

## بررسی تاثیر نرخ کرنش بر رفتار کار گرم آلیاژ منیزیم AZ31

سید محمود فاطمی ورزانه

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی و مواد- دانشکده فنی- دانشگاه تهران

عباس زارعی هنزکی

دانشیار گروه مهندسی متالورژی و مواد- دانشکده فنی- دانشگاه تهران

امید گل محله

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی و مواد- دانشکده فنی- دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۳/۱/۲۲، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۳/۷/۱۱، تاریخ تصویب ۸۳/۹/۷)

### چکیده

آلیاژ AZ31، از جمله آلیاژهای کارپذیر منیزیم با استحکام متوسط و شکل پذیری بالا است که امروزه کاربرد زیادی در صنایع مختلف پیدا کرده است. برای بهینه کردن فرآیندهای شکل دهی و خواص نهایی این آلیاژ، بررسی دقیق تر مشخصه های تغییر شکل گرم آن ضروری می باشد. یکی از پارامترهای مستقل تأثیر گذار در فرآیندهای شکل دهی نرخ اعمال تغییر شکل می باشد. با توجه به تأثیر تنش های فشاری در فرآیند های شکل دهی آلیاژهای منیزیم، که شامل فرآیند های نورد، آهنگری و اکستروژن می باشد، در این تحقیق با استفاده از آزمایش فشار گرم اثر نرخ کرنش بر تغییر شکل گرم آن تحت بررسی قرار گرفته است. منحنیهای تنش - کرنش و تغییرات ریزساختار در نرخ کرنشهای متفاوت مورد بحث قرار گرفته و نتایج حاصله بر اساس اصول تغییر شکل گرم آلیاژهای منیزیم بحث شده است.

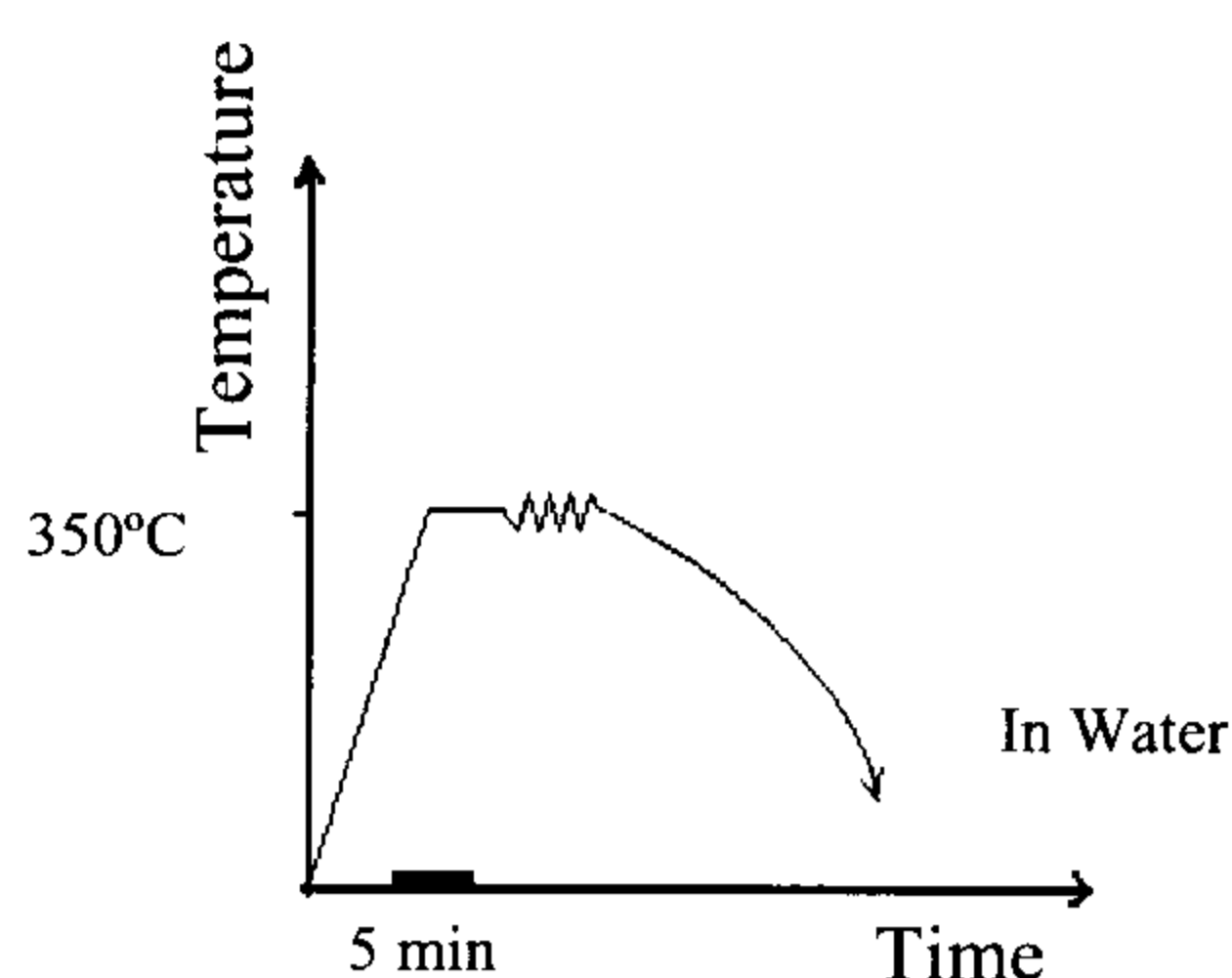
**واژه های کلیدی:** آلیاژ منیزیم AZ31، نرخ کرنش، تبلور مجدد، دو قلوئی، منحنی تنش-کرنش حقیقی

### مقدمه

است. Myshleav و همکارانش [۲] تأثیر نرخ کرنش و دما را بر تحولات زیر ساختاری<sup>۱</sup> این آلیاژ مورد بحث قرار داده اند. نتایج آن تحقیقات نشان میدهد که با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش، نقش بازیابی در ترمیم ساختار افزایش می یابد و زیر ساختارهای بازیابی شده در داخل نوارهای دوقلوئی، در تقاطع دوقلوئی ها و در مجاورت مرز دانه های اولیه باعث ایجاد دانه های فرعی می شوند. این دانه ها در ادامه تغییر شکل با افزایش اختلاف جهت گیری خود به دانه های اصلی تبدیل می شوند. Barnett [۳] نیز در تحقیقات خود با استفاده از روابط بنیادی تغییر شکل، تأثیر نرخ کرنش و دما را بر تنش سیلان آلیاژ AZ31 مورد بررسی قرار داده است. وی نشان داد که در تنشهای زیر ۹۰ MPa می توان نرخ کرنش و تنش سیلان را با یک رابطه توانی به یکدیگر مرتبط ساخت. از آنجاییکه تغییرات اندک در ترکیب شیمیایی این آلیاژ منجر به تغییر رفتار سیلان گرم آن خواهد شد تحقیقات دقیق تر جهت درک بهتر تأثیر پارامترهای مذکور ضروری می باشد. در این پژوهش رفتار کارگرم آلیاژ AZ31 مورد بررسی قرار گرفته

در گذشته آلیاژهای منیزیم بصورت محصولات ریختگی مورد استفاده قرار گرفته اند، اما در دهه اخیر، آلیاژهای کارپذیر منیزیم نیز بدلیل استحکام و شکل پذیری بالاتر مورد توجه صنایع مختلف بخصوص صنایع خودروسازی واقع شده اند. در این راستا تولید آلیاژ AZ91 که مهمترین آلیاژ ریختگی منیزیم است در سال ۱۹۹۷ از ۸۱ درصد مجموع تولید، به حدود ۷۰ درصد در سال ۲۰۰۲ رسیده است [۱]. این مطلب افزایش تولید آلیاژهای کارپذیر را نشان می دهد. جهت ایجاد توجه اقتصادی در جایگزینی آلیاژهای آلومینیوم یا مس با آلیاژهای کارپذیر منیزیم ضروری است مطالعات ویژه در خصوص بهینه سازی تولید این محصولات صورت پذیرد. بطور کلی در آلیاژهای منیزیم فاکتورهای دما، نرخ کرنش، جهت گیری کریستالی و نوع تغییر شکل می توانند بر مشخصه های تغییر شکل گرم آلیاژ تأثیر گذار باشند. آلیاژ AZ31 از جمله آلیاژهای کارپذیر منیزیم می باشد که در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات گسترده ای در زمینه کار گرم این آلیاژ شروع شده

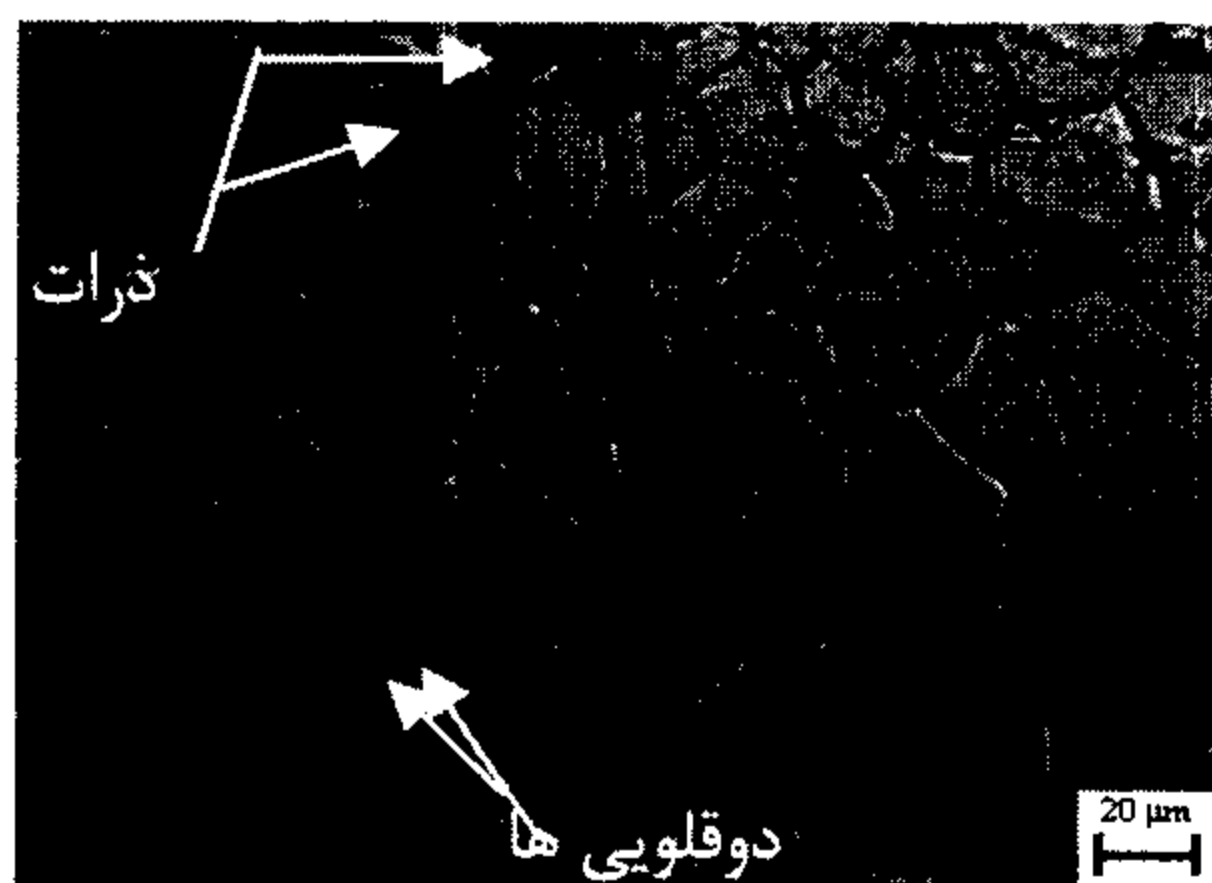
ریز ساختاری حکاکی شدند.



شکل ۱: شماتیک سیکل حرارتی- مکانیکی اعمال شده.

## نتایج و بحث

ریز ساختار اولیه آلیاژ AZ31 در شکل (۲) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده میشود این ریز ساختار شامل دانه های هم محور محصول تبلور مجدد آلیاژ در انتهای نورد گرم میباشد. بعلاوه دوقلوبی های تشکیل شده و ذرات  $Mg_{17}Al_{12}$  (با توجه به نمودار فازی  $Mg-Al$ ) رسوب داده شده روی بعضی از مرزها نیز قابل تشخیص میباشدند. اندازه متوسط دانه های اولیه ۳۲ میکرومتر اندازه گیری شده است.



شکل ۲: ریز ساختار اولیه آلیاژ AZ31 مورد بررسی.

### بررسی منحنی های سیلان

نمودارهای تنش حقیقی - کرنش حقیقی بدست آمده از آزمایشهای فشار گرم در شکل (۳) نشان داده شده اند. در تمام نمودارها بعد از منطقه تغییر شکل الاستیک یک ناحیه کار سختی مشاهده می شود. در حین تغییر شکل پلاستیک ساختارهای HCP، بدلیل سیستمهای لغزش محدود، دوقلوبی های مکانیکی در دانه هایی که دارای جهت گیری مناسب هستند، تشکیل می شوند. کار سختی ایجاد شده با فرایندهای لغزش و دو قلوبی شدن،

واثر نرخ کرنش بعنوان یکی از پارامترهای اصلی تغییر شکل گرم، بررسی و تجزیه و تحلیل شده است.

## روش تحقیق

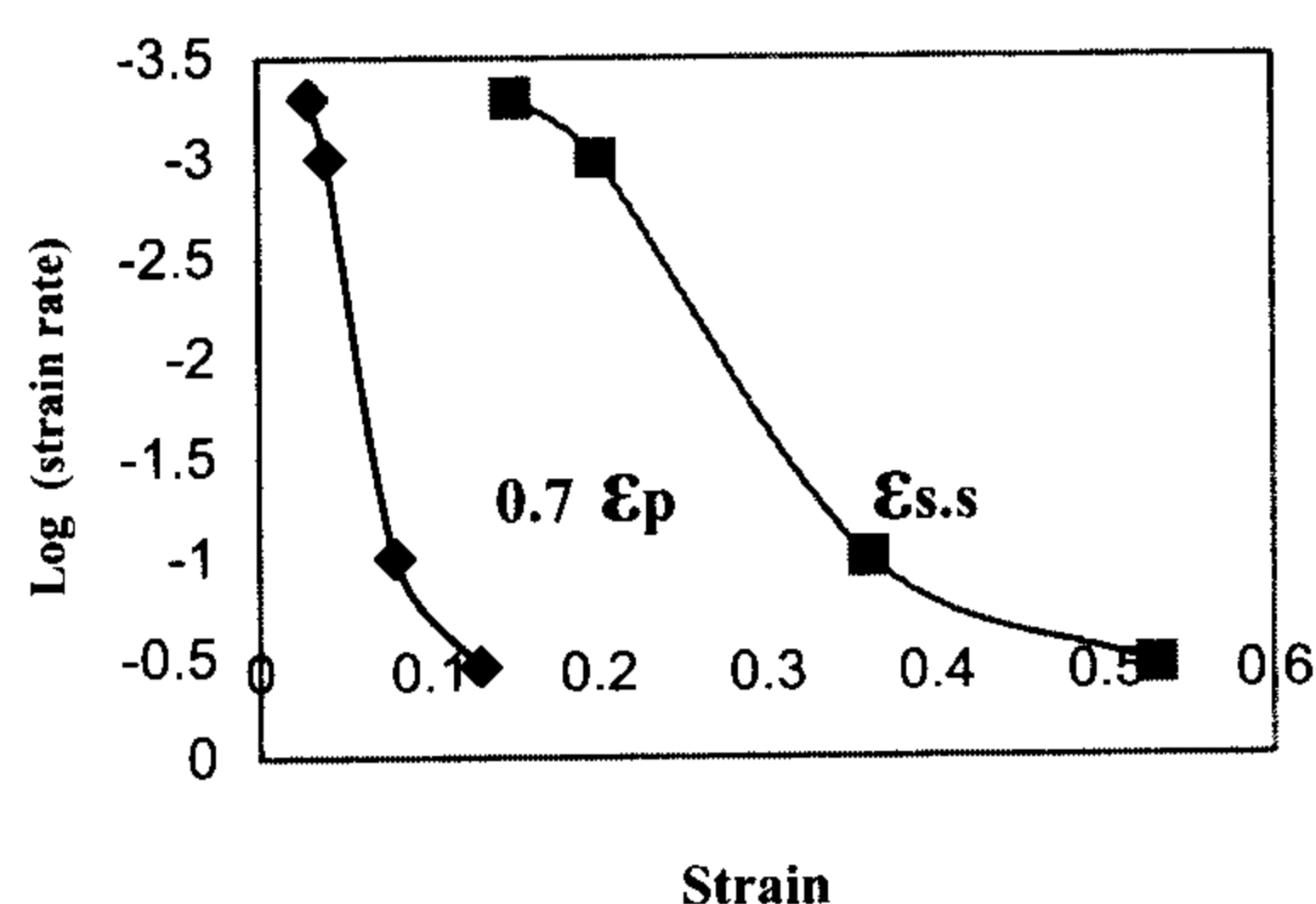
ترکیب شیمیایی آلیاژ انتخاب شده در این تحقیق  $(Mg-3\%Al-1\%Zn-0.3\%Mn)$  می باشد که بر اساس استاندارد ASTM در کلاس AZ31 قرار میگیرد (جدول ۱). ماده اولیه مورد استفاده بصورت ورق نوردگرم با ضخامت اولیه ۲۲ میلی متر در دسترس قرار گرفت، که نمونه های استوانه ای برای آزمایش فشار با قطر ۸ میلی متر و ارتفاع ۱۲ میلی متر از آن تهیه شدند. نمونه های آزمایش فشار بگونه ای تهیه شدند که محور فشار همراستا با جهت نورد قرار گیرد. همانطور که تحقیقات قبل نشان داده اند وجود جهت های مرجح (بافت) در آلیاژهای منیزیم نقش مؤثری در تعیین رفتار تغییر شکل آنها ایفا می کند [۴]. بافت غالب در ورقه های نورد گرم شده عمدتاً بصورت صفحات قاعده ای هگزاگونال موازی با جهت نورد میباشد [۵]. لذا با توجه به جهت تهیه نمونه ها، آزمایش فشار بصورت موازی با صفحات قاعده اعمال می شود.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده.

AZ31	Mg	Al	Zn	Mn	Cu
wt%	≈۹۵/۵	۲/۹۸	۰/۸۱	۰/۳۵	۰/۰۲

برای انجام آزمایش در دمای بالا، کوره مقاومتی به همراه وسایل جانبی مورد نیاز، بر روی دستگاه Instron نصب گردید. به منظور بررسی اثر نرخ کرنش بر رفتار سیلان گرم آلیاژ AZ31، آزمایشهای فشار در دمای ثابت  $۳۵۰^{\circ}C$  و در نرخ کرنشهای  $۰/۰۰۰۵ s^{-1}$ ،  $۰/۰۰۱$ ،  $۰/۱$  و  $۰/۳۵$  انجام شدند. برای یکسان سازی دما، هر نمونه قبل از انجام آزمایش بمدت ۵ دقیقه در دمای مذکور نگه داشته شد و سپس آزمایش فشار روی نمونه ها تا کرنش حقیقی حدود ۰/۶ اعمال گردید. شکل (۱) بصورت شماتیک سیکل حرارتی- مکانیکی انجام شده را نشان میدهد. نمونه ها در خاتمه آزمایش با فاصله زمانی حداکثر ۲ ثانیه در آب کوئنچ شدند. برای بررسی های ساختاری، نمونه ها تحت پولیش مکانیکی و پولیش شیمیایی در محلول ۱۰ ml اسید نیتریک، ۹۰ ml اتانول قرار گرفته و سپس با محلول استیک پیکرال جهت مشاهدات

نمودار) یا بعبارت دیگر کرنش لازم تا رسیدن به تنش حالت پایدار) افزایش می یابد. شکل ۴ تاثیر نرخ کرنش را بر کرنش در نقطه بیشینه تنش و کرنش لازم جهت رسیدن به حالت پایدار تنش نشان می دهد. باتوجه به محدود بودن سیستمهای لغزش در ساختار HCP منیزیم، افزایش نرخ کرنش سینتیک دوقلویی شدن را افزایش میدهد [۲]. با تشدید دوقلویی شدن انرژی ذخیره شده در ماده تحت کرنش افزایش خواهد یافت. لذا با توجه به کاهش زمان تغییر شکل (برای یک کرنش معین) در نرخ کرنشهای بالاتر، کرنش بالاتری برای ترمیم ساختار و کاهش تنش به حد تنش حالت پایدار مورد نیاز است.



شکل ۴: تغییرات کرنش بیشینه و کرنش حالت پایدار با نرخ کرنش.

#### تغییرات نرخ کار سختی

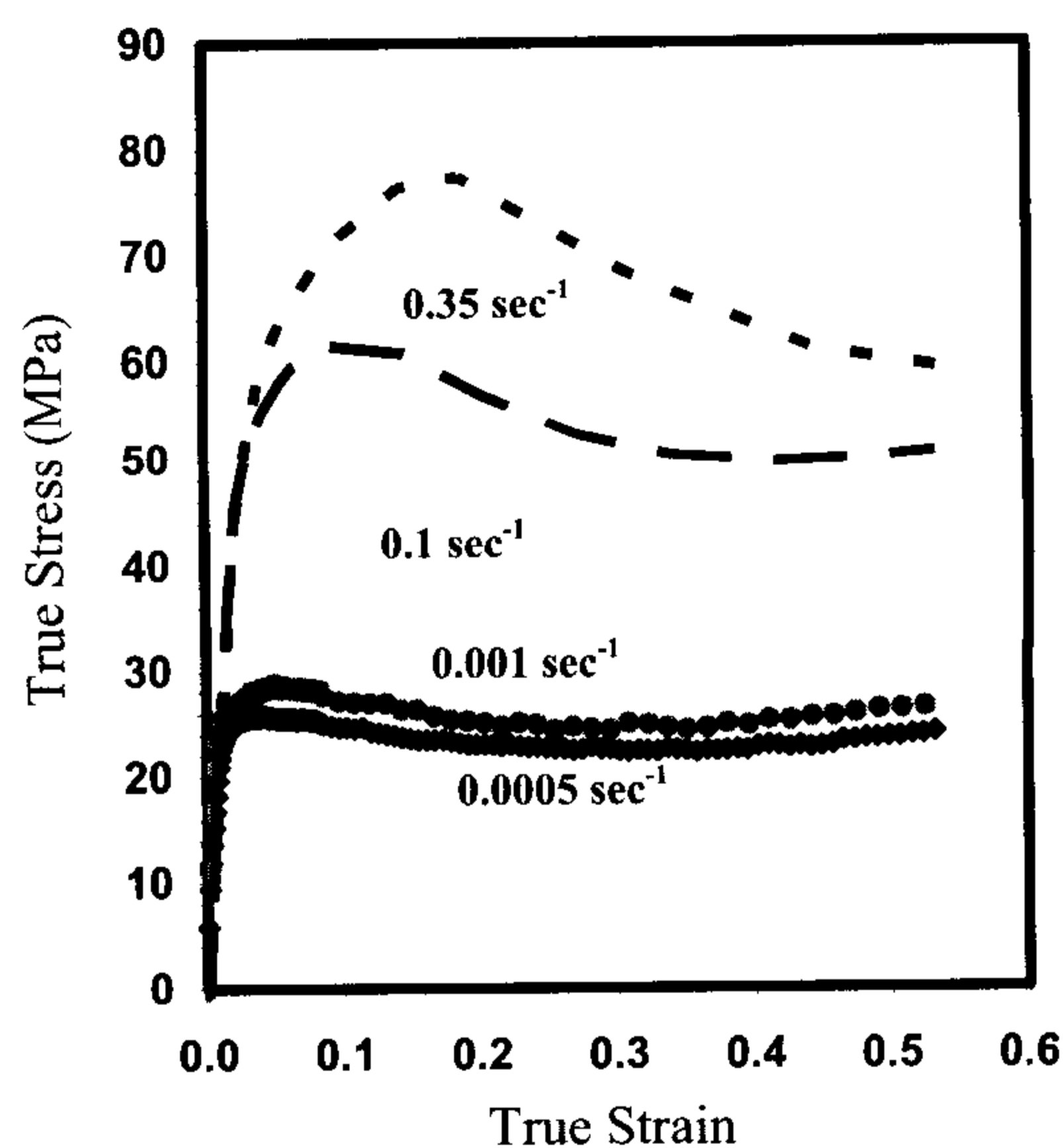
جهت بررسی دقیق تر اثر نرخ کرنش بر رفتار تغییر

شکل این آلیاژ، منحنی های  $\theta$  (یعنی  $\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}$ ) بر حسب

کرنش در شکل ۵ ترسیم گردیده است. همانگونه که دیده میشود با افزایش  $\dot{\epsilon}$ ، بویژه در نرخ کرنش  $0.35 \text{ s}^{-1}$ ، نرخ افت  $\theta$  کاهش یافته است. این رفتار را میتوان به افزایش نرخ دوقلویی شدن نسبت داد. دوقلویی شدن با ایجاد تغییر در جهت گیری کریستالی، میتواند سیستمهای لغزش جدیدی را برای لغزش نابجایی ها فراهم نموده، باعث کاهش نرخ تغییر در کار سخت شدن ماده (شیب نمودار  $\theta$  در شکل ۴) گردد.

در نرخ کرنش های مورد بررسی در این تحقیق با افزایش نرخ تغییر شکل، شیب منحنی کاهش پیدا کرده است، اما در نتایج بدست آمده توسط Barnett از نرخ کرنش های بیشتر از  $0.35 \text{ s}^{-1}$  شیب تغییرات  $\theta$ ، به صفر و حتی مقادیر منفی رسیده است [۲]. وی نشان داد که در نرخ

تا نقطه بیشینه منحنی، تنش سیلان را افزایش میدهند. با ادامه تغییر شکل، ماده رفتار کار نرمی از خود نشان می دهد. رفتار مشاهده شده در تنش حقیقی - کرنش حقیقی به وقوع پدیده تبلور مجدد دینامیکی نسبت داده شده است [۳]. در این حالت، جوانه زنی و رشد دانه های جدید در نواحی پر انرژی با مصرف انرژی کرنشی ذخیره شده در ساختار (شامل انرژی دو قلویی ها)، باعث نرم شدن آلیاژ در حین اعمال تنش و افت تنش مورد نیاز برای ادامه تغییر شکل می شود. همانطور که در این شکل مشاهده می شود مطابق رفتار عمومی کار گرم سایر فلزات [۶] با افزایش  $\dot{\epsilon}$ ، کرنش مورد نیاز برای رسیدن به حداکثر تنش افزایش می یابد. از آنجائیکه تبلور مجدد دینامیکی از جمله پدیده های فعال شونده توسط حرارت  $T$  بوده و اساسا با حرکت مرزهای بزرگ زاویه کنترل می شود، با توجه به مهیا بودن زمان بیشتر در نرخ کرنشهای پایین، تبلور مجدد دینامیکی (DRX) می تواند در کرنشهای پایین تری بر کار سختی ایجاد شده در ساختار غلبه کرده و باعث ایجاد پیک در نمودار سیلان ماده شود. پایینتر بودن سطح تنش در نرخ کرنش های پایینتر به گستردگی بیشتر پدیده بازبایی دینامیکی در حین اعمال کرنش نسبت داده میشود.



شکل ۳: منحنی های تنش حقیقی - کرنش حقیقی در دمای  $350^\circ \text{C}$  سانتیگراد.

نکته قابل توجه دیگری که باید متذکر شد اینست که با افزایش نرخ کرنش، گستردگی پیک ایجاد شده در

کرنش  $1 \text{ s}^{-1}$  منحنی  $\theta$ ، در قسمتی از آن با افزایش کرنش، دارای روندی صعودی می باشد.

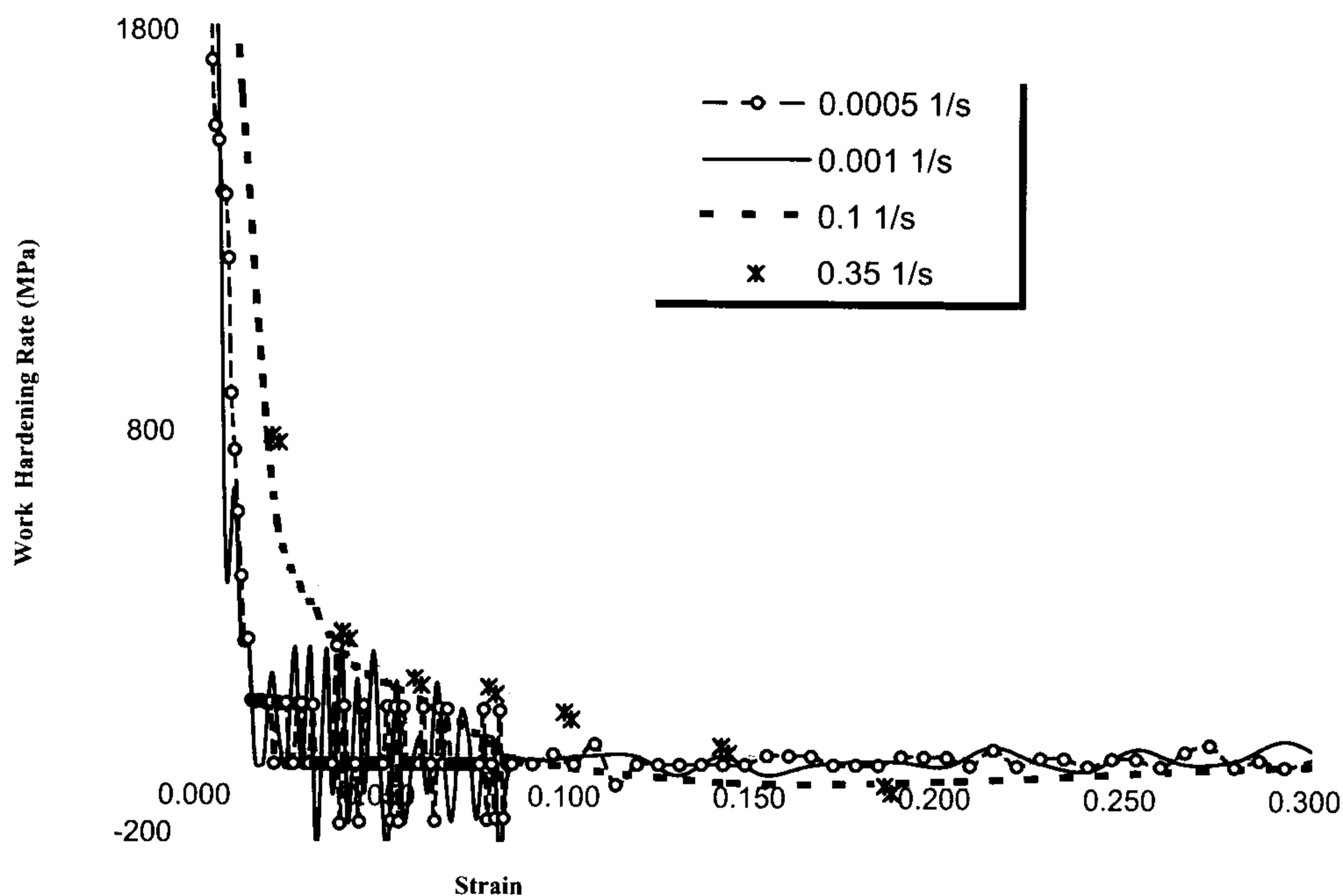
### تغییرات ریز ساختاری

همانطور که بیان شد با افزایش نرخ کرنش، نرخ ذخیره شدن انرژی در ساختار و وقوع دوقلوبی شدن بالاتر رفته، پتانسیل بیشتری برای پدیده DRX فراهم میشود، هر چند که وقوع گسترده DRX در کرنش های بالاتر رخ میدهد. مرزهای نا همدوس<sup>۴</sup> دوقلوبی ها، تقاطع دوقلوبی های مکانیکی با یکدیگر و تقاطع مرز دوقلوبی ها با مرزهای دانه ها منجر به افزایش مراکز مرجح جوانه زنی و تشدید پدیده DRX می شوند. بنابراین با توجه به مراکز جوانه زنی بیشتر در نرخ کرنشهای بالاتر، متوسط اندازه دانه های نهایی کاهش خواهد یافت. تصاویر ریز ساختاری ارائه شده در شکل (۶) نیز مؤید این مطلب می باشند. در این شکل ریز ساختار نهایی کونج شده برای نرخ کرنش های متفاوت نشان داده شده است. با افزایش نرخ کرنش، متوسط اندازه دانه ها بصورت ۲۷، ۲۱، ۱۷، ۱۲ میکرومتر تغییر کرده است، یعنی متوسط اندازه دانه برترتیب ۱۶٪، ۳۵٪، ۴۷٪، ۶۳٪ نسبت به اندازه اولیه

کاهش یافته است. با توجه به کاهش اندازه نهایی دانه ها در نرخ کرنش های بالاتر، تنش حالت پایدار ( $\sigma_{SS}$ ) افزایش می یابد. تغییرات  $\sigma_{SS}$  با نرخ کرنش در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به رابطه بنیادی تغییر شکل گرم [۶] می توان نرخ کرنش و تنش حالت پایدار را به یکدیگر مرتبط ساخت:

$$\dot{\epsilon} = C_1 \sigma^n \exp(-Q/RT) \rightarrow \ln \dot{\epsilon} = \ln C_1 + n \ln \sigma - Q/RT \quad (1)$$

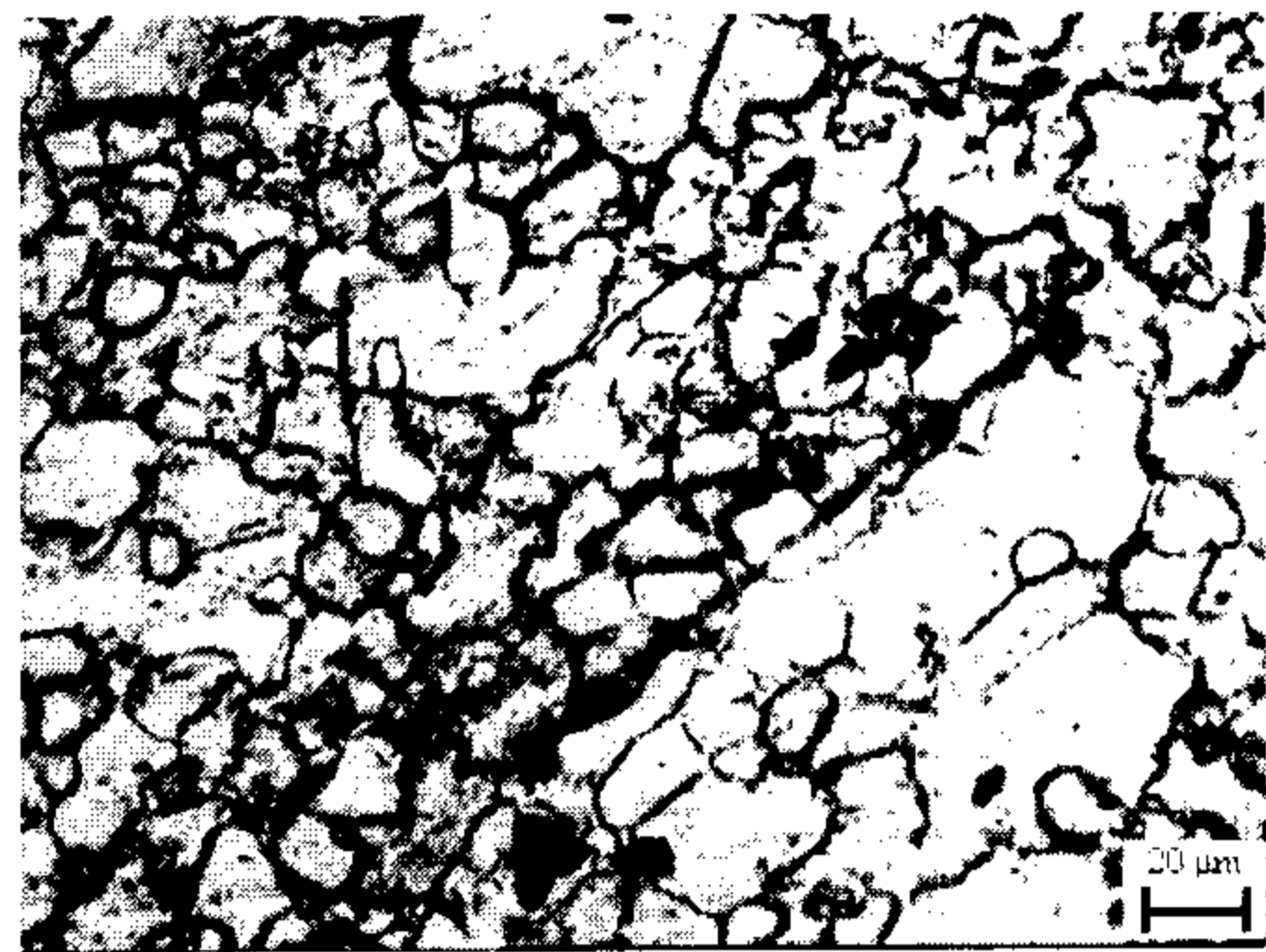
که در آن  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش،  $\sigma$  تنش در حالت پایدار،  $Q$  انرژی اکتیواسیون موثر،  $T$  دمای مطلق،  $R$  ثابت جهانی گازها و  $n, C_1$  ثوابت ماده می باشند. مقدار توان  $n$  در رابطه فوق بر اساس نتایج بدست آمده در این تحقیق، با رسم تغییرات نرخ کرنش برحسب تنش حالت پایدار در منحنی لگاریتمی (شکل ۷)، حدود ۶/۵ بدست می آید که با مقدار بدست آمده توسط Barnett برای همین آلیاژ [۲] در تطابق کامل می باشد. بدینوسیله می توان با محاسبه ثوابت رابطه فوق، تنش سیلان را در نرخ کرنش های مختلف تخمین زد.



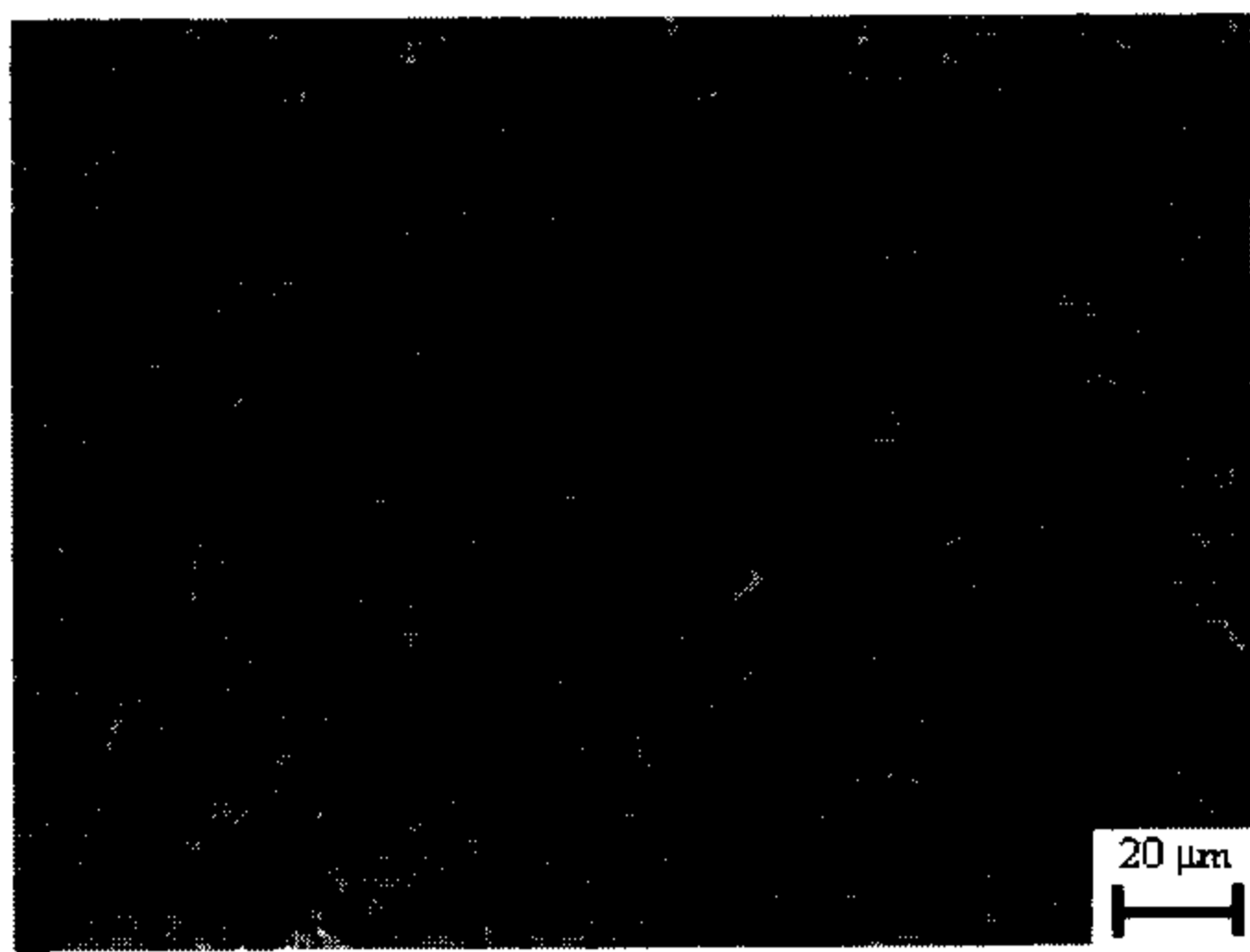
شکل ۵: تغییرات نرخ کار سختی بر حسب کرنش در نرخ کرنش های مختلف.



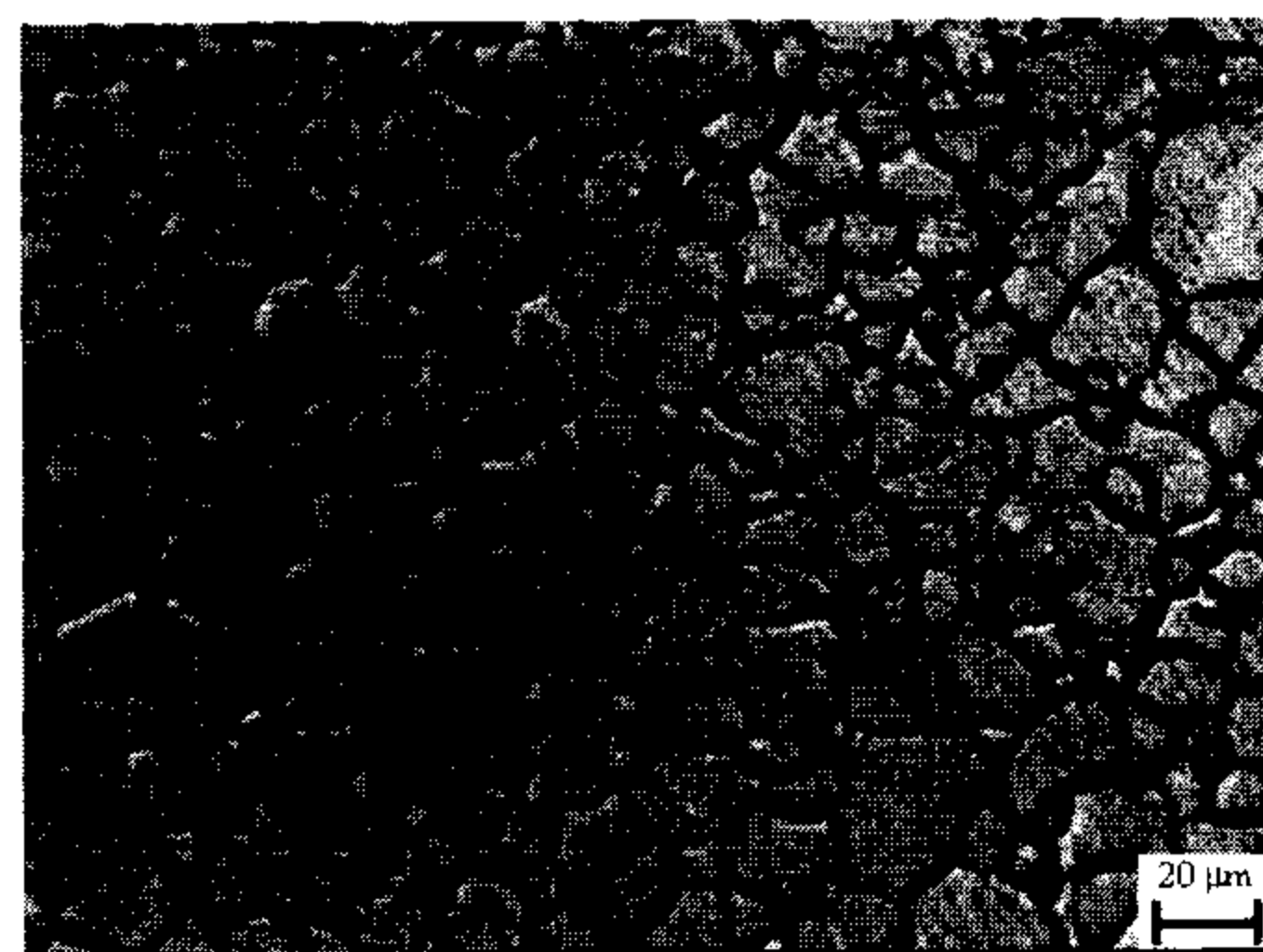
$$\dot{\epsilon} = 0.0005 \text{ s}^{-1}$$



$$\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$$



$$\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$$



$$\dot{\epsilon} = 0.35 \text{ s}^{-1}$$

شکل ۶: ریز ساختار نهایی کوئنچ شده، برای نرخ کرنش های متفاوت.

مقدار ۱/۱۷ در نرخ کرنش  $0.0005 \text{ s}^{-1}$ ، به ۱/۳۴ در نرخ کرنش  $0.35 \text{ s}^{-1}$  افزایش یافته است، یعنی پارامتر کارنرمی ۱۴/۵٪ افزایش پیدا کرده است.

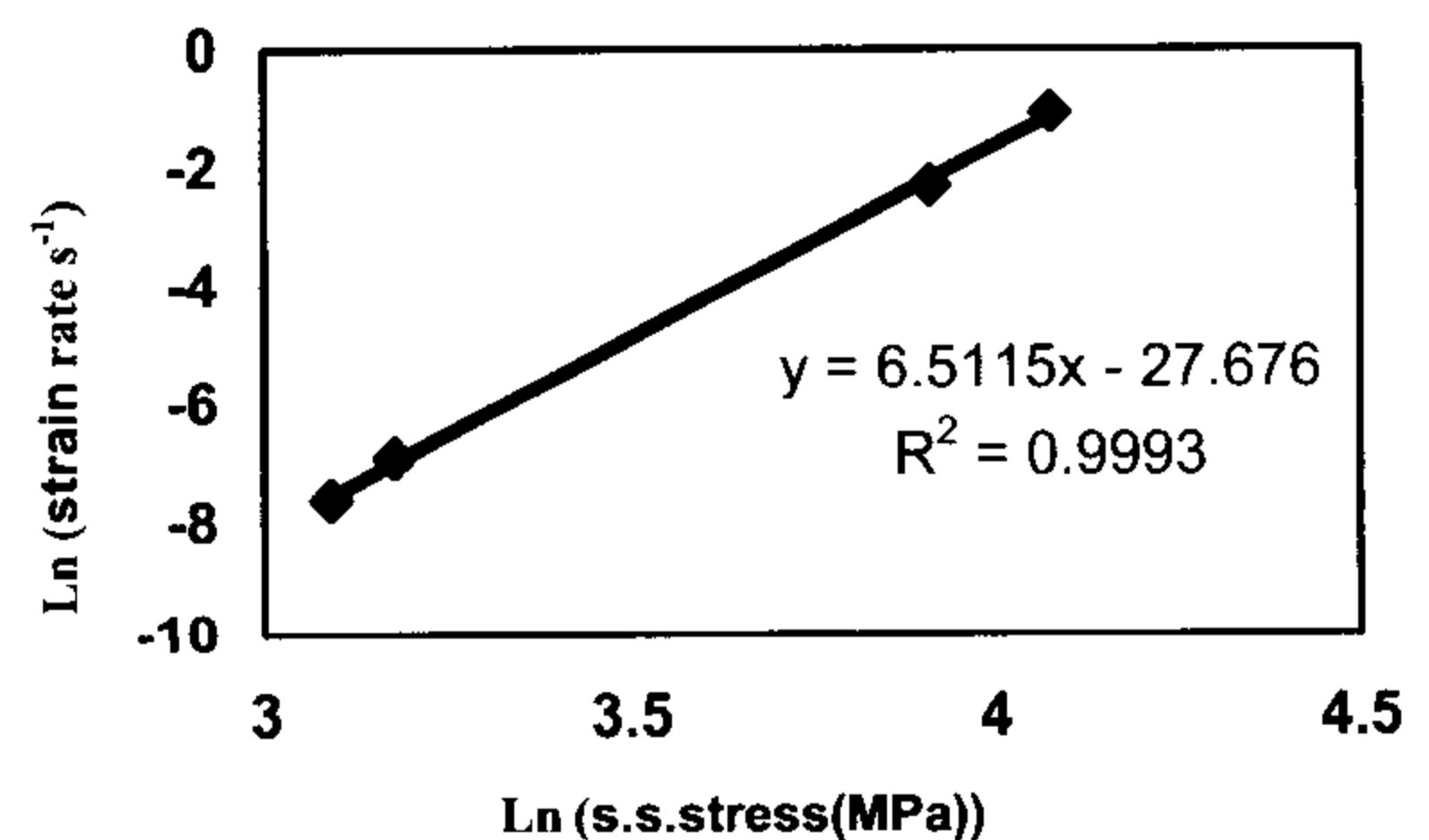
نسبتهای بدست آمده نشان می دهند که تبلور مجدد دینامیکی با افزایش نرخ کرنش می تواند اثر بیشتری در کاهش نسبی تنش مورد نیاز برای تغییر شکل داشته باشد.

جدول ۲: نسبت تنش بیشینه به تنش حالت پایدار  $\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{s.s}}\right)$

برای نرخ کرنشهای مختلف.

$\dot{\epsilon}, \text{s}^{-1}$	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۱	۰/۳۵
$\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{s.s}}\right)$	۱/۱۷	۱/۲۲	۱/۲۶	۱/۳۴

کارنرمی بیشتر در نرخ کرنش های بالاتر، میتواند متأثر از چند عامل باشد. نخست آنکه نرخ کرنش بالاتر باعث نرخ کارسختی بالاتر و در نتیجه انرژی ذخیره شده بالاتری در ماده میگردد و بنابراین در این حالت DRX نیرو محرکه بالاتری داشته و انرژی بیشتری را آزاد می کند. ضمن آنکه



شکل ۷: تغییرات  $\sigma_{s.s}$  با نرخ کرنش در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد.

بررسی کارنرمی حاصل از فرایند DRX

جهت مقایسه اثر کارنرمی حاصل از فرایند DRX

در رفتار تغییر شکل گرم آلیاژ منیزیم AZ31، نسبت تنش

بیشینه به تنش حالت پایدار  $\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{s.s}}\right)$  برای نرخ کرنشهای

مختلف، محاسبه و در جدول ۲ داده شده است.

نسبت  $\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{s.s}}\right)$  را پارامتر کارنرمی می نامند، این نسبت از

### نتیجه گیری

- ۱- با کاهش نرخ کرنش، زمان بیشتری برای وقوع DRX در حین تغییر شکل وجود دارد و لذا بیشینه ایجاد شده روی منحنی تنش-کرنش در کرنشهای کمتری رخ میدهد و با توجه به کرنش سختی کمتر، تنش حالت پایدار در کرنش کمتری مشاهده می شود.
- ۲- با توجه به دوقلویی شدن بیشتر در نرخ کرنش بالاتر مکانهای جوانه زنی DRX افزایش یافته و لذا متوسط اندازه دانه نهایی کوچکتر خواهد بود و ماده تنش پایدار بالاتری از خود نشان میدهد.
- ۳- توان معادلات توانی تغییرات تنش حالت پایدار و نرخ کرنش  $n$  در تغییر شکل آلیاژ AZ31، حدود ۶/۵ میباشد.
- ۴- با توجه به نسبت های  $\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{s,s}}\right)$  بدست آمده، DRX در  $\dot{\epsilon}$  بالاتر نقش بیشتری در کارنرمی و کاهش تنش سیلان این آلیاژ ایفا می کند.

همانطور که ذکر شد مراکز جوانه زنی بیشتری نیز برای DRX فراهم میشود. بنابراین افت تنش بیشتری در نمودار سیلان ماده مشاهده می شود. از طرفی  $\dot{\epsilon}$  بالاتر به حرکت نابجایی ها بسمت مرز دانه های جدید کمک کرده و لذا ترمیم ساختار بهتر انجام میشود. ضمن اینکه مرز دانه ها در آلیاژهای منیزیم بدلیل ایجاد مسیری با ضریب نفوذ بالا، میتوانند در نرخ کرنش های بالاتر تأثیر بیشتری در جذب و اضمحلال نابجایی ها داشته باشند. عامل دیگری که در نرخ کرنشهای بالاتر در کارنرمی ماده نقش دارد، ایجاد گرمای آدیباتیک میباشد که در این شرایط دمایی واقعی ماده از دمایی آزمایش بالاتر رفته و سرعت DRX را افزایش می دهد. بعلاوه در این حالت بازیابی دینامیکی ترغیب شده، می تواند چگالی نابجایی ها را کاهش داده و به کارنرمی ماده کمک کند [۷]. میزان کارنرمی ایجاد شده در نرخ کرنشهای مختلف با توجه به شکل (۴) نیز قابل مقایسه است. همانطور که مشاهده میشود، در نرخ کرنشهای بالاتر بخصوص در  $\dot{\epsilon} = 0.35 \text{ s}^{-1}$ ،  $\theta$  به مقادیر کوچکتر و منفی رسیده است که حاکی از کار نرمی بیشتر ماده میباشد.

### مراجع

- 1 - Moordike, B. L. and Elbert, T. (2001). "Magnesium, properties-application-potential." *Mater. Sci. Eng.*, A302, PP.37.
- 2 - Myshlyev, M. M., McQueen, H. J., Mwembela, A. and Konopleva, E. (2002). "Twinning, dynamic recovery and recrystallization in hot worked Mg-Al-Zn alloy." *Mater. Sci. Eng.*, A337, PP.121.
- 3 - Barnett, M. R. (2001). "Influence of deformation condition and texture on the high temperature flow stress of magnesium AZ31." *J. Light Metals*, PP.67.
- 4 - Brooks, C. R. (1982). "Heat treatment, structure, and properties of non-ferrous alloys." *ASM*, U.S.A.
- 5 - Chang, T. C., Wang, J. Y., O, C. M. and Lee, S. (2003). "Grain refining of magnesium alloy AZ31 by rolling." *J. Mater. Process. Technol.*, Issues 1-3, PP.588.
- 6 - Humpherys, F. J. and Hatherley, M. (1996). *In recrystallization and related phenomena*. Pergamon Press, Oxford.
- 7 - Mwembela, A., Konopleva, E. B. and McQueen, H. J. (1997). "Microstructural development in Mg alloy AZ31 During hot working." *Scripta Mater*, Vol. 37, PP.1789.

### واژه های انگلیسی بترتیب استفاده در متن

1 - Substructural

3 - Dynamic Recrystallization

2 - Thermally Activated Processes

4 - Incoherent