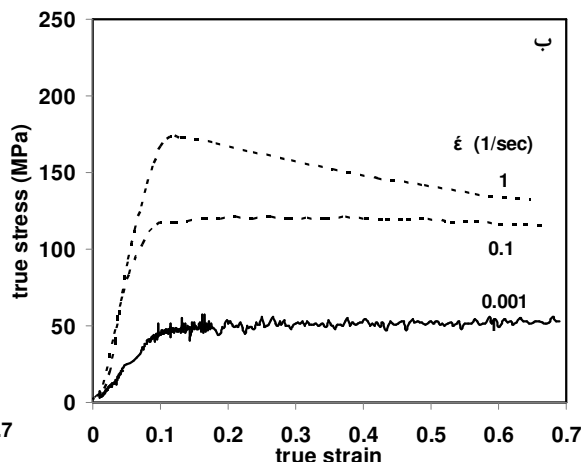
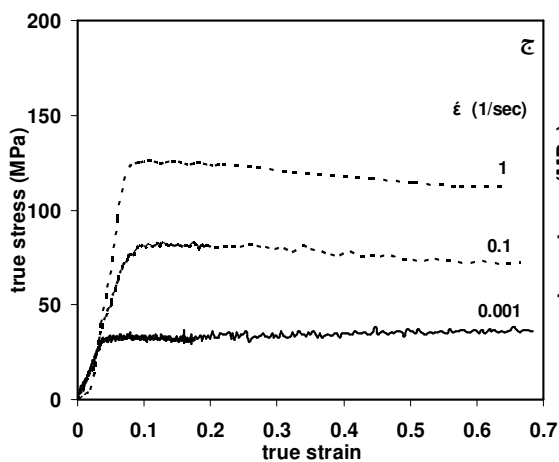
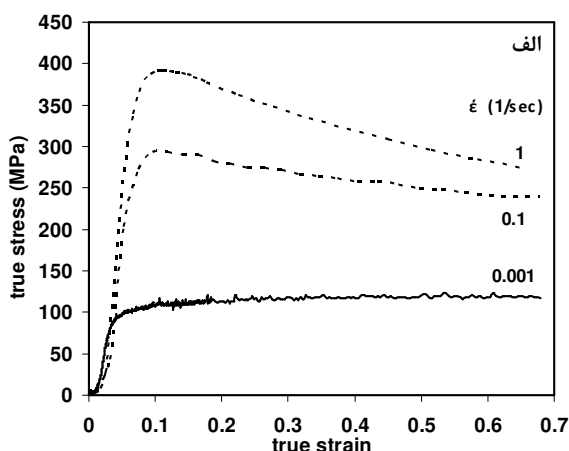
در شکل ۱ ریزساختار نمونه ریختگی پس از عملیات همگن سازی نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می شود، ریزساختار حاصله قبل از تغییر شکل شامل سلولهای هم محور است.



شکل ۱- ریزساختار نمونه ریختگی پس از عملیات همگن سازی.

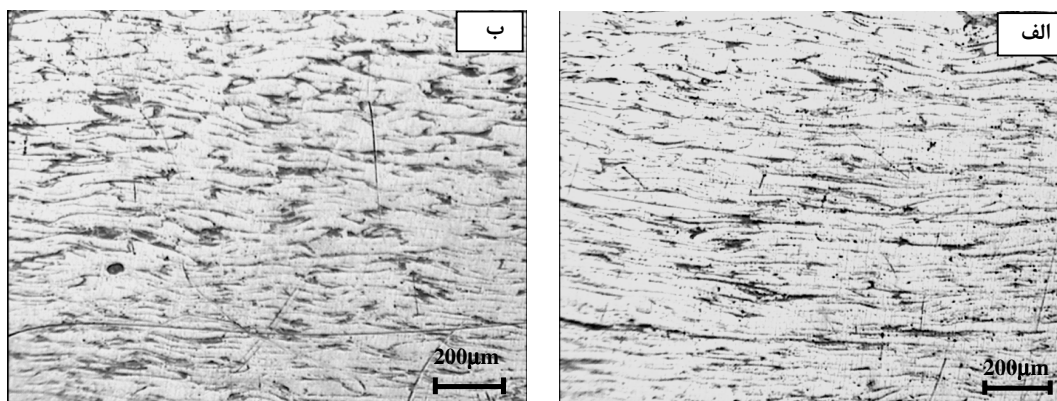
شکل ۲ منحنی‌های تنش - کرنش حقیقی بدست آمده از آزمونهای فشار داغ در نرخ کرنشها و دماهای مختلف را نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود در کلیه دماهای تغییر شکل با افزایش نرخ کرنش، تنش سیلان افزایش می‌یابد. مقایسه منحنی‌ها در دماهای مختلف نشان می‌دهد که با افزایش دمای آزمون، منحنی‌ها به سطوح پایینتر تنشی منتقل شده‌اند.

در کلیه دماها و در نرخ کرنشهای بالا منحنیهای تنش - کرنش نشان‌دهنده یک تنش پیک است. پس از آن افت تنش سیلان با ادامه کرنش مشاهده می‌شود. از سوی دیگر در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد و نرخ کرنش 0.001 s^{-1} و همچنین در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد و نرخ کرنشهای 0.001 s^{-1} و 0.01 s^{-1} با افزایش میزان کرنش ابتدا تنش سیلان افزایش یافته و سپس با افزایش کرنش منحنی‌ها به یک حالت پایا می‌رسند. اما آنچه در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد و نرخ کرنش 0.001 s^{-1} جالب توجه است، این است که به مقدار اندکی شیب نمودار افزایش می‌یابد.



شکل ۲- منحنی‌های تنش - کرنش آزمون فشار داغ در دماهای الف- ۷۰۰، ب- ۸۵۰ و ج- ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد.

در شکل ۳ ریزساختار نمونه‌ها در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد و نرخ کرنشهای 1 s^{-1} و 0.001 s^{-1} نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود ریزساختار پس از تغییر شکل به صورت پنکیک شده قابل تشخیص است. همچنین در نرخ کرنش 1 s^{-1} ریزساختار ظریفتری نسبت به نرخ کرنش 0.001 s^{-1} مشاهده می‌شود.



شکل ۳- ریزساختار نمونه‌های آزمون فشار داغ در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد و نرخ کرنشهای الف- 1 s^{-1} و ب- 0.001 s^{-1} .

۴- بحث

صعودی بودن روند منحنی‌ها در شکل ۲ و در کلیه دماها و نرخ کرنشها با افزایش میزان کرنش در مراحل ابتدایی تغییر شکل ناشی از حاکم بودن پدیده کارسختی است. با افزایش میزان کرنش، در منحنی‌ها کارنرمی مشاهده می‌شود. یکی از دلایل اصلی افت تنش سیلان ناشی از وقوع تبلور مجدد می‌باشد. اما شکل ۳- الف، که نشان دهنده ریزساختار نمونه‌ای است که در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد و نرخ کرنش 1 s^{-1} تحت آزمون فشار قرار گرفته است، حاکی از کشیده شدن یوتکتیک‌های حاصل از ساختار ریختگی است و در این شکل دانه‌های تبلور مجدد یافته قابل تشخیص نیستند. با این وجود تحقیقات انجام یافته توسط زانگ و همکارانش [۱۰] وقوع تبلور مجدد را از دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد تأیید می‌کند. علت دیگر مشاهده افت سیلان (کارنرمی) در منحنی‌های با نرخ کرنش بالا حرارت آدیاباتیک ایجاد شده در حین تغییر شکل داغ است. در نرخ کرنشهای بالا، حرارت ناشی از تغییر شکل یا حرارت آدیاباتیک باعث افزایش دمای کاری قطعه می‌شود، اما به علت زمان کوتاه تغییر شکل، انتقال حرارت به ابزار محدود می‌شود و در نتیجه افت استحکام و نرم شدن سیلان را به دنبال خواهد داشت [۶]. از سوی دیگر مشاهده حالت پایا در منحنی‌های تنش- کرنش حاکی از وقوع بازیابی دینامیکی است. در این حالت نرخ کارسختی و نرم شدن ناشی از فرآیند بازیابی یکسان می‌شود.

در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد و در نرخ کرنش اندک چنانکه اشاره شد، پس از افت تنش سیلان در کرنشهای بالاتر، به میزان اندکی تنش سیلان افزایش می‌یابد. یکی از علل آن می‌تواند ناشی از وقوع استحاله نظم به بی‌نظمی و در نتیجه غلبه این فرآیند بر فرآیند ترمیم دینامیکی باشد [۶]. با توجه به کم

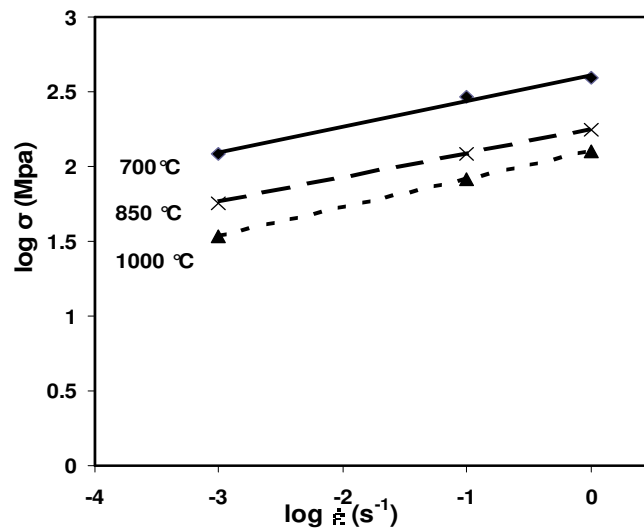
تأثیر دما و نرخ کرنش ...

بودن نرخ کرنش چنین استنباط می شود در این آلیاژ به دلیل زمان لازم و کافی، وقوع استحاله نظم به بی نظمی منجر به کند شدن مهاجرت مرزهای با زاویه بزرگ و در نتیجه به تعویق افتادن تبلور مجدد می گردد [۸، ۱۰].

جهت تعیین معادله بنیادی آلیاژ حین تغییر شکل داغ، نیاز به تعیین ثوابت معادله زرهولمن از رابطه (۱) است. در صورتیکه فرض شود پارامتر n در معادله زره- هولمن معادل معکوس ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m) باشد، بنابراین ضریب حساسیت به نرخ کرنش را می توان از رابطه (۲) بدست آورد [۱۱]:

$$m = \left. \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right|_{\epsilon, T} \quad (2)$$

لذا چنانکه در شکل ۴ نشان داده شده است، m از شیب نمودار $\text{Log } \sigma$ بر حسب $\text{Log } \dot{\epsilon}$ در دماهای مختلف بدست می آید. بنابراین مقدار m ثابت فرض می شود. با محاسبه میانگین شیب منحنی ها مقدار m برابر ۰/۱۷۴ بدست آمد. در نتیجه مقدار n برابر ۵/۷۴۷ حاصل شد.



شکل ۴- نمودار لگاریتمی تغییرات تنش بیک بر حسب نرخ کرنش در درجه حرارت های مختلف.

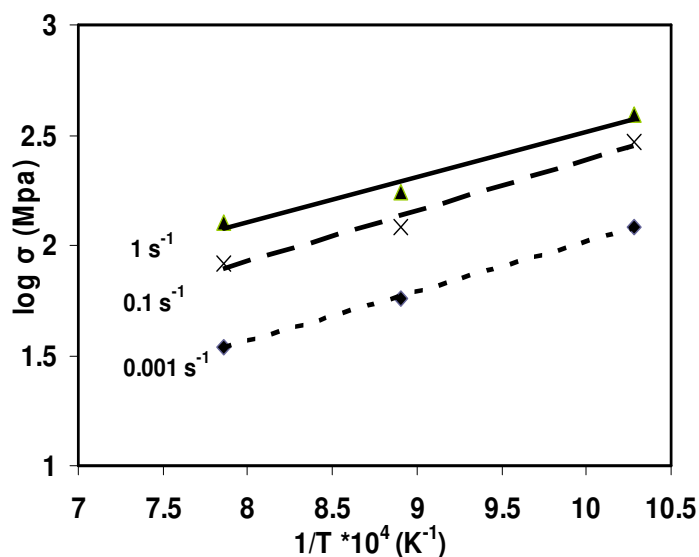
ثابت α نیز از شیب نمودار $\text{Log } \dot{\epsilon}$ بر حسب σ بدست می آید که پس از محاسبه شیب منحنی ها، از رابطه (۳) این پارامتر تعیین می شود [۱۱]:

$$\alpha = \left(\frac{2.303}{n} \right) \left(\frac{\partial (\text{Log } \dot{\epsilon})}{\partial \sigma} \right) \quad (3)$$

که مقدار ثابت α برابر 0.0091 MPa^{-1} بدست آمد. همچنين جهت تعيين انرژی اکتیواسیون کار داغ، Q ، می توان از رابطه (۴) استفاده نمود:

$$Q = nR \left[\frac{\partial \text{Log} \sigma}{\partial (1/T)} \right]_{\epsilon} \quad (4)$$

شکل ۵ نشان دهنده تغییرات $\text{Log} \sigma$ بر حسب $1/T$ است که از شیب این خطوط و با جاگذاری در رابطه (۴)، مقدار انرژی اکتیواسیون کار داغ برای آلیاژ مذکور بدست می آید. در تحقیق انجام یافته توسط پارک و همکارانش [۱۲] اشاره شده است که انرژی اکتیواسیون کار داغ یک پارامتر کمی بوده که میزان آن وابسته به ترکیب شیمیایی، ریزساختار و نرخ کرنش اعمالی است. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که مقدار انرژی اکتیواسیون کار داغ آلیاژ مذکور در شرایط ریختگی و تغییر شکل اعمالی 242 kJ/mol می باشد. همچنین با استفاده از مقادیر بدست آمده Q ، n و α از معادله (۱)، ثابت A به صورت میانگین، در نرخ کرنشها و تنشهای مختلف بدست می آید.



شکل ۵- نمودار تغییرات $\text{Log} \sigma$ بر حسب $\frac{1}{T}$.

با توجه به اینکه تنش سیلان تابعی از پارامتر زنر- هولمن است، بنابراین نمودار $\text{Log} Z$ بر حسب $\text{Log}[\sinh(\alpha \sigma_p)]$ در صورتیکه مکانیزم تغییر شکل پلاستیک ماده از معادله کلی زنر- هولمن (معادله ۱) پیروی کند، بایستی خطی باشد. چنین نموداری که از داده های حاصل از آزمون فشار داغ بدست آمده، در شکل ۶ نشان داده شده است. چنانکه ملاحظه می شود یک رابطه خطی نسبتاً مناسبی بین $\text{Log} Z$ و

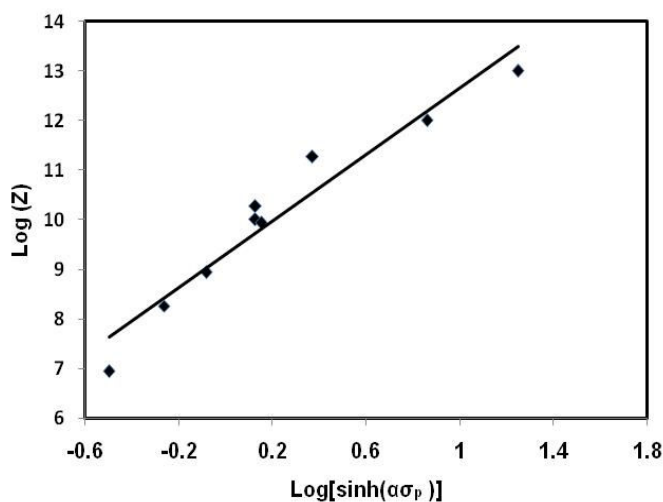
تأثیر دما و نرخ کرنش ...

$\text{Log}[\sinh(\alpha\sigma_p)]$ وجود دارد، که مؤید پیروی کردن تغییر شکل داغ آلیاژ نیکل-تیتانیم در شرایط ریختگی از قانون سینوس هایپربولیک است.

در نهایت با جاگذاری ثوابت بدست آمده در معادله (۱)، معادله بنیادی آلیاژ نیکل-تیتانیم غنی از تیتانیم در شرایط ریختگی به صورت ذیل بدست می آید:

5.747

$$Z = \varepsilon \exp(242 \times 10^3 / 8.314T) = 25.805 \times 10^6 [\sinh(0.0091\sigma)] \quad (5)$$



شکل ۶- نمودار لگاریتمی تغییرات Z برحسب $\sinh(\alpha\sigma_p)$.

۵- نتیجه گیری

۱- در نرخ کرنشهای بالا و دماهای کمتر تغییر شکل داغ، مشاهده افت تنش سیلان پس از تنش پیک می تواند ناشی از وقوع تبلور مجدد دینامیکی و حرارت آدیاباتیک باشد، در حالیکه در نرخ کرنشهای اندک، فرآیند غالب ترمیم، بازیابی دینامیکی است.

۲- انرژی اکتیواسیون کار داغ برای آلیاژ نیکل-تیتانیم غنی از تیتانیم در شرایط ریختگی 242 kJ/mol بدست آمد.

۳- معادله بنیادی تغییر شکل داغ آلیاژ نیکل-تیتانیم غنی از تیتانیم در شرایط ریختگی از قانون سینوس هایپربولیک پیروی می کند.

مراجع

- 1- K. Otsuka and X. Ren, "Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys", *Progress in Materials Science*, V. 50, 2005, PP: 511–678.
- 2- W.J. Moberley, Ph.D thesis, Stanford University, 1991.
- 3- M.H. Wu, "Fabrication of nitinol materials and components", *Materials Science Forum*, V. 394-395, 2002, PP: 285-292.
- 4- Y. Lin, M. Chen and J. Zhong, "Constitutive modeling for elevated temperature flow behavior of 42CrMo steel", *Computational materials science*, V. 42, 2008, PP. 470-477.
- 5- H.C. Lin and S.K. Wu, "Effects of hot rolling on the martensitic transformation of an equiatomic TiNi alloy", *Materials Science and Engineering A*, V. 158, 1992, PP: 87-91.
- 6- S.L. Semiatin and J.J. Jonas, "Formability and workability of Metals: Plastic Instability and Flow Localization", ASM, Metals Park, Ohio, 1984.
- 7- M. Neil, Ph.D thesis, Cranfield University, College of Defence Technology; Department of Materials and Medical Sciences, 1999.
- 8- F.J. Humphreys and M. Hatherly, "Recrystallization and Related Annealing Phenomena", 1st ed., Pergamon, Oxford, United Kingdom, 1996.
- 9- C.M. Sellars, "In Hot Working and Forging Process", C.M. Sellars and C.H.J. Davis, eds., The Metals Society, London, 1979.
- 10- H. Zhang, Y. Yong, X. Liu and J. Xie, "Hot deformation behavior and constitutive relationship of NiTi shape memory alloy during compression at elevated temperatures", *Acta Metallurgica Sinica*, V. 43, No. 9, 2007, PP: 930-936.
- 11- S. Bruschi, S. Poggio, F. Quadri and M.E. Tata, "Workability of Ti-6Al-4V alloy at high temperatures and strain rates", *Materials Letters*, V. 58, 2004, PP: 3622-3629.
- 12- N.K. Park, J.T. Yeom and Y.S. Na, *Journal of materials processing technology*, V. 130-131, 2002, PP: 540-545.

The effect of temperature and strain rate on the dynamic restoration processes of a NiTi alloy

M.Morakabati¹, Sh. Kheirandish², M. Aboutalebi³, A. Karimi Taheri⁴, S.M. Abbasi⁵

1,2,3- Department of metallurgical and materials Engineering, Iran University of Science and Technology,

1-m_morakabati@iust.ac.ir, 2- skheirandish@mail.iust.ac.ir, 3- mrezab@iust.ac.ir

4- Department of materials and Engineering, Sharif University of Technology, ktaheri@sharif.edu

5- Malek-e-ashtar University of Technology, sma_abbasi@yahoo.com

Abstract

In the present work, the effect of hot deformation parameters such as temperature and strain rate on the dynamic restoration processes of a NiTi shape memory alloy was studied. Hot compression tests were performed in the temperature range of 700-1000°C and the strain rate range of 0.001-1 s⁻¹. It was found that at high strain rates dynamic recrystallization and adiabatic heating are responsible for flow softening. While at low strain rates dynamic recovery is the main restoration mechanism. In addition the activation energy required for hot deformation of the investigated alloy in as cast condition is determined and its calculated value is 242 kJ/mol.

Key Words: Hot deformation, NiTi alloy, Hot compression test, Dynamic restoration processes

1- Ph.D. Student
2- Associate Prof.
3- Professor
4- Professor
5- Assistant Prof.