نشریه مهندسی متالورژی و مواد

سال بیست و سوم، شماره یک، ۱۳۹۰

# بررسی تأثیر تغییر شکل گرم بر ریزساختار آلیاژ منیزیم AZ91 \*

عليرضا مالدار<sup>(۱)</sup> رامين ابراهيمي<sup>(۲)</sup> غلامرضا ابراهيمي<sup>(۳)</sup>

### چکیدہ

در سالهای اخیر مطالعات زیادی بر روی رفتار تغییر شکل گرم و ریزساختار آلیاژهای ریختنی منیزیم انجام شده است. دلیل انجام آنها، افزایش کاربرد آلیاژهای منیزیم می باشد. اگر چه مطالعات بسیاری بر روی ریزساختار آلیاژهای کار شدهی منیزیمی پس از تغییر شکل گرم انجام شده است، امّا اطلاعات ریزساختاری مربوط به تغییر شکل گرم آلیاژهای ریختنی منیزیمی بسیار محدود است. در مطالعهی حاضر، تغییرات ریزساختاری آلیاژ منیزیم اسکار 2004 حین تغییر شکل گرم آلیاژهای ریختنی منیزیمی بسیار محدود است. در مطالعهی حاضر، کرنش <sup>1-</sup> ۲ 0.1 و به میزانهای کرنش پیک 0.3 و 0.5 فشرده شداند. تغییرات ریزساختاری به وسیه ی میکروسکپ مایی نوری و الکترونی بررسی شدند. نتایج نشان دادند که دانه های تبلور مجدد حین تغییر شکل گرم بر روی مرزهای اولیه جوانه میزاند. کسر دانه های تبلور مجدد یافته با افزایش میزان کرنش به شکل سیگمودال و مطابق با رابطه ی آورامی افزایش یافت. افزون بر این، اندازه ی دانه های تبلور مجدد یافت ه در ابتدا افزایش و پس از رسیدن به میزان بیشینه ی خود کاهش یا در اطه ی آورامی افزایش یافت. افزون بر این، اندازه ی دانه های تبلور محاد یافت ه دانه به در ایم از روی میزه به دانه ای تبلور محاد یافت ه دانه در این اندازی افزایش و پس از دادند که دانه های تبلور محاد ی آورامی افزایش یافت. افزون بر این، اندازه ی دانه های تبلور محاد یافت ه دارانه می دانه ای تبلور محاد یافت ه دار افزایش و پس از رسیدن به میزان بیشینه ی خود کاهش یا داره یافت.

**واژههای کلیدی** آلیاژ منیزیم AZ91 ، تبلور مجدد دینامیکی، رسوبهای β، تغییر شکل گرم، ریزساختار.

## The Effect of Hot Deformation on the Microstructure of AZ91 Magnesium Alloy

A. R. Maldar R. Ebrahimi

G.R. Ebrahimi

### Abstract

Due to the great variety of applications of magnesium alloys with superior mechanical properties, recent studies have been focused on the hot deformation behavior and microstructure of magnesium alloy castings. Although there have been several recent investigations on the microstructure of wrought magnesium alloys after hot deformation, a limited number of studies have been conducted with regard to the evolution of grain structure during hot working processes. The present work examines the microstructural evolution during hot deformation of magnesium alloy AZ91. The specimens were hot compressed to the peak strain values of 0.3 and 0.5 at the temperature range of 350 to 425 °C with the strain rate of  $0.1 \ s^{-1}$ . Structural changes were studied using the optical and scanning electron microscopes. The results showed that the recrystallized grains nucleate along the pre-existing grain boundaries during the compression process. The fraction of dynamically recrystallized grains increased with an increase in the strain value in a sigmoidal way expressed by Avrami equation. The dynamically recrystallized grain size also increased at the beginning with strain, and then decreased after its maximum value being reached.

Key Words Magnesium Alloy AZ91, Dynamic Recrystallization, β Precipitates, Hot Deformation, Microstructure.

(۲) دانشیار بخش مواد، دانشکدهی مهندسی، دانشگاه شیراز

(۳) نویسندهی مسوول: دانشیار گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکدهی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>\*</sup> نسخهی نخست مقاله در تاریخ ۸۹/۵/۲۵ و نسخهی پایانی آن در تاریخ ۹۰/۹/۲۳ به دفتر نشریه رسیده است.

<sup>(</sup>۱) مربی گروه مهندسی مواد و پلیمر، دانشکدهی مهندسی، دانشگاه تربیت معلم سبزوار

Mg-7.69wt.%Al-0.5wt.%Zn-0.2wt.%Mn استفاده شد. ریزساختار اولیهی این آلیاژ که دندریتی است، در شکل (۱) نشان داده شده است. فاز α (منیزیم فوق اشباع) در زمینهی ریزساختار وجود دارد و فاز یوتکتیک β+۵ در بین بازوهای دندریتها شکل گرفتهاند.



شكل ۱ ريزساختار اوليهي شمش آلياژ AZ91

برای انجام آزمون فشار گرم، نمونههای استوانهای شکل به قطـر ۱۰ و ارتفـاع ۱۵ میلــیمتـر از شمش اولیه تهیه و سپس همگنسازی شدند. از یک فرایند دو مرحلهای برای همگنسازی نمونهها استفاده شد. در مرحلهی اول، نمونه ها در دمای C° ۳۷۰ به مدت ۲ ساعت گرم شدند و در مرحلهی بعد، به مدت ۲٤ ساعت در دمای C° ٤١٥ نگهداری و سـپس در آب سريع سرد شدند [5]. پس از انجام فرايند همگنسازي، آزمون فشار گرم در دماهای ℃ ۳۵۰ ℃ ٤۰۰ و℃°٤۲ و با نرخ کرنش ثابت <sup>۱</sup>-S<sup>-۱</sup> تا کرنشهای پیک ۰/۳ و ۰/۰ انجام شد. آزمون فشار گرم به وسیلهی دستگاه Zwick/Roll مجهز به یک کورهی الکتریکی با دقت °c انجام شد. برای کاهش اثـر اصـطکاک، از چنـد لایهی نازک تفلون استفاده شد، و نمونهها بهمنظور همدما شدن به مّدت ۳ دقیقه در دمای آزمون نگهداری و سیس آزمون فشار گرم بر روی آنها انجام گرفت. مقدمه

آلیاژهای منیزیم از جمله سبکترین مواد فلزی میباشند و در سالهای اخیر مورد توجه بسیاری قـرار گرفتهاند. از ویژگیهای کلیدی این آلیاژها می توان به نسبت بالاي استحكام به وزن، قابليّت جذب ارتعاش، رسانایی الکتریکی و گرمایی نسبتاً خوب و قابلیّت ماشین کاری عالی اشاره کرد. با این حال، کاربرد این دسته از آلیاژها بهدلیل قیمت بالا و شکلپذیری کم در دمای محیط، بسیار محدودتر از سایر مواد مهندسی است [1,4]. شکل پذیری محدود این آلیاژها بهدلیل عدم وجود پنچ دستگاه لغزش مستقل در دمای محیط است. فعالیّت دستگاه ای لغـزش غیراصـلی تـابعی از اتمهای محلول و دما بوده و با توجه به مطالعات صورت گرفته، [2,3]، در دماهای بین C° 200 تا °C بەطور كامل فعال مىشوند. بە ھمين دليل، تمامی فرایندهای شکل دهی آلیاژهای منیزیم در دمای بالاصورت مي گيرد.

با توجه به میزان انرژی نقص چیدمان فلز منیزیم (۲۰۳ تا 125 یا ۲۹۶۰)، انتظار می رود که بازیابی دینامیکی پدیده ی غالب در تغییر شکل گرم آن باشد، اما با توجه به مطالعات صورت گرفته در مورد تغییر شکل آلیاژهای منیزیم، [4]، فرایند تبلور مجدد دینامیکی پدیده ی غالب در این زمینه است. دلیل این رفتار را می توان کمبود دستگاههای لغزش آسان و فعّال دانست که نقش انرژی نقص چیدمان را خنثی میکند. در این تحقیق، تغییرات ریزساختار آلیاژ منیزیم AZ91 در محدوده دمایی کار گرم بررسی شده است. برای این منظور، آزمون فشار گرم در محدوده دمایی C منظور، آزمون فشار گرم در محدوده دمایی C منظور، آنجام شد، و ریزساختار آنها با استفاده از نمونهها انجام شد، و ریزساختار آنها با استفاده از

## مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، از شمش آلیاژ منیزیم AZ91 با ترکیب

برای بررسی های ریزساختاری، نمونه ها در جهت محور اعمال فشار برش زده شدند و پس از آماده سازی، به وسیله ی محلول پیکرال حکّاکی شدند. ریز ساختار نمونه ها قبل و بعد از انجام تغییر شکل به وسیله ی میکرو سکپ های نوری و الکترونی بررسی شد. افزون بر این، اندازه ی دانه ی نمونه ها با استفاده از نرمافزار Clemex و مطابق با استاندارد ASTM تعیین شد.

نتایج و بحث نمودار تنش کرنش نمودارهای تنش حقیقی – کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم در دماهای C° ۳۰، C° ۵۰۰ و C° ۲۵ و با نرخ کرنش ثابت <sup>I-</sup>S ۱/۰ در شکل (۲) نشان داده شدهاند. همان طور که مشاهده می شود، تنش سیلان با افزایش کرنش در دمای ثابت افزایش یافته و پس از رسیدن به میزان بیشینهی خود، کاهش می یابد. کاهش تنش سیلان بعد از پیک را می توان به وقوع پدیدهی تبلور مجدد دینامیکی نسبت داد [6]. افزون بر این، با افزایش دما میزان تنش سیلان



شکل ۲ نمودار تنش حقیقی- کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم در دماهای مختلف و نرخ کرنش <sup>1-</sup>S ۰/۱

**تنش پیک**. تغییرات تنش پیک با دما برای نرخ کرنش

۰/۱ S<sup>-1</sup> در شکل (۳) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، تنش پیک در نرخ کرنش ثابت با افزایش دما کاهش می یابد. با شروع تغییر شکل مومسان، وقوع لغزش و دوقلويي شدن منجر به کارسختی و افزایش میزان تنش میشود. وقـوع فراینـد نرمشدگی نیز منجر به کاهش تـنش سـیلان در حـین تغيير شكل خواهد شد. رقابت بين اين دو فرايند منجر به ظهور یک پیک در نمودار تـنش- کـرنش مـیشـود. افزایش دما در آلیاژهای منیزیم منجر به کاهش مؤلفهی تنش برشی بحرانی (T<sub>CRSS</sub>) برای دستگاههای لغزش هرمی و منشوری شده و بهایین ترتیب، دستگاه های لغزش بيشتري فعّال خواهند شد [7]. كاهش تردي د بهمعنی تسهیل حرکت نابجاییها بر روی صفحههای مناسب لغزش است، و این منجر به افزایش میزان وقوع بازیابی و کاهش میزان تنش پیک میشود. افزون بر اين، جوانەزنى دانەھا حين تېلور مجدد نيز باعث حذف ساختارهای فرعی می شود که خود در کاهش تنش سيلان موثر است [8].



شکل ۳ تغییرات تنش پیک با دما در نرخ کرنش <sup>I-</sup> S-۱ حین تغییر شکل گرم

**کرنش پیک**. وقوع پدیدهی نرمشدگی افزون بر کاهش میزان تنش پیک، کرنش پیک را نیز کاهش میدهد. در شکل(٤)، تغییرات کرنش پیک با دما در نرخ کرنش ثابت <sup>1-</sup> S<sup>-1</sup> نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، کرنش پیک با افزایش دما در نرخ کرنش ثابت کاهش می یابد. فرایند نرم شدگی پدیده ای است که با حرارت فعّال می شود، به گونه ای که افزایش دما نیرو محرکهی آن را تأمین می کند [6]. بنابراین، فرایند نرم شدگی در کرنش های پایین تر بر کار سختی غلبه کرده و باعث ایجاد نقطهی پیک در نمودار تنش – کرنش در میزان های کم تر کرنش می شود.



شکل ٤ تغییرات کرنش پیک بر حسب دمای تغییر شکل گرم در نرخ کرنش <sup>--</sup>S

ریزساختار. ریزساختار نمونهها بعد از فرایند همگنسازی در شکل (۵) مشاهده می شود. این ریزساختار شامل دانههای درشت M-Δ (μμ 200~) و ذرات ریز β در مرز دانههاست. فاز یوتکتیک در آن در مقایسه با ریزساختار نمونههای ریخته گری شده (شکل (۱))، به طور کامل حل شده و دانههای متساوی المحور جای گزین بازوهای دندریتی شده اند.

برای بررسی تغییرات ریزساختاری و تعیین مشخصههای وقوع پدیدهی کارنرمی حین تغییر شکل گرم، ریزساختار نمونهها در کرنشهای پیک ۵/۱4، 0.3 و 0.5 و در دماهــــای C<sup>°</sup> ۲۰۰۰ C<sup>°</sup> ۲۰۰ و C<sup>°</sup> ۲۰۵ بهترتیب در شکلهای (٦) تا (۸) نشان داده شده است. ریزساختار نمونه پس از تغییر شکل گرم در دمای C<sup>°</sup> 350 با کرنشهای پیک 3/0 و 5/0 و نرخ کرنش

0/1 S<sup>-1</sup>، در شکل (٦) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، ریزساختار پس از تغییر شکل به میزان کرنش پیک 0/14 از دانه های اولیّه (کارسخت شده) و دانههای متساویالمحور تبلور مجدد یافته در مرزهای اولیّه تـ شکیل شده است. با افزایش میزان كرنش تا 0/3، كسر حجمي دانه هاي متساوى المحور افزایش و اندازهی متوسط دانه های جدید نسبت به دانهها در کرنش پیک افزایش یافته است. در کرنش 0/5، کسر دانههای تبلور مجدد یافته نسبت به کرنش های پیک و 0/3 افزایش و اندازهی دانههای جدید کاهش یافته است. در دماهای C<sup>o</sup> 400 و C نیز کسر تبلور مجدد با افزایش میزان کرنش افزایش و اندازهی متوسط دانه های جدید کاهش یافته است (شکل (۷) و (۸)). افزون بر این، مقایسهی نمونه ها با میزان کرنش یکس∟ن در دماه∟ی ℃ 350 ، ℃ 400 و ℃ 425 نشان میدهد که اندازهی دانههای تبلور مجدد یافته افزایش یافته است، ولی کسر حجمی دانههای جدید تقریباً ثابت مانده است (مقایسهی شکل های (٦) تا (٨)).



شکل ٥ ریزساختار نمونه پس از فرایند همگنسازي

دانههای تبلور مجدد یافته شده است، زیرا نرخ وقوع فرایند نرمشدگی با افزایش دما افزایش مییابد. تغییرات کسر تبلور مجدد با کرنش را می توان با معادلهی آورامی به صورت زیر نشان داد:  $X_{DRX} = 1 - \exp\left[-0.3\left(\frac{z-z_{R}}{z_{P}}\right)^{m}\right]$ 



(الف)







شکل ۷ ریزساختار نمونهها پس از تغییر شکل گرم با نرخ کرنش . 1- ۵/۱ در دمای ℃ 400 به میزانهای کرنش پیک (0/1) (الف)، 0/3 (ب) و 0/5 (پ)





(پ) شکل ۲ ریزساختار نمونهها پس از تغییر شکل گرم با نرخ کرنش 1-S<sup>-1</sup> در دمای C<sup>°</sup> 350 به میزانهای کرنش پیک (0/14) (الف), 0/3 (ب) و 0/5 (پ)

کسر تبلور مجدد. در شکل (۹)، تغییرات کسر تبلور مجدد با کرنش در دماهای C<sup>o</sup> 350 ، C<sup>o</sup> 400 و C<sup>o</sup> 425 نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود، کسر تبلور مجدد در تمام دماها با افزایش کرنش به صورت S شکل افزایش یافته است. افزون بر این، افزایش دما در یک کرنش معین باعث افزایش کسر

در این رابطه، X<sub>DRX</sub> کسر دانههای تبلور مجدد یافته و 'm ثابت ماده می باشد. مقدار 'm در رابطهی (۱) بيان گر سينتيک فرايند تبلور مجدد ديناميکي است [9]، و با افزایش دما کاهش می یابد. به عبارت دیگر، افزایش دما باعث افزایش فعالیّت نابجایی ها شده و با کاهش نرخ جوانهزنی دانههای جدید، سینتیک جوانهزنی دانههای تبلور مجدد دینامیکی کند میشود. افزون بر این، با توجه به مطالعات انجام شده، [4,10,11]، تغيير شكل كرم آلياژ AZ91 با رسوب گذاری دینامیکی همراه است و دما نقش مهمی را بر مورفولوژی و اندازهی ذرات رسوب دارد. از آنجا که رسوبهای ریز β باعث قفل شدن مرزدانههای تبلور مجدد یافته می شوند، کند شدن سینتیک تبلور مجدد دینامیکی با افزایش دما را مے توان به کاهش میزان رسوبگذاری و درشت شدن رسوبهای β نسبت داد.

در ایــن تحقیــق، مقــدار میــانگین 'm بــهروش رگرسیون خطی برابر با 1/4 بهدست آمد. بارنت، [12,13]، در مطالعات خود بر روى آلياژ ريختنى AZ31 مقدار 'm را پس از تغییر شکل نمونه در دمای 400 °C با نرخ کرنش 1/2 s<sup>-1</sup>، برابر با 1/2 بـهدست آورده است. مقایسهی نمودارهای شکل (۹) با نتایج بهدست آمده توسط بارنت نشان میدهد که رفتار سینتیک جوانهزنی دانههای تبلور مجدد یافتـه بـرای دو آلياژ AZ31 و AZ91 مشابه يکديگرند. اين در حالي است که مقدار 'm (یا سرعت تبلور مجدد) برای آلیاژ AZ91 بیش تر است، که دلیل آن را می توان با میزان آلومینیم موجود در آلیاژ و نیز، کسر رسوبهای موجود مرتبط دانست. در آلیاژ AZ91، اتمهای آلومینیم حرکت نابجاییها را مشکل کرده و افزون بر این، ذرات ریز رسوب بهعنوان مكان هاى جديد جوانهزنى مطرح می شوند [2]. به این ترتیب، سرعت تبلور مجدد افزایش می یابد. افزون بر این، مطالعات نشان می دهند که تفاوت در بافت اولیه و جهتگیری صفحه های

قاعده و هرمی حین تغییر شکل باعث تغییر سینتیک جوانهزنی دانههای تبلور مجدد دینامیکی میشوند [12,14].





...)



شکل ۸ ریزساختاری نمونهها پس از تغییر شکل گرم با نرخ کرنش <sup>1-</sup> 1 0/1 و دمای C<sup>o</sup> 425 به میزانهای کرنش پیک (0.07) (الف)، 0/3 (ب) و 0/5 (پ).

اندازهی دانههای تبلور مجدد یافته. تغییرات اندازهی دانههای تبلور مجدد یافته با کرنش در دماهای تغییر شکل C ،350 °C و C 2° 425 در شکل (۱۰) نـشان داده شدهاند. با توجه به نتایج نشان داده شده در این شکل میتوان نتیجه گرفت که با افـزایش میـزان تغییـر شکل از کرنش پیک تا کرنش 0/5، اندازهی دانههای تبلور مجدد يافته افزايش مي يابد. با افزايش كرنش، ابتدا اندازهی دانههای تبلور مجدد دینامیکی نسبت به جوانههای تشکیل شده در کرنش پیک افزایش یافتـه و با ورود به ناحیهی کرنش پایدار، اندازهی دانههای تبلور مجدد یافته نسبت به قبل کاهش می یابد. با توجه به نمودارهای تنش حقیقی- کرنش حقیقی در دماهای تغییر شکل C° 400 و C° 425، کرنش 0/3 در ناحیـهی یایدار قرار داشته و بنابراین، بـا افـزایش کـرنش تغییـر قابل توجهی در اندازهی دانهها مشاهده نمی شود. این روند در مطالعات دینگ، [15]، بر روی آلیـاژ AZ91 و مطالعـات فـاطمي، [16]، در مـورد أليـاژ AZ31 نيـز مشاهده شده است. این محققین دریافتهاند که وقتی اندازهی دانه های تبلور مجدد دینامیکی، با توجه به شرایط تغییر شکل، به مقدار معینی برسد، اندازهی دانهها با افزایش کرنش و افزایش کسر تبلور مجدد ديناميكي، ثابت باقى مىماند.



شکل ۹ درصد تبلور مجدد دینامیکی بر حسب کرنش در دماهای منگل ۹ درصد تبلور مجدد دینامیکی بر حسب کرنش در دماهای  $0^{\circ}$  25 و  $0^{\circ}$  25 و نرخ کرنش  $^{1}$ -S 10 و  $0^{\circ}$ 



شکل ۱۰ اندازهی دانههای تبلور مجدد دینامیکی بر حسب کرنش در دماهای تغییر شکل <sup>0</sup>° 350 °C و <sup>0</sup>° 425 و نرخ کرنش<sup>1</sup>-S 1/1

رشد دانههای تبلور محدد دینامیکی با مهاجرت مرزهای زاویه بزرگ انجام می شود [6,17]. با مهاجرت مرزهای زاویه بزرگ، نابجایی های موجود در زمینه جذب شده و ناحیهای بـا چگـالی کـم نابجـاییهـا در پشت مرز تشکیل می شود. مرز در نتیجه یا اختلاف موجود بین چگالی نابجاییهای زمینه با دانهی تبلور مجدد دینامیکی حرکت میکند. با اعمال کرنش، منابع نابجایی در داخل دانهی جدید نابجایی ها را به پشت مرز متحرک میفرستند. در نهایت وقتی چگالی نابجایی ها در پشت مرز متحرک تا میزان مشخصتی افزایش می یابد، مهاجرت مرز متوقف می شود. بنابراین، اندازهی دانه یجدید در حد مشخصتی ثابت باقی می ماند [18,19]. در سازوکار ایجاد گردنبند، دانههای جدید در امتداد مرز اولیّه جوانه زده و پس از رشد، تــا اندازهی دانهی مشخصتی ثابت میمانند. در ادامه، یک گردنبند جدید از دانههای تبلور مجدد یافته با همان اندازه تشکیل میشود. این عمل تا وقوع تبلور مجدد در همهی زمینه ادامه می یابد. در این مرحله، اعمال کرنش بالاتر منجر به کاهش اندازهی دانههای تبلور مجدد يافته خواهد شد.

سازوکار تبلور مجدد. ریزساختارهای بهدست آمده



شکل ۱۲ تصویر ناحیهی علامتگذاری شده با حرف A در شکل (۱۱) با بزرگنمایی بالاتر

با افزایش میزان کرنش، شکل گیری دانههای جدید ادامه یافته و لایههای بعدی از ساختار گردنبند شکل بهوجود میآیند. اقزون بر ایـن، کـسر دانـههـای تبلور مجدد يافته افزايش يافته و اين دانهها بـهتـدريج بهسمت درون دانه های اولیّه رشد میکنند. این پدیده بهخوبی در شکل (۱۳) مشاهده میشود. در کرنش نزدیک به کرنش ناحیهی پایدار، ساختار گردنبند شکل کامل می شود. پس از پر شدن سطح مرز دانههای اولیّه، مرز دانههای تبلور مجدد یافته نیز بهعنوان محاهای جوانهزنی دانههای جدید عمل میکنند. با توجه به نمودارهای تنش- کرنش و ریزساختار حاصل از تغییر شکل بهمیزان،ای متفاوت می توان نتیجـه گرفـت کـه تغييرات ريزساختار آلياژ مورد مطالعه از نوع تبلور مجدد دینامیکی متناوب بوده است. نتایج بهدست آمـده توسط محققین دیگر در مورد سایر آلیاژهای سری AZ نيز بيانگر وقوع فرايند تبلور مجدد ديناميکی متناوب در این محدودهی دمایی است [19,20]. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که سازوکار فرایند تبلور مجدد در آلیاژهای منیزیم محتوی آلومینیم و روی تنهـا تـابعی از دمای تغییر شکل است، و عواملی مانند بافت و اندازهی دانههای اولیّه و حالت تنش اعمالی تنها باعث تغییر سینتیک و اندازهی دانههای تبلور مجدد می شوند.

پس از تغییر شکل بـهمیـزان کـرنش پیـک در دماهـای ℃ 350، ℃ 400 و ℃ 425 (شـكلهاى (٦) تـا (٨)) نشاندهندهی تشکیل دانههای جدید در مرز دانههای اوليّه مىباشد. تصوير ميكروسكپ الكترونى نمونه پس از تغییر شکل در دمای C° 400 با نرخ کرنش <sup>۱</sup>-۱ S<sup>-۱</sup> به میزان کرنش پیک (۰/۱) در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، مرز دانه از شکل صاف خود خارج شده و بهشکل نامنظم و موجی تبدیل شده است. به این ترتیب، مرز مضرّس شده و آمادهی تاولزنی میشود. در نظریهی جوانهزنی دانههای تبلور مجدد دینامیکی، با افزایش کرنش از میزان بحرانی آن مرز دانهها موجی شکل شده و تاول میزنند. پس از آن، این تاولها در کرنش پیک از مرز اولیّه جدا شده و دانههای جدید را شکل میدهند. بخشی از شکل (۱۱) که با حرف A مشخص شده است، با بزرگنمایی بالاتر در شکل (۱۲) نشان داده شده است. این شکل نشاندهندهی تاولی است کـه از مرز جدا شده و یک دانهی جدید را شکل داده است. در کرنش پیک، بیشتر مرزهای اولیّه با دانههای تبلـور مجدد دینامیکی پوشانده میشوند و بهاین ترتیب، اولین لايه از ساختار گردنبند شکل بهوجود مي آيد.



شکل ۱۱ تصویر میکروسکپ الکترونی از نمونهی تغییر شکل یافته در دمای <sup>0</sup>° 400 با نرخ کرنش <sup>1-</sup> 0/1 بهمیزان کرنش پیک



شکل ۱۳ ریزساختار گردنبند شکل در نمونهی تغییر شکل یافته در دمای C<sup>0</sup> 400 با نرخ کرنش <sup>1-</sup>S اب میزان کرنش 0/3

**نتیجهگیری** ۱- در همهی دماهای تغییر شکل، کسر دانههای تبلور مجدد يافته با افزايش ميزان كرنش افزايش يافتند.

مراجع

- Avedesian M., and Baker H., "ASM Specialty Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys", ASM International, U.S.A, (1999).
- 2. Kainer K. U., "Magnesium Alloys and Technology", WILEY-VCH, Germany, (2003).
- Friedrich H. E., and Mordike B., "Magnesium Technology Metallurgy, Design Data, Applications", Springer, Germany, (2006)
- Kumar N. V. R., Blandin J. J., Desrayaud C., Montheillet, F., and Suery, M., "Grain refinement in AZ91 magnesium alloy during thermomechanical processing", Materials Science and Engineering A, pp. 150-157, (2003).
- 5. Maldar A. R., Ebrahimi G. R., Ebrahimi R., and Davoodi A., "The Effect of Homogenization on Microstructure and Hot Ductility Behaviour of AZ91 Magnesium Alloy", Kovove Mater., (2010).
- 6. Humphreys F. J., and Hatherly M., "RECRYSTALLIZATION AND RELATED ANNEALING PHENOMENA", Second Ed., Elsevier Ltd., UK, (2004)
- Flyn P. W., Mote J., and Dorn, J. E., "On the thermally activated mechanism of prismatic slip in magnesium single crystals", Transaction of the Metallurgical Society of AIME, Vol. 221, pp.1149-1154, (1961).
- Maksoud I. A., Ahmed H., and Rodel J., "Investigation of the effect of strain rate and temperature on the deformability and microstructure evolution of AZ31 magnesium alloy", Materials Science and Engineering A, Vol.504, pp.40-48, (2009).

۲- روند افزایش کسر دانههای تبلور مجدد یافته با

۳- مرز دانههای موجی شکل و مضرّس در ریزساختار

نمونەي تغيير شكل يافتە بەميزان كرنش ييك ب

وقوع فرایند تبلور مجدد ناپیوسته نسبت داده شد. ٤- سازوکار فرایند تبلور مجدد در آلیاژ منیزیم AZ91

در محدوده دمایی °C تا °C تا 425 از نوع

٥- اندازهی دانههای تبلور مجدد یافته با افزایش میزان

کرنش در ابتدا افزایش و پس از رسیدن بـه مقـدار

و توان 1/4 در آن، نشان داده شد.

گردنبند مانند تشخیص داده شد.

بیشینهی خود، کاهش یافت.

افزایش میزان کرنش با استفاده از معادلهی اورامی

- Liqiang M., Zhenyu L., Sihai J., Xiangqian Y., and Di W., "Dynamic Recrystallization Behaviour of Nb-Ti Microalloyed Steels", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*. Sci. Ed., Vol. 23, (2008).
- 10. Liu L., and Ding H., "Study of the plastic flow behaviors of AZ91 magnesium alloy during thermomechanical processes", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.484, pp. 949-956, (2009).
- Xu S. W., Matsumoto N., Kamado S., Honma T., and Kojima Y., "Dynamic microstructural changes in Mg–9Al–1Zn alloy during hot compression", Scripta Materialia, ARTICLE IN PRESS, (2009).
- Beer A. G., and Barnett M. R., "Influence of initial microstructure on the hot working flow stress of Mg-3Al-1Zn", Materials Science and Engineering A, Vol. 423, pp.292-299, (2006).
- 13. Beer A. G., "The evolution of hot working stress and microstructure in Mg-3Al-Zn", Deakin, 2004.
- Barnett M. R., "Influence of deformation conditions on the high temperature flow stress of magnesium AZ31", *Journal of Light Metals*, Vol. 1, pp.167-177, (2001).
- Ding H., Liu L., Kamado S., Ding W., and Kojima, Y., "Evolution of Microstructure and Texture of AZ91 Alloy during Hot Compression", Materials Science and Engineering A, Vol.452-453, pp.503-507, (2007).
- Fatemi-Varzaneh S. M., Zarei-Hanzaki A., and Haghshenas, M., "A study on the effect of thermomechanical parameters on the deformation behavior of Mg-3Al-1Zn", Materials Science and Engineering A, ARTICLE IN PRESS, (2008).
- 17. Dieter G. E., "Mechanical Metallurgy", Third Ed., McGraw-Hill, London, (1988).
- Kaibyshev R., and Sitdikov, O. S., "On Bulging Mechanism of Dynamic Recrystallization", *Third International Conference on Recrystallization and Related Phenomena*, (1996).
- Barnett M. R., "Recrystallization during and following hot working of Magnesium alloy AZ31", Material Science Forum, Vol. 419-422, pp.503-508, (2003).
- Liu L., Zhou H., Wang Q., Zhu Y., and Ding, W., "Dynamic Recrystallization Behavior of AZ61 Magnesium Alloy ", AZojomo, Vol.2, (2006).