



تأثیر تعداد پاس‌ها بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ منیزیم AZ31C در فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای (TCAP) در دمای 300 درجه سانتی‌گراد

عبدالرحمان صوفی محمدی¹، محمود موسوی مشهدی^{2*}، قادر فرجی³

1- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران

2- استاد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران

3- استادیار مهندسی مکانیک، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران

* صندوق پستی 11155-4563، mmosavi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 25 مرداد 1393
پذیرش: 23 مهر 1393
ارائه در سایت: 09 آذر 1393

کلید واژگان:

تغییر شکل پلاستیک شدید
فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای
آلیاژ منیزیم AZ31C
ریز دانه کردن
خواص مکانیکی

چکیده

این پژوهش تأثیر تعداد پاس‌ها بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ منیزیم AZ31C در فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای (TCAP) در دمای 300 درجه سانتی‌گراد را بررسی می‌کند. فرایند فشار طی چهار پاس بر روی لوله‌های منیزیم AZ31C صورت گرفته است و در هر پاس، نمونه تحت آزمون کشش، میکروسختی و متالوگرافی قرار گرفته است. خواص مکانیکی و میکرو ساختاری لوله‌های یک تا چهار پاسه فراوری شده مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که سختی نمونه لوله‌ای شکل یک پاسه از میزان اولیه 48HV به 62HV افزایش پیدا کرده است. افزایش تعداد پاس‌ها بعد از پاس اول تأثیر بیشتری بر روی افزایش سختی نمونه‌ها نداشته است. استحکام تسلیم و نهایی در مقایسه با نمونه خام ریختگی به ترتیب 1/97 و 1/57 برابر افزایش و درصد طول بیشینه از مقدار 5/8 درصد به 1/51 درصد کاهش پیدا کرده است. بیشترین افزایش استحکام در پاس دوم بدست آمد و تعداد پاس‌ها بعد از پاس دوم تأثیر بیشتری بر افزایش استحکام نداشت. تحقیقات ریز ساختاری نشانگر کاهش قابل توجه اندازه دانه از 1/2 میلی‌متر به حدود 6 میکرو متر است. همچنین تصاویر میکروسکوپی نشان می‌دهد که اندازه دانه تا پاس اول کوچکتر شده ولی در پاس‌های بعدی بزرگتر می‌شود.

The effect of pass numbers over microstructure and mechanical properties of magnesium alloy of AZ31C in the tubular channel angular pressing (TCAP) at temperature of 300°C

Abdulrahman Soufi Mohammadi, Mahmud Mosavi Mashhadi*, Ghader Faraji

Department of Mechanical Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

* P.O.B. 11155-4563, Tehran, Iran, mmosavi@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 August 2014
Accepted 15 October 2014
Available Online 30 November 2014

Keywords:

Severe Plastic Deformation
Tubular Channel Angular Pressing AZ31C
Grain Refinement
Mechanical Properties

ABSTRACT

This research studies pass numbers effect on microstructure and mechanical properties of magnesium alloy of AZ31C in the tubular channel angular pressing (TCAP) at temperature of 300°C. Pressing process has been carried out through four passes over AZ31C Magnesium tubes and in each pass the sample is exposed to Tensile and microhardness test and *Metallography*. The microstructure and mechanical properties of processed tube through one to four passes of the TCAP process were investigated. Microhardness of the processed tube was increased to 62Hv after one pass from an initial value of 48 Hv. An increase in the number of passes from 1 to higher number of passes has little effect on the microhardness. Yield and ultimate strengths were increased 1.97 and 1.57 times compared to as cast condition. Notable increase in the strength was achieved after two passes TCAP while higher number of passes has little effect. Microstructural investigation shows notable decrease in the grain size to around 6 μm from the primary value of ~1.2 mm. Microscope images show that the grain size becomes smaller with the first pass but bigger in the next passes.

1- مقدمه

نمونه، اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری کاهش یافته و خواص مکانیکی نمونه بهبود چشمگیری می‌یابد. در سال‌های اخیر روش‌های مختلف تغییر شکل پلاستیک شدید مانند فرایند فشار در کانال زاویه‌دار مساوی⁴ [1]، پیچش

روش تغییر شکل پلاستیکی شدید¹ یکی از روش‌های جدید برای تولید مواد فوق ریزدانه² و نانو³ ساختار است. در این روش با اعمال کرنش‌های شدید به

3- Nano
4- Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

1- Severe Plastic Deformation (SPD)
2- Ultrafine Grained (UG)

Please cite this article using:

A. Soufi Mohammadi, M. Mosavi Mashhadi, Gh. Faraji, The effect of pass numbers over microstructure and mechanical properties of magnesium alloy of AZ31C in the tubular channel angular pressing (TCAP) at temperature of 300°C, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 126-130, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

جریان ماده و حالت تنش کرنش با فرایند فشار در کانال زاویه‌دار مساوی معمولی متفاوت است. در فرایند فشار در کانال زاویه‌دار مساوی معمولی حالت کرنش می‌تواند به صورت برش ساده در نظر گرفته شود [12]. درحالی که در فرایند TCAP کرنش‌های اضافی محیطی کششی و فشاری وجود دارد. مقدار کل کرنش مؤثر پلاستیک تجمعی ($\bar{\epsilon}_T$) پس از تعداد n پاس TCAP به طور کلی از رابطه (1) قابل محاسبه است که از فرمول پلاستیسیته مهندسی رایج و هندسه شکل 1-ب بدست می‌آید:

$$\bar{\epsilon}_T = \sum_{i=1}^n \left[\frac{2 \cot(\varphi_i/2 + \omega_i/2) + \omega_i \csc(\varphi_i/2 + \omega_i/2)}{\sqrt{3}} + \frac{4}{\sqrt{3}} \ln \frac{R}{R_0} \right] \quad (1)$$

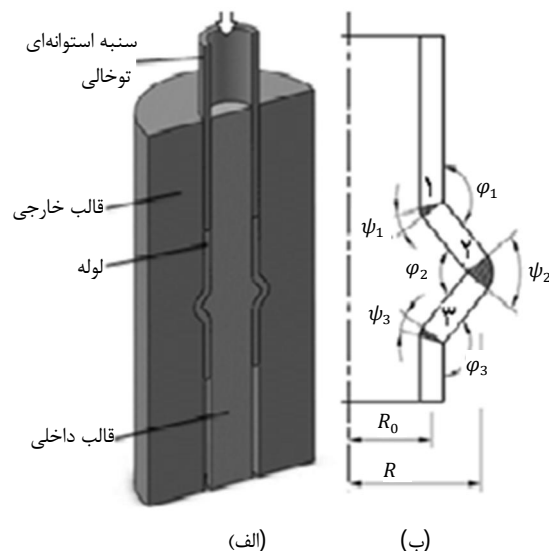
مطابق رابطه (1) مقدار کل کرنش معادل پلاستیکی در فرایند TCAP پارامترهای به کارگرفته شده در این کار پس از پاس‌های یک، دو، سه و چهار به ترتیب 2/2، 4/4، 6/6 و 8/8 هستند.

2- آزمایش‌های تجربی

آزمایش‌های تجربی انجام گرفته در این مقاله روش TCAP با کانال مثلثی است. شکل دیگر کانال‌ها، دوزنقه‌ای و نیم‌دایروی هستند با توجه به اینکه هر کدام دارای پارامترها و کرنش‌های متفاوتی هستند، می‌توانند هر کدام بر روی توزیع یکنواختی کرنش و نیروی فرایند تأثیرگذار باشند [13]. روش TCAP چهار پاسه با کانال مثلثی بر روی آلیاژ منیزیم AZ31C در دمای 300 درجه سانتی‌گراد انجام شده است. چون دمای ذوب این آلیاژ بین 600 تا 650 درجه سانتی‌گراد است، دمای زیر دمای ذوب انتخاب شد و هر چه این دما پایین‌تر باشد خواص مکانیکی بهبود می‌یابد. قطعه‌های تهیه شده با این روش ابتدا برش می‌خورند و پس از آماده‌سازی با روش‌های متالوگرافی شامل پولیش و اچ با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار می‌گیرند. خواص مکانیکی شامل آزمایش‌های سختی و فشار بر روی نمونه‌ها انجام گرفته است و بر روی هر نمونه یک تست انجام شد.

جنس استفاده شده در آزمایش‌های TCAP، آلیاژ منیزیم AZ31C با عناصر آلومینیوم 2/75 درصد، روی 0/75 درصد و منگنز 0/27 درصد است. لوله‌های اولیه با قطر 20 میلی‌متر و ضخامت 2/5 میلی‌متر از شمش ریختگی منیزیمی اولیه ماشین‌کاری شدند. یک قالب TCAP از جنس فولاد گرم کار با پارامترهای نشان داده شده در جدول 1 و شکل 1 ساخته شده و تا 55 راکول سخت‌کاری می‌شوند [11]. آزمایش‌ها با استفاده از یک پرس اینسترون با سرعت حرکت پرس برابر 10 میلی‌متر بر دقیقه در دمای 300 درجه سانتی‌گراد انجام گرفت که سرعت حرکت پرس همان سرعت شکل‌دهی است که می‌تواند بر ریزساختار ماده و چگالی آن تأثیر بگذارد. برای کاهش اصطکاک از روغن‌کاری سولفید مولیبدن استفاده شد [14]. نمونه‌های ساخته شده در دو جهت موازی و عمود بر محور لوله بریده می‌شوند و برای بررسی ریزساختاری با استفاده از تکنیک‌های متالوگرافی آماده‌سازی اچ شدند. محلول اچ مورد استفاده برای آلیاژ منیزیم AZ31C محلول پیکرال است [15] که ترکیب شیمیایی آن در جدول 2 ارائه شده است. آزمایش سختی‌سنجی در مقطع لوله با استفاده از دستگاه سختی‌سنجی میکرو ویکرز انجام گرفت. در آزمایش‌های سختی نیروی 300 گرمی برای مدت زمان 10 ثانیه اعمال شدند. آزمایش تست کشش در دمای محیط و با نرخ کرنش 0/001 با استفاده از دستگاه کشش اینسترون متعلق به آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس انجام گرفت.

فشار بالا¹ [2]، نورد اتصال تجمعی² [3]، کنگره‌ای و صاف کردن متناوب³ [4]، ارائه شده و توسعه یافته است. بیشتر این روش‌ها برای تولید مواد فوق ریزدانه و نانو ساختار بالکی⁴ با مقاطع مربعی و دایروی شکل [5،6] و همچنین ورق‌ها و صفحه‌ها [7-10] مناسب هستند. با وجود نیاز به لوله‌های با استحکام بالا در گستره وسیعی از کاربردهای صنعتی تلاش‌های اندکی برای تولید قطعه‌های لوله‌ای شکل فوق ریزدانه با استفاده از تغییر شکل پلاستیکی شدید صورت گرفته است. لذا ارائه روشی مؤثر، ارزان و با قابلیت صنعتی و تولید بالا برای لوله‌ها ضروری است، از این رو در سال 2011 فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای (TCAP)⁵ توسط قادر فرجی و همکارانش اختراع و ارائه شد [11]. با توجه به اینکه تنش‌های برشی نقش اساسی و تعیین‌کننده‌ای در فرایند ریزدانه شدن فلزات ایفا می‌کند، روش ارائه شده بر مبنای ایجاد تنش‌های برشی هم محور می‌باشد. اساس روش در شکل 1-الف نشان داده شده است. ابتدا لوله اولیه مابین قالب داخلی و قالب خارجی دو تکه قرار داده می‌شود. قالب داخلی دارای یک برآمدگی رنگی با مقطع مثلثی و قالب خارجی دارای یک فرورفتگی رنگی با مقطع مثلثی شکل است. این مجموعه داخل سیلندر پشتیبان قرار داده می‌شود. این کار باعث می‌شود که نیروهای وارد بر قالب دوتکه در عین فرایند از طرف لوله تحت فشار باعث جدا شدن آنها نشود. سنبه استوانه‌ای توخالی روی سطح بالایی لوله قرار داده شده و مجموعه زیر پرس قرار داده می‌شود. در اثر اعمال فشار به سنبه توخالی لوله فلزی به داخل کانال زاویه‌دار هم محور اکستروژن می‌شود. در اثر عبور لوله از کانال زاویه‌دار، لوله تغییر شکل یافته در سه ناحیه 1، 2 و 3 نشان داده شده در شکل 1-ب تحت اثر کرنش‌های شدید برشی پلاستیک قرار می‌گیرد. نکته دیگر این فرایند این است که سطح مقطع لوله در ابتدای فرایند در مقایسه با انتهای فرایند تغییری نمی‌کند و بنابراین این کار را می‌توان به دفعات تکرار کرد. این مسأله یکی از مشخصه‌های اصلی روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید است.



شکل 1-الف- نمای شماتیک فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای ب- سه ناحیه برشی و پارامترهای موجود در فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای

- 1- High Pressure Torsion (HPT)
- 2- Accumulative Roll Bonding (ARB)
- 3- Repetitive Corrugation and Straightening (RCS)
- 4- Bulk
- 5- Tubular Channel Angular Pressing (TCAP)

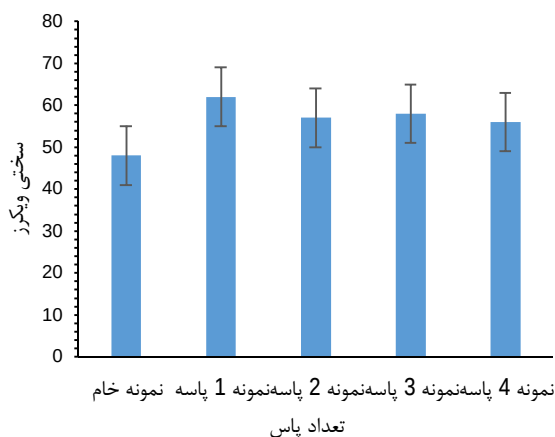


(الف)

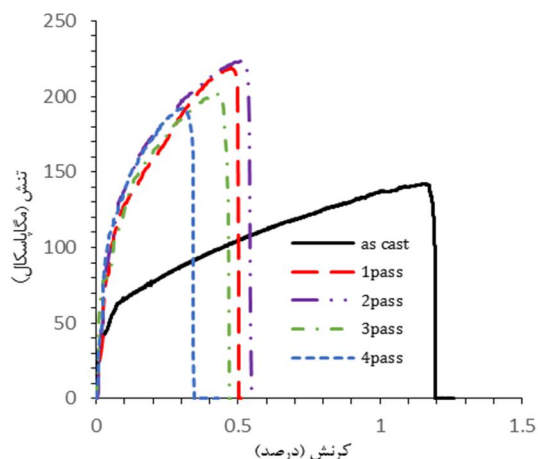


(ب)

شکل 2 الف - لوله منیزیمی قبل از فرایند، ب - لوله منیزیمی بعد از فرایند به همراه نمونه تست کشش



شکل 3 نمودار تغییرات میکرو سختی طی اعمال پاس‌های متوالی خواص مکانیکی ناشی از پالایش دانه‌بندی و ریزشدن دانه در طی اعمال تغییرشکل پلاستیکی شدید در فرایند TCAP است. از نمودار شکل 4 می‌توان استحکام تسلیم، استحکام نهایی و درصد افزایش طول بیشینه را استخراج کرد.



شکل 4 نمودار تنش کرنش نمونه‌های 1 تا 4 پاسه (pass) و نمونه خام ریختگی (as cast)

جدول 1 پارامترهای قالب TCAP و مقادیر آنها	
مقدار	پارامتر
$\varphi_1 = \varphi_3$	135°
φ_2	90°
زاویه انحنا $\omega_1 = \omega_3$	0
زاویه انحنا ω_2	90°
نسبت شعاع‌ها	1/5
ضخامت لوله	2/5 میلی‌متر
قطر اولیه لوله	20 میلی‌متر

جدول 2 محلول اچ مورد استفاده برای آلیاژ منیزیم AZ31C	
ترکیب	مقدار
استیک اسید	10 میلی لیتر
پیکریک اسید	4/2 گرم
آب	10 میلی لیتر
اتانول	70 میلی لیتر

3- نتایج و بحث

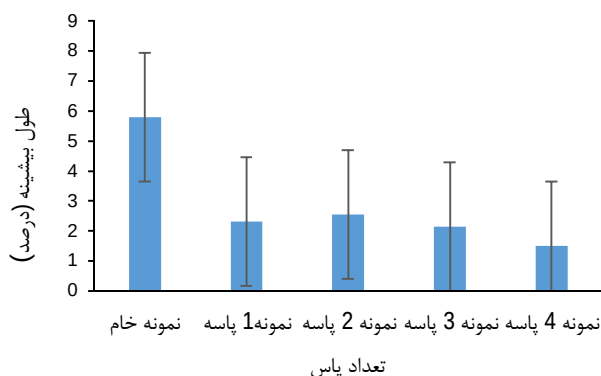
3-1- خواص مکانیکی

شکل 2 لوله منیزیمی AZ31C قبل و بعد از فرایند TCAP را به همراه نمونه تست کشش نشان می‌دهد. در حین فرایند قطر لوله افزایش یافته و دوباره به اندازه اولیه در انتهای فرایند برگشته است. همانطور در شکل نشان داده شده است سطح مقطع لوله بعد از فرایند TCAP تغییر نکرده است، در حالی که قسمت انتهایی لوله دچار مقداری ناهمسانی شده است.

شکل 3 نمودار تغییرات میکرو سختی طی اعمال پاس‌های متوالی را در فرایند TCAP نشان می‌دهد. همان‌طور در شکل نشان داده شده است، سختی در اولین پاس افزایش یافته است. فرایند TCAP باعث افزایش سختی از میزان اولیه 48 HV^1 به میزان 62 HV می‌شود این افزایش بدین معناست که سختی در پاس اول 29 درصد افزایش یافته است. پذیرفته شده که سختی و استحکام فلزات با ساختار کریستالی هگزاگونال متراکم مانند منیزیم وابستگی شدیدی به اندازه دانه به خاطر کمبود سیستم‌های لغزشی مناسب دارند [16]. پس این افزایش سختی در آلیاژ منیزیم AZ31C می‌تواند به خاطر ریز شدن دانه‌ها باشد. طبق اندازه‌گیری انجام شده برای اندازه متوسط دانه در این پژوهش اندازه متوسط دانه برای نمونه خام و پاس‌های اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب برابر $1/2$ میلی‌متر، $6/8$ میکرومتر، $7/5$ میکرومتر، $7/2$ میکرومتر و $7/8$ میکرومتر است که سختی نیز به ترتیب برابر 48 HV ، 57 HV ، 58 HV و 56 HV می‌باشد که می‌توان نتیجه گرفت هرچه اندازه متوسط دانه ریزتر باشد سختی نیز افزایش می‌یابد.

افزایش تعداد پاس‌ها در فرایند TCAP بعد از پاس اول تأثیر بیشتری بر میکرو سختی نمونه‌ها ندارد.

شکل 4 نمودار تنش کرنش نمونه‌های تولید شده 1 تا 4 پاسه و نمونه خام ریختگی در دمای 300°C درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد که نتیجه آزمایش تست کشش بود. همان‌گونه که در شکل 4 نشان داده شده است منحنی‌های مربوط به نمونه ریختگی نسبت به نمونه‌هایی که تحت فرایند چند پاسه قرار گرفته‌اند کاملاً متفاوت است. بعد از پاس اول استحکام تسلیم و نهایی نمونه‌ها به طور قابل توجهی افزایش یافته در حالی که درصد افزایش طول بیشینه نسبت به نمونه خام ریختگی کاهش پیدا کرده است که بهبود

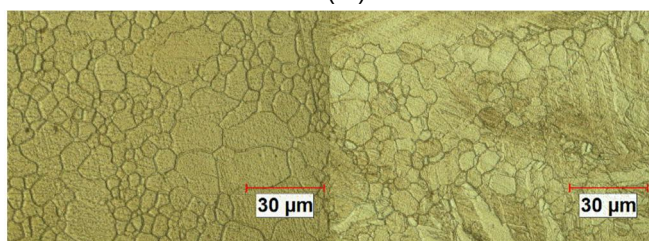


شکل 7 نمودار درصد افزایش طول بیشینه نمونه خام و نمونه‌های 1 تا 4 پاسه

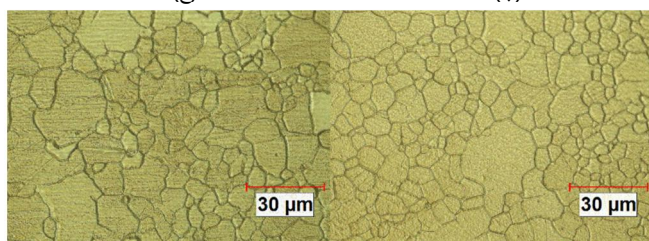
شدید ناشی از فرایند TCAP اندازه متوسط دانه اولیه از مقدار $1/2$ میلی‌متر به حدود 6 میکرومتر در پاس اول، $7/5$ میکرومتر در پاس دوم، $7/2$ میکرومتر در پاس سوم و $7/8$ میکرومتر در پاس چهارم کوچکتر شده است. همچنین ریزترین دانه حدود 1 میکرومتر است که مربوط به پاس سوم است. از روی این تصاویر دانه‌های ریز تبلور مجدد یافته همراه تعداد کمی دانه‌های درشت که با دانه‌های ریز احاطه شده‌اند، مشاهده می‌شوند. علت اینکه دانه‌های درشت بعد از تغییر شکل باقی مانده‌اند این است که این دانه‌ها قبل از تغییر شکل دارای جهت‌گیری مناسبی برای تغییر شکل نبوده‌اند که بعد از فرایند TCAP تغییر شکل چندانی نداشته، در نتیجه یک ساختار دوگانه (دانه‌های ریز همراه با دانه‌های درشت) بوجود آمده است که به خوبی در شکل 8 دیده می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل 8 تصاویر میکروسکوپی الف- نمونه خام، ب- نمونه یک پاسه، ج- نمونه دو پاسه، د- نمونه سه پاسه و ه- نمونه چهار پاسه

شکل 5 نمودار مربوط به استحکام تسلیم نمونه‌های 1 تا 4 پاسه به همراه نمونه ریختگی خام است. همان‌طور که از روی نمودار دیده می‌شود بیشترین افزایش استحکام تسلیم مربوط به پاس دوم است که از مقدار 63 مگاپاسکال در نمونه خام به مقدار 124 مگاپاسکال رسیده است، یعنی $1/97$ برابر افزایش یافته است. همان‌طور که از روی نمودار مشاهده می‌شود استحکام تسلیم تا پاس دوم بصورت خطی افزایش یافته است و از پاس دوم به بعد دوباره بصورت خطی کاهش یافته است.

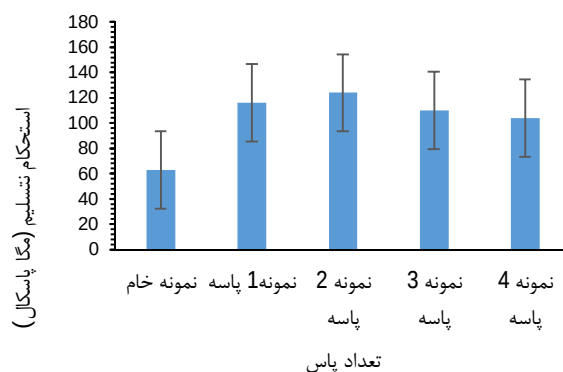
شکل 6 نمودار تغییرات استحکام نهایی طی اعمال پاس‌های متوالی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود استحکام تسلیم نهایی نمونه خام از مقدار $142/2$ مگا پاسکال به مقدار بیشینه $223/5$ مگاپاسکال در پاس دوم رسیده است، یعنی $1/57$ برابر افزایش پیدا کرده است. طبق این نمودار استحکام نهایی نمونه خام تا پاس دوم بصورت خطی افزایش یافته و از پاس دوم به بعد کاهش پیدا کرده است.

شکل 7 نمودار درصد افزایش طول بیشینه طی اعمال پاس‌های متوالی را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش استحکام نمونه‌ها، درصد افزایش طول بیشینه کاهش می‌یابد، به طوری که نمونه خام دارای بیشترین درصد افزایش طول بیشینه ($5/8$ درصد) بوده و نمونه 4 پاسه دارای کمترین مقدار ($1/51$ درصد) است.

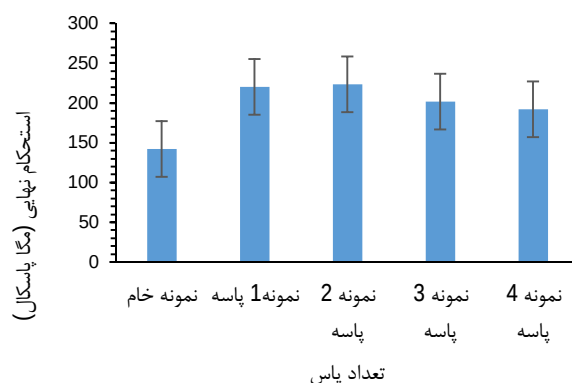
2-3- خواص میکرو ساختار

شکل 8 تصاویر میکروسکوپی نمونه خام و نمونه‌های 1 تا 4 پاسه را نشان می‌دهد.

تصاویر میکروسکوپی نشان می‌دهد که به دلیل تغییر شکل پلاستیکی



شکل 5 نمودار استحکام تسلیم نمونه خام و نمونه‌های 1 تا 4 پاسه



شکل 6 نمودار استحکام نهایی نمونه خام و نمونه‌های 1 تا 4 پاسه

- [3] Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, and T. Sakai, Novel ultra-high straining process for bulk materials-development of the accumulative roll-bonding (ARB) process, *Acta Materialia*, Vol. 47, No. 2, pp. 579-583, 1999.
- [4] J.Y. Huang and others, Microstructures and dislocation configurations in nanostructured Cu processed by repetitive corrugation and straightening, *ACTA MATER*, Vol. 49(9), pp. 1497-1505, 2001.
- [5] V.M. Segal, materials processing by simple shear. *Mater Sci Eng*, Vol. A 197, pp. 157-164, 1995.
- [6] D. Orlov, G. Raab, T. T. Lamark, M. Popov, and Y. Estrin, Improvement of mechanical properties of magnesium alloy ZK60 by integrated extrusion and equal channel angular pressing, *Acta Materialia*, Vol. 59, no. 1, pp. 375-385, 2011.
- [7] M. Kamachi, M. Furukawa, Z. Horita and T.G. Langdon, Equal-Channel Angular Pressing Using Plate Samples, *Materials Science and Engineering*, Vol. A361, pp. 258-266, 2003.
- [8] S. Ferrasse, V.M. Segal, S.R. Kalidini, F. Alford, Texture evolution during equal channel angular extrusion: Part I. Effect of route, number of passes and initial texture, *Mater Sci Eng*, Vol. A 368, pp. 28-40, 2004.
- [9] J. C. Lee, H. K. Seok, J. Y. Suh, J. H. Han, and Y. H. Chung, Structural evolution of a strip-cast Al alloy sheet processed by continuous equal-channel angular pressing, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. A 33, No. 3, pp. 665-673, 2002.
- [10] O. Bouaziz, Y. Estrin, H.S. Kim, A new technique for severe plastic deformation: the cone-cone method, *Adv. Eng. Mater.* Vol. 11(12), pp. 982-985, 2009.
- [11] G. Faraji, M.M. Mashhadi, H.S. Kim, Tubular channel angular pressing (TCAP) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes, *Materials Letters*, Vol. 65, pp. 3009-3012, 2011.
- [12] Y. Iwahashi, J. Wang, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, principles of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials *Scripta Mater*, Vol. 35, pp. 143, 1996.
- [13] G. Faraji, M.M. Mashhadi, H.S. Kim, Deformation behavior in tubular channel angular pressing (TCAP) using triangular and semicircular channels, *Materials transactions*, vol. 53, pp. 8-12, 2012.
- [15] G. Faraji, M.M. Mashhadi, H.S. Kim, Microstructure inhomogeneity in ultra-fine grained bulk AZ91 produced by accumulative back extrusion (ABE), *Mater. Sci. Eng*, Vol. A528, pp. 4312-4317, 2011.
- [16] Hugh baker michal m. Avedesian, *ASM Specialty Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys*.
- [17] S. Kleiner, O. Beffort, P.J. Uggowitzer, microstructure evolution during reheating of an extruded Mg-Al-Zn alloy into the semisolid state, *Scripta Mater*, Vol. 51, pp. 405-410, 2004.

دانه‌ها در پاس اول نسبت به سه پاس بعدی ریزتر شده است ولی در پاس‌های بعدی به دلیل اینکه زمان بیشتری برای انجام فرایند لازم بود فرایند رشد دانه بر تغییر شکل پلاستیکی شدید غالب شده و دانه‌های بزرگتری تشکیل شده‌اند، در نتیجه روند ریزدانه شدن کندتر شده است.

4- نتیجه‌گیری

بر اساس آزمایش‌های انجام شده سختی نمونه لوله‌ای شکل یک پاسه 29 درصد افزایش یافته است. افزایش تعداد پاس‌ها در فرایند TCAP بعد از پاس اول تأثیر چندانی بر میکرو سختی نمونه‌ها نداشت. در پاس دوم استحکام نهایی و تسلیم به ترتیب 57 و 97 درصد افزایش طول بیشینه 56 درصد کاهش یافته است. بیشترین افزایش استحکام در پاس دوم بدست آمد و تعداد پاس‌ها بعد از پاس دوم تأثیر بیشتری بر افزایش استحکام نداشت. اندازه متوسط دانه از 1/2 میلی‌متر در نمونه خام به حدود 6 میکرومتر در پاس اول رسیده است که ریزترین دانه حدود 1 میکرومتر می‌باشد که مربوط به پاس سوم است. تعداد پاس‌ها بعد از پاس اول تأثیر بیشتری بر ریز شدن اندازه متوسط دانه نداشت.

5- مراجع

- [1] R.Z. Valiev, T.G. Langdon, principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Prog Mater Sci*, Vol. 51, pp. 881-981, 2006.
- [2] A.P. Zhilyaev, T.G. Langdon, using high-pressure torsion for metal processing: fundamentals and applications *Prog Mater Sci*, Vol. 53, pp. 893-979, 2008.