

Study of restoration mechanism and constitutive equations of AA5456 Aluminum alloy during hot deformation process

Navid Nezamabadi Farahani¹, *Yousef Payandeh², Bahman Mirzakhani^{2,3}, Hossein Momeni⁴

1- MSc Student, Department of Materials Science & Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

2- Assistant professor, Department of Materials Science & Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

3- School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

4- University Complex of Materials and Manufacturing Technology, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Citation: Nezamabadi Farahani N, Payandeh Y, Mirzakhani B, Momeni H. Study of restoration mechanism and constitutive equations of AA5456 Aluminum alloy during hot deformation process. *Metallurgical Engineering* 2019; 22(2): 116-123 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.108040.1247>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.108040.1247>

ABSTRACT

Understanding softening mechanisms of wrought aluminum alloy during hot deformation processes is important in order to control microstructure and to predict flow stress accurately in simulation. In this paper, hot compression tests have been done to study the hot deformation behavior of an A5456 aluminum alloy. The effect of temperature, strain and strain rate on flow behavior of the alloy has been studied as well. For this meaning, several cylindrical samples with respectively 10 and 15 mm in diameter and length have been subjected to the test at 350, 400, 450, 500 and 550 °C, strain rates of 0.001, 0.01, 0.1, 1 s⁻¹ and strain of 0.7. The samples were then immediately quenched in water in order to study the microstructure. Analysis of the strain – stress curves at different deformation conditions show that the flow stress decreases with increasing the test temperature and decreasing the strain rate. Because of high stacking fault energy of aluminum alloy, the dominant softening mechanism in this alloy is dynamic recovery. From experimental results, the equations governing the hot deformation behavior of the material have been determined at peak stress and activation energy of 182 KJ/mol for hot deformation process has been obtained.

Keywords: A5456 aluminum alloy, hot deformation, flow stress, dynamic recrystallization, dynamic recovery, constitutive equations.

Received: 16 May 2019

Accepted: 2 November 2019

■ ■

* *Corresponding Author:*

Yousef Payandeh, PhD

Address: Department of Materials Science & Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

Tel: +98 (86) 32625820

E-mail: y-payandeh@araku.ac.ir

بررسی مکانیزم‌های نرم شدن و تعیین معادلات ساختاری در طی تغییر شکل داغ آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶

نوید نظام آبادی فراهانی^۱، یوسف پاینده^۲، بهمن میرزاخانی^۳، حسین مومنی^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.
- ۲- استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.
- ۳- استادیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
- ۴- استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

چکیده

شناخت مکانیزم‌های نرم شدن آلیاژهای نوردی آلومینیوم در طی شکل‌دهی داغ به منظور کنترل ساختار و ریزساختار و پیش‌بینی تنش سیلان جهت شبیه‌سازی صحیح فرآیند شکل‌دهی از اهمیت بالایی برخوردار است. در پژوهش حاضر، آزمایش فشار داغ جهت شناخت رفتار شکل‌دهی داغ آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ و تأثیر پارامترهای دما، کرنش و نرخ کرنش بر تنش سیلان آن‌ها انجام گرفت. نمونه‌های استوانه‌ای شکل از آلیاژ مذکور به قطر ۱۰ mm و ارتفاع ۱۵ mm در دماهای ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۰ و ۵۵۰ °C و نرخ کرنش‌های ۰/۱، ۰/۱، ۰/۱ s^{-۱} تا ۰/۰۰۱ تا کرنش ۰/۷ تغییر شکل داده شده و بلافاصله پس از پایان تغییر شکل داغ به منظور مطالعه ریزساختاری در آب کوئنچ شدند. بررسی منحنی‌های سیلان آلیاژ مذکور با استفاده از نتایج آزمایش فشار داغ نشان می‌دهد که با افزایش دمای تغییر شکل و کاهش نرخ کرنش، تنش سیلان کاهش یافته و به دلیل انرژی نقص در چیده شدن بالای آلومینیوم تمایل به بازیابی دینامیکی بیش از تبلور مجدد دینامیکی است. به کمک معادلات ساختاری، روابط لازم برای محاسبه تنش قله این آلیاژ در شرایط مختلف دما و نرخ کرنش بیان گردید و انرژی فعال‌سازی تغییر شکل داغ این آلیاژ ۱۸۲ KJ.mol^{-۱} محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶، تغییر شکل داغ، تنش سیلان، تبلور مجدد دینامیکی، بازیابی دینامیکی، معادلات ساختاری.

دریافت: ۱۳۹۸/۲/۲۶ | پذیرش: ۱۳۹۸/۸/۱۱

۱. مقدمه

آلومینیوم و آلیاژهای آن با انرژی نقص چیدن^۳ (SFE) بالا که لغزش متقاطع نابجایی‌ها به راحتی انجام می‌شود، بازیابی دینامیکی مکانیزم غالب نرم شدن دینامیکی است [۴،۵]. برعکس در فلزات با انرژی نقص چیدن پایین یا متوسط که فرآیند بازیابی آهسته انجام می‌شود، در نتیجه کرنش پلاستیک انباشته شده بعد از رسیدن به یک مقدار مشخص، پدیده تبلور مجدد دینامیکی رخ می‌دهد [۵،۶،۷]. پدیده‌های کارسختی و کارنرمی رخ داده حین کار داغ متأثر از ترکیب شیمیایی آلیاژ و پارامترهای فرآیند مانند دما، نرخ کرنش و میزان تغییر شکل است [۸،۹،۱۰]. شناخت نحوه تأثیر این پارامترها بر ریزساختار و تنش سیلان، در برنامه‌ریزی درست فرآیند تولید بسیار ضروری است [۱۱،۱۲].

بر این اساس تحقیقات گسترده‌ای در زمینه رفتار تغییر شکل

آلیاژهای نوردی آلومینیوم برای تولید محصولات نهایی و نزدیک به شکل نهایی، ابتدا تحت فرآیندهای شکل‌دهی داغ و گرم نظیر نورد، اکستروژن و آهنگری واقع می‌شوند. نکته مهم در تولید محصولات با خواص مطلوب، کنترل ساختار و ریزساختار از همان مراحل ابتدایی کارگرم است [۱،۲]. در طی تغییر شکل داغ فلزات و آلیاژها، پدیده‌های کارسختی و کارنرمی اتفاق می‌افتد که رقابت این دو پدیده تنش سیلان ماده را تعیین می‌کند. به فرآیندهای نرم شدنی که هم‌زمان با تغییر شکل رخ می‌دهند، بازیابی دینامیکی^۱ و تبلور مجدد دینامیکی^۲ می‌گویند [۳]. به هنگام کار داغ در فلزاتی نظیر

1. Dynamic recovery
2. Dynamic recrystallization

* نویسنده مسئول:

دکتر یوسف پاینده

نشانی: اراک، دانشگاه اراک، دانشکده فنی - مهندسی، گروه مهندسی مواد و متالورژی.

تلفن: ۳۲۶۲۵۸۲۰ (۸۶) ۹۸+

پست الکترونیکی: y-payandeh@araku.ac.ir

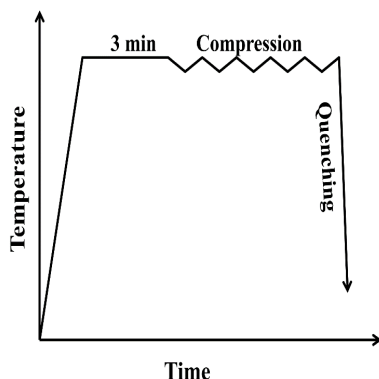
جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ ۵۴۵۶ آلومینیوم (%wt) [۲۵]

Zn	Ti	Ni	Cr	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
۰/۲۵	۰/۲	۰/۰۵	۰/۱	۰/۲۵	۰/۴	۰/۱	۰/۶	۵/۵	بقیه

با توجه به اینکه مراحل ابتدایی شکل دهی آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ بصورت داغ و گرم انجام می‌شود و با عنایت به اهمیت این آلیاژ در صنعت در تحقیق حاضر، رفتار تغییر شکل داغ این آلیاژ به کمک بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر فرآیند، شناسایی و تعیین گردیده است. همچنین معادلات ساختاری مناسبی برای پیش بینی رفتار منحنی تنش سیلان این آلیاژ در دماهای بالا به دست آمده است.

۲. مواد و روش تحقیق

در این مقاله، از آزمایش فشار داغ به منظور بررسی تأثیر پارامترهای دما، کرنش و نرخ کرنش بر رفتار تغییر شکل داغ آلیاژ اکستروژن گرم شده آلومینیوم ۵۴۵۶ با ترکیب شیمیایی مشخص (جدول ۱) استفاده شد [۲۵]. نمونه‌های استوانه‌ای شکل، به قطر 10 ± 0.1 mm و ارتفاع 15 ± 0.1 mm در جهت اکستروژن از قطعه اکستروژنی اولیه با استفاده از ماشین کاری تهیه شدند نمونه‌ها ابتدا طبق شکل (۱) داخل کوره دستگاه فشار گرم تا دمای تغییر شکل مورد نظر حرارت داده شده و به مدت ۳ دقیقه در داخل کوره برای هم‌دما شدن نگاه‌داری شدند و سپس تحت فشار یک بعدی واقع شدند. عملیات فشار داغ به کمک دستگاه فشار INSTRON 60 ton مجهز به کوره مقاومتی صورت گرفت. در این تحقیق تغییر شکل در دماهای ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۰، ۵۵۰ °C و نرخ کرنش‌های ۰/۱، ۰/۰۱، ۰/۰۰۱ s⁻¹ تا کرنش ۰/۷ انجام گرفت. نمونه‌ها به منظور بررسی ریزساختار بلافاصله پس از پایان تغییر شکل داغ در آب کوئنچ شدند. برای کاهش اصطکاک سطح تماس بین فک‌ها و نمونه از ورق گرافیت استفاده شد [۴].



شکل ۱. مراحل آزمایش فشار داغ

داغ و گرم آلیاژهای آلومینیوم صورت گرفته است. وانگ و همکارانش [۱۳] وقوع تبلور مجدد در آلیاژ Al-5.8Mg-0.4Mn-0.25Sc-0.1Zr را بررسی کرده‌اند و محدوده دمایی ۲۵۰ °C تا ۳۵۰ °C را برای شروع و اتمام تبلور مجدد بیان کرده‌اند. چو و همکارانش [۱۴] با بررسی رفتار کار داغ آلیاژ Al-5wt.%Mg در محدوده دمایی ۳۵۰ °C تا ۵۰۰ °C و محدوده نرخ کرنش ۰/۰۵ s⁻¹ تا ۱ s⁻¹ به این نتیجه رسیده‌اند که با کاهش نرخ کرنش، دانه‌های حاصل از تبلور مجدد دینامیکی افزایش می‌یابد.

از دیدگاه متالورژیکی و مکانیکی، تعیین معادلات ریزساختاری در مدل‌سازی تنش سیلان داغ و پیش بینی منحنی‌های سیلان داغ برای فرآیندهای شکل‌دهی نظیر نورد و آهن‌گری بسیار با اهمیت است [۱۵، ۱۶، ۱۷]. یکی از روابط اساسی در این زمینه معادله سلارز^۴ و تگارت^۶ است (رابطه (۱)) [۵، ۱۸]. طبق این معادله تنش، نرخ کرنش و دما توسط یک رابطه تجربی سینوس هایپربولیکی با هم ارتباط دارند، که به صورت زیر بیان می‌شود:

رابطه (۱)

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

که در آن A ثابت بر حسب برثانیه n توان تنش، بدون واحد و α ضریب تنش بر حسب MPa^{-1} ، R ثابت جهانی گازها بر حسب $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ، T دما بر حسب کلوین، σ تنش بر حسب MPa، $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش بر حسب s⁻¹ و Q انرژی فعال‌سازی تغییر شکل بر حسب $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ هستند. تغییرات رابطه بالا منجر به بیان رابطه زئر-هولمن^۸ به عنوان یکی از ساده‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌ها به صورت زیر شده است [۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲]:

رابطه (۲)

$$z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = f(\sigma) = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n$$

در این معادله، پارامتر z بر حسب s⁻¹، نرخ کرنش اصلاح شده با دما است و برای محدوده وسیعی از شرایط تغییر شکل استفاده می‌شود. به کمک این رابطه می‌توان انرژی فعال‌سازی کار داغ را محاسبه و تنش سیلان داغ را در شرایط مختلف پیش‌بینی نمود [۲۳، ۲۴].

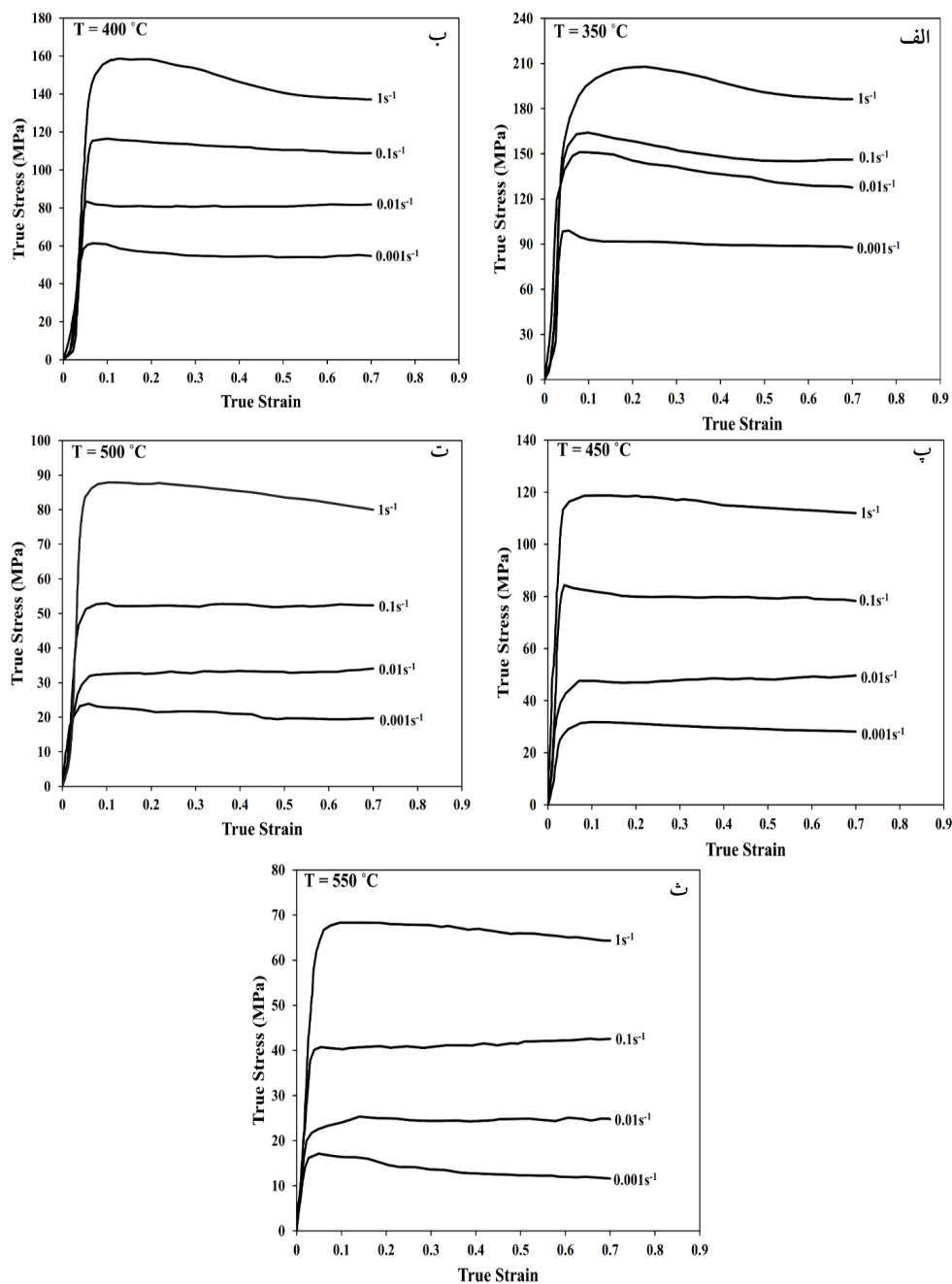
4. Wang
5. Cho
6. Sellars
7. Tegart
8. Zener-Hollomon

۳. نتایج و بحث

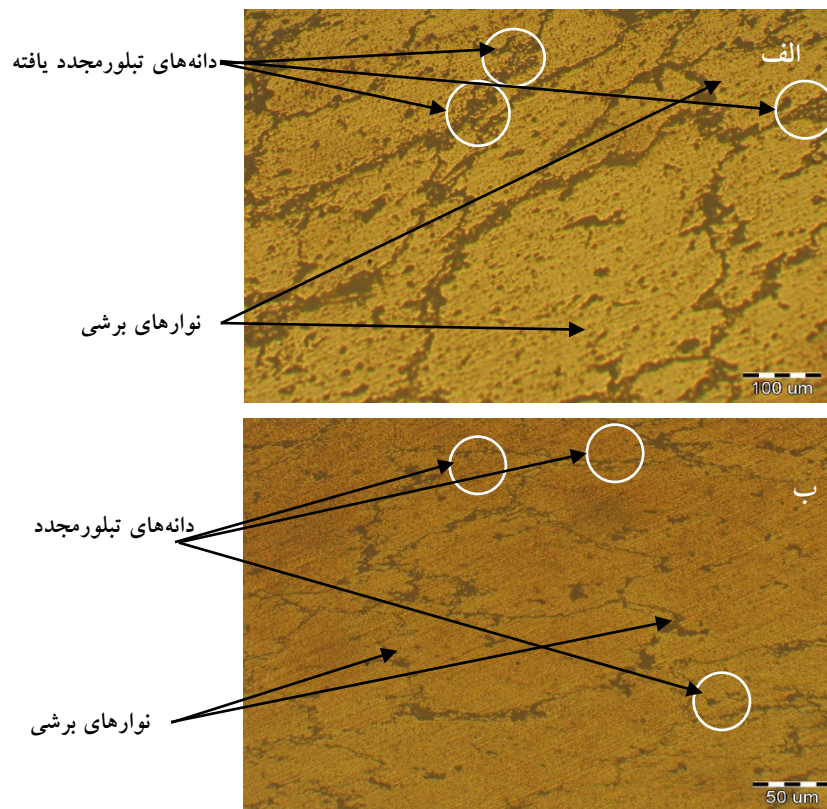
منحنی‌های سیلان حاصل از فشار داغ

منحنی‌های سیلان آلیاژ ۵۴۵۶ بدست آمده از آزمایش فشار داغ در دماها و نرخ کرنش‌های مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، روند کلی منحنی‌های سیلان بدین صورت است که در ابتدا تنش سیلان با زیاد شدن کرنش افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه، کاهش یافته و سپس

در کرنش‌های بالاتر تقریباً ثابت می‌ماند. این تغییرات نتیجه برهم کنش نابجایی‌ها و رقابت دو پدیده کارسختی و کار نرمی است. در مراحل اولیه تغییر شکل به علت افزایش چگالی نابجایی‌ها، تنش سیلان افزایش یافته است و کارسختی بر کار نرمی غلبه دارد. پس از آنکه چگالی نابجایی‌ها به یک مقدار بحرانی می‌رسد به دلیل افزایش انرژی داخلی ناشی از افزایش چگالی نابجایی‌ها، شرایط برای وقوع تبلور مجدد دینامیکی مهیا می‌گردد. در این شرایط به دلیل نرم شدن ماده در اثر تبلور مجدد دینامیکی، تنش سیلان شروع به کاهش می‌کند



شکل ۲. منحنی سیلان آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ در دماها و نرخ کرنش‌های مشخص



شکل ۳. تصویر متالوگرافی آلیاژ Al-5.9Mg الف: در دمای ۴۰۰ °C ب: در دمای ۴۵۰ °C و نرخ کرنش ۰.۱ S-۱

دمای ۴۵۰ °C تبلور مجدد دینامیکی به صورت جزئی رخ داده و به علت بالا بودن دمای تغییر شکل و SFE این آلیاژ، بازیابی دینامیکی بر تبلور مجدد دینامیکی غلبه کرده است (شکل ۳-ب). در خصوص منحنی‌های تنش سیلان حاصل از تغییر شکل داغ آلیاژ در دماهای ۵۰۰ °C و ۵۵۰ °C به نظر می‌رسد با توجه به بالا بودن دمای تغییر شکل، سرعت حرکت مرز دانه‌ها بالا بوده و می‌تواند تبلور مجدد دینامیکی به صورت جزئی حین کار داغ رخ دهد. بر خلاف فلزات و آلیاژها با SFE پایین نظیر فولادها، در آلیاژ آلومینیوم مورد بررسی، طبق منحنی‌های سیلان (شکل ۲)، با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش مکانیزم نرم شدن غالب بازیابی است علت این مسئله این است که در آلیاژ مورد بررسی به دلیل انرژی عیب انباشتگی بالا سرعت بازیابی و عبور نابجایی‌ها از موانع بالا است.

تعیین معادلات ساختاری

معادلات ساختاری در تعیین معادلات اساسی تنش استفاده می‌شود. بدین ترتیب امکان پیش‌بینی دقیق تنش سیلان در طی فرآیندهای شکل‌دهی داغ میسر می‌گردد. در این پژوهش جهت محاسبه انرژی فعال‌سازی تغییر شکل داغ و پیش‌بینی تنش قله از معادلات ساختاری استفاده شده است. برای نوشتن این معادله در نقطه قله، اطلاعات این نقطه از منحنی‌های سیلان در دماها و نرخ کرنش‌های مختلف

که باعث بوجود آمدن یک قله در منحنی سیلان می‌شود. در ادامه سرعت کارسختی و کار نرمی ماده به حد تعادل می‌رسد و تنش سیلان با پیشرفت کرنش مقدار تقریباً ثابتی پیدا می‌کند. عنوان شده است که وجود قله در منحنی‌های سیلان می‌تواند نشان‌دهنده وقوع تبلور مجدد دینامیکی در حین کار داغ باشد. ولی نمایانگر تبلور مجدد کامل نمونه نیست و ممکن است که تبلور مجدد به صورت جزئی رخ داده باشد و به دلیل بالا بودن انرژی نقص چیدن، بازیابی به سرعت انجام گیرد [۳]. با توجه به منحنی‌های سیلان در شکل (۲)، این امر در دماهای بالاتر از ۴۵۰ °C مشهود است. نمودارهای شکل (۲-الف) و (۲-ب) نشان می‌دهد که در تمامی نرخ کرنش‌های آزمایش فشار داغ در دماهای ۳۵۰ °C و ۴۰۰ °C، تبلور مجدد دینامیکی رخ داده است (شکل ۳-الف). در منحنی‌های تنش سیلان حاصل از تغییر شکل داغ آلیاژ در دمای ثابت ۴۵۰، ۵۰۰ و ۵۰۰ °C طبق شکل (۲-پ)، (۲-ت) و (۲-ث) قله مشابه شکل (۲-الف) و (۲-ب) مشاهده نمی‌شود. به نظر می‌رسد دمای ۴۵۰ °C را بتوان به عنوان یک دمای بحرانی برای این آلیاژ در نظر گرفت که در دماهای بالاتر از آن، نابجایی‌های تولید شده حین کار مکانیکی به دلیل دمای بالا از بین می‌روند و حذف می‌شوند. پس از شروع تبلور مجدد دینامیکی افزایش چگالی نابجایی‌ها به حدی زیاد نیست که باعث وقوع قله در منحنی سیلان شود. می‌توان این‌گونه برداشت نمود که در

جدول (۲) گزارش شده است. در نتیجه با توجه به مقادیر بدست آمده برای ثابت α ، n و A ، رابطه زنر-هولمن بر حسب تنش قله را می‌توان طبق رابطه (۴) بیان نمود.

رابطه (۴)

$$z = 1.088 \times 10^{11} [\sinh(0.0174\sigma_p)]^{3.4388}$$

مقدار n را همچنین می‌توان از شیب خطوط تغییرات $\ln z$ بر حسب $\ln(\sinh(\alpha\sigma_p))$ طبق شکل (۶) بدست آورد. با توجه به شکل (۶) با افزایش پارامتر z ، تنش قله افزایش پیدا می‌کند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، انطباق خط عبور داده شده از این نقاط زیاد است. مقدار این شیب برابر با ۳/۴۴۱۴ است که با مقدار قبلی بدست آمده n در جدول (۲) تقریباً یکی است. با توجه به ثوابت ماده، معادله پیش بینی تنش نقطه قله به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود:

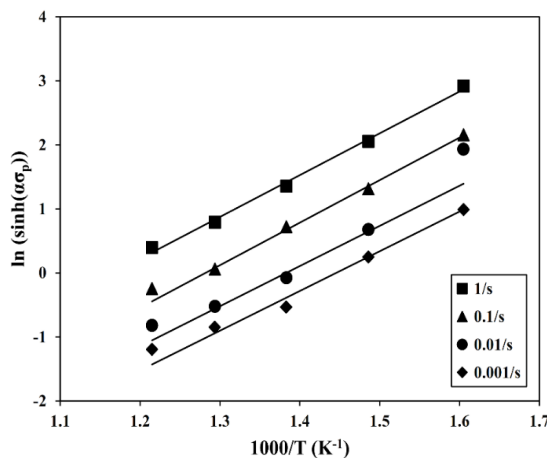
رابطه (۵)

$$\sigma_p = \frac{1}{0.0174} \ln \left[\left(\frac{z}{1.088 \times 10^{11}} \right)^{\frac{1}{3.4388}} + \left[\left(\frac{z}{1.088 \times 10^{11}} \right)^{\frac{2}{3.4388}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right]$$

برای محاسبه پارامتر z در رابطه (۵) از رابطه (۳) استفاده می‌گردد. همچنین رابطه بین تنش نقطه قله با دما و نرخ کرنش به صورت رابطه (۶) بیان می‌شود.

رابطه (۶)

$$\dot{\epsilon} = 1.088 \times 10^{11} [\sinh(0.0174\sigma_p)]^{3.4388} \exp\left(\frac{-21924.75}{T}\right)$$



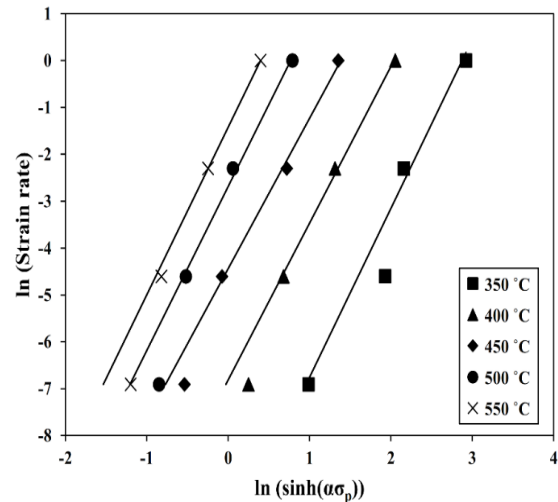
شکل ۵. منحنی تغییرات $\ln(\sinh(\alpha\sigma_p))$ بر حسب $1000/T$ (K⁻¹) در نرخ کرنش‌های متفاوت

(شکل (۲)) استخراج شده است. با محاسبه ثوابت ماده در نقطه قله می‌توان رفتار سیلان ماده را در شرایط مختلف و نقطه قله پیش‌بینی کرد. جهت محاسبه ضریب تنش (α) و توان تنش (n)، منحنی $\ln(\text{Strain rate})$ بر حسب $\ln(\sinh(\alpha\sigma_p))$ در دماهای مختلف طبق شکل (۴) رسم و با تغییر α تا موازی شدن خطوط منحنی در دماهای مختلف، مقدار α مشخص گردیده است. شیب منحنی‌های شکل (۴) نشان دهنده مقدار n است. مقادیر n و α در جدول ۲ گزارش شده است. میانگین شیب منحنی‌های $\ln(\sinh(\alpha\sigma_p))$ بر حسب $\frac{1000}{T}$ (K⁻¹) (شکل (۵)) نشان دهنده مقدار انرژی فعال‌سازی تغییر شکل داغ (Q) است که در جدول ۲ گزارش شده است. این مقدار تقریباً نزدیک به مقادیر انرژی فعال‌سازی تغییر شکل داغ برای آلیاژها با ترکیب مشابه است [۱۳، ۱۴]. با توجه به مقدار Q بدست آمده رابطه (۲) به صورت زیر بیان می‌شود:

رابطه (۳)

$$z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{21.92 \times 10^3}{T}\right)$$

با استفاده از رابطه (۳) می‌توان مقدار z را در تمامی دماها و نرخ کرنش‌های آزمایش بدست آورد.



شکل ۴. منحنی $\ln(\text{Strain rate})$ بر حسب $\ln(\sinh(\alpha\sigma_p))$ در دماهای مختلف

مقدار ثابت A از عرض از مبدا منحنی $\ln z$ بر حسب $\ln(\sinh(\alpha\sigma_p))$ (شکل (۶) بدست می‌آید که لگاریتم آن در

جدول ۲. مقادیر ثوابت معادلات ساختاری آلیاژ

α (MPa ⁻¹)	n	$\log(A$ (s ⁻¹))	Q (KJ.mol ⁻¹)
۰/۰۱۷۴	۳/۴۳۸۸	۱۱/۰۳۶	۱۸۲

۲. با استفاده از منحنی‌های سیلان داغ بدست آمده از آزمایش فشار داغ، انرژی فعال‌سازی تغییر شکل داغ آلیاژ، 182 KJ.mol^{-1} محاسبه شد. این انرژی لازم برای تغییر شکل داغ آلیاژ است.

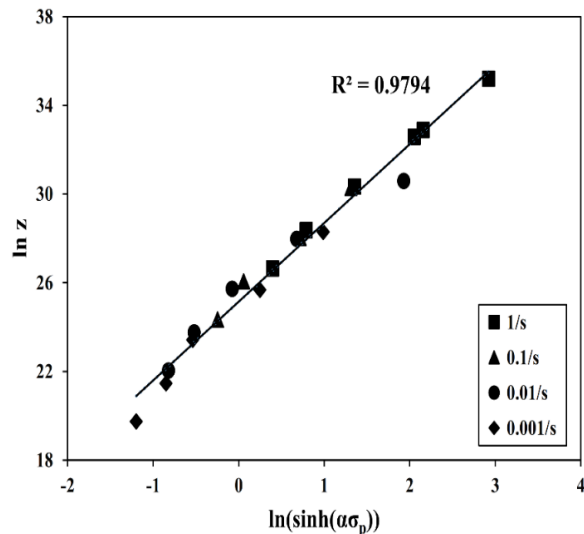
۳. برای محاسبه تنش نقطه قله آلیاژ در منحنی سیلان داغ رابطه زیر استخراج گردید:

$$\sigma_p = 1 / (0.0174) \ln \left[\left(\frac{z}{(1.088 \cdot 10^{11})} \right)^{1 / (3 \cdot 4388)} + \left[\left(\frac{z}{(1.088 \cdot 10^{11})} \right)^{2 / (3 \cdot 4388)} + 1 \right]^{12 / 3} \right]$$

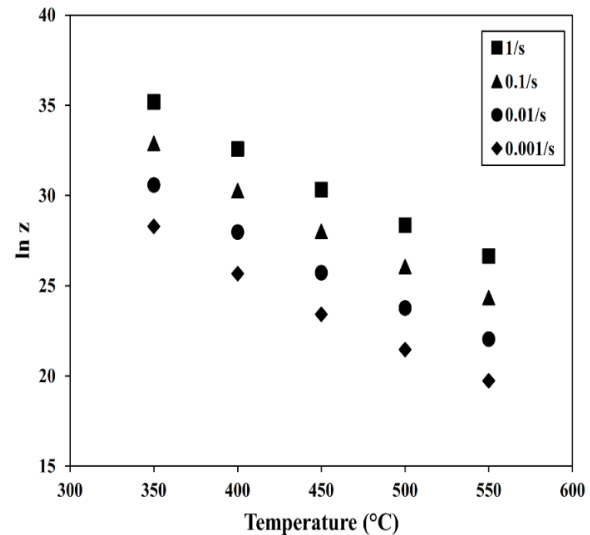
تشکر و قدردانی

از حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه اراک به دلیل حمایت مالی از طرح پژوهشی به شماره قرارداد ۹۷/۳۷۹۸ تشکر و قدردانی می‌شود.

همانطور که رابطه (۳) نشان می‌دهد با رسم تغییرات $\ln z$ بر حسب دما در نرخ کرنش‌های مختلف طبق شکل (۷)، این نتیجه حاصل می‌شود که با کاهش نرخ کرنش و افزایش دما، پارامتر z کاهش می‌یابد. بنابراین با استفاده از معادلات ساختاری (۳) تا (۶) پیش‌بینی تنش سیلان امکان‌پذیر است.



شکل ۶. منحنی $\ln z$ بر حسب $\ln(\sinh(\alpha\sigma_p))$



شکل ۷. رابطه بین پارامتر z و دما در نرخ کرنش‌های متفاوت

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر پارامترهای دما، کرنش و نرخ کرنش بر رفتار کار داغ آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ پرداخته شد که نتایج کلی زیر حاصل گردید:

۱. با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش، مکانیزم غالب کار داغ در این آلیاژ از تبلور مجدد دینامیکی به بازیابی دینامیکی تغییر پیدا می‌کند.

References

- [1] Tehovnik, F., Burja, J., Podgornik, B.: Microstructural Evolution of Inconel 625 during Hot Rolling. *Mater. Tehnol.* 49, 801-806 (2015).
- [2] Rajamuthamilselvan, M., Ramanathan, S.: Hot Deformation Behaviour of 7075 Alloy. *J. Alloys Compd.* 509, 948-952 (2011).
- [3] Humphreys, F.J., Hatherly, M.: *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. Elsevier Science (2012).
- [4] Meng, G., Li, B., Li, H., Huang, H., Nie, Z.: Hot Deformation and Processing Maps of an Al-5.7wt.%Mg Alloy with Erbium. *Mater. Sci. Eng. A.* 517, 132-137 (2009).
- [5] Cabañas, N., Penning, J., Akdut, N., De Cooman, B.C.: High-Temperature Deformation Properties of Austenitic Fe-Mn Alloys. *Metall. Mater. Trans. A.* 37, 3305-3315 (2006).
- [6] Paul, B., Sarkar, A., Chakravartty, J.K., Verma, A., Kapoor, R., Bidaye, A.C., Sharma, I.G., Suri, A.K.: Dynamic Recrystallization in Sintered Cobalt during High-Temperature Deformation. *Metall. Mater. Trans. A.* 41, 1474-1482 (2010).
- [7] Hosseini-pour, S.J.: An Investigation into Hot Deformation of Aluminum Alloy 5083. *Mater. Des.* 30, 319-322 (2009).
- [8] Wen, D.-X., Lin, Y.C., Li, H.-B., Chen, X.-M., Deng, J., Li, L.-T.: Hot Deformation Behavior and Processing Map of a Typical Ni-Based Superalloy. *Mater. Sci. Eng. A.* 591, 183-192 (2014).
- [9] Lin, Y.C., Li, L.-T., Xia, Y.-C., Jiang, Y.-Q.: Hot Deformation and Processing Map of a Typical Al-Zn-Mg-Cu Alloy. *J. Alloys Compd.* 550, 438-445 (2013).
- [10] Guo, L., Yang, S., Yang, H., Zhang, J.: Processing Map of As-cast 7075 Aluminum Alloy for Hot Working. *Chinese J. Aeronaut.* 28, 1774-1783 (2015).
- [11] Fan, C., Peng, Y., Yang, H., Zhou, W., Yan, H.: Hot Deformation Behavior of Al-9.0Mg-0.5Mn-0.1Ti Alloy Based on Processing Maps. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 27, 289-297 (2017).
- [12] Jiang, H., Yang, L., Dong, J., Zhang, M., Yao, Z.: The Recrystallization Model and Microstructure Prediction of Alloy 690 during Hot Deformation. *Mater. Des.* 104, 162-173 (2016).
- [13] Wang, Y., Pan, Q., Song, Y., Li, C., Li, Z., Chen, Q., Yin, Z.: Recrystallization of Al-5.8Mg-Mn-Sc-Zr Alloy. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 23, 3235-3241 (2013).
- [14] Cho, J.R., Bae, W.B., Hwang, W.J., Hartley, P.: A Study on the Hot-Deformation Behavior and Dynamic Recrystallization of Al-5 wt.%Mg Alloy. *J. Mater. Process. Technol.* 118, 356-361 (2001).
- [15] Zhang, H., Jin, N., Chen, J.: Hot Deformation Behavior of Al-Zn-Mg-Cu-Zr Aluminum Alloys during Compression at Elevated Temperature. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 21, 437-442 (2011).
- [16] Babu, K.A., Mandal, S., Athreya, C.N., Shakthipriya, B., Sarma, V.S.: Hot Deformation Characteristics and Processing Map of a Phosphorous Modified Super Austenitic Stainless Steel. *Mater. Des.* 115, 262-275 (2017).
- [17] Puchi-Cabrera, E.S.: Simple Constitutive Description of Al-5.5Mg Alloy Deformed at Elevated Temperatures and Strain Rates. *Mater. Sci. Technol.* 22, 699-705 (2006).
- [18] McQueen, H., Ryan, N.: Constitutive Analysis in Hot Working. *Mater. Sci. Eng. A.* 322, 43-63 (2002).
- [19] Aliakbari Sani, S., Ebrahimi, G.R., Kiani Rashid, A.R.: Hot Deformation Behavior and Dynamic Recrystallization Kinetics of AZ61 and AZ61 + Sr Magnesium Alloys. *J. Magnes. Alloy.* 4, 104-114 (2016).
- [20] Wu, F., Xu, W., Jin, X., Zhong, X., Wan, X., Shan, D., Guo, B.: Study on Hot Deformation Behavior and Microstructure Evolution of Ti55 High-Temperature Titanium Alloy. *Metals (Basel).* 7, 319 (2017).
- [21] Mrówka-Nowotnik, G., Sieniawski, J., Kotowski, S., Nowotnik, A., Motyka, M.: Hot Deformation Of 6XXX Series Aluminium Alloys. *Arch. Metall. Mater.* 60, 1079-1084 (2015).
- [22] Mirzadeh, H., Cabrera, J.M., Najafizadeh, A.: Modeling and Prediction of Hot Deformation Flow Curves. *Metall. Mater. Trans. A.* 43, 108-123 (2012).
- [23] Huang, X., Zhang, H., Han, Y., Wu, W., Chen, J.: Hot Deformation Behavior of 2026 Aluminum Alloy during Compression at Elevated Temperature. *Mater. Sci. Eng. A.* 527, 485-490 (2010).
- [24] Peng, J., Wang, Y., Zhong, L., Peng, L., Pan, F.: Hot Deformation Behavior of Homogenized Al-3.2Mg-0.4Er Aluminum Alloy. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 26, 945-955 (2016).
- [25] Prasad, Y.V.R.K., Rao, K.P., Sasidhara, S.: *Hot Working Guide: A Compendium of Processing Maps*, Second Edition. ASM International, (2015).