

تأثیر فرایند پرس با کانال‌های همسان زاویه دار بر ساختار آلیاژ AM30 منیزیم

رامین جهادی نائینی، محمد صدیقی* و حمید رضا جاهد مطلق
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۶ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۰/۲۵)

چکیده - در این مقاله، تأثیر فرایند پرس با کانال‌های همسان زاویه‌دار (ECAP) بر ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ AM30 منیزیم مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج، تأثیر قابل توجه فرایند ECAP را در ایجاد ساختار ریز دانه نشان می‌دهد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که اندازه دانه‌ها از ۲۰/۴ میکرومتر در حالت اکسترود شده به ۷/۲ میکرومتر در پاس اول و ۳/۹ میکرومتر در پاس چهارم کاهش یافت. نتایج پاس چهارم افزایش چکش خواری و کاهش استحکام تسلیم را در مقایسه با حالت اکسترود شده نشان داد. این رفتار می‌تواند بر اساس میزان بالای نرم شدن ناشی از تشکیل بافت در مقابل اثر ریز دانه شدن بر استحکام توضیح داده شود. نتایج آزمون سختی در مقطع عرضی نمونه‌ها، افزایش سختی و توزیع یکنواخت کرنش در پاس‌های بالاتر فرایند ECAP را نشان داد.

واژگان کلیدی: پرس با کانال‌های همسان زاویه دار، آلیاژ AM30 منیزیم، ساختار ماده، ریز سختی

Effect of Equal Channel Angular Pressing on Microstructure of AM30 Magnesium Alloy

R. Jahadi Naeini, M. Sedighi* and H. R. Jahedmotlagh

Department of Mechanical Engineering, University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract: In this paper, the effect of Equal Channel Angular Pressing (ECAP) process on the structure and mechanical properties of AM30 magnesium alloy was studied. The results showed a considerable effect of ECAP process on creating an ultrafine grain size structure. Scanning Electron Microscope indicated that the grain size dropped from 20.4 μm in the extruded form to 7.2 μm in the first pass and 3.9 μm in fourth pass. The fourth pass presented higher ductility and lower yield stress in comparison with the extruded case. This behavior can be explained based on higher rate of texture softening versus the effects of the grain refinement on strength. The hardness test on the samples cross-section showed an increase in hardness and a uniform strain distribution at higher ECAP passes.

Keywords: Equal channel angular pressing, AM30 magnesium alloy, Material structure, Micro-hardness.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sedighi@iust.ac.ir

از طریق بررسی تغییر بافت آلیاژ مورد بررسی قرار گرفته است.

در این پژوهش، تاثیر فرایند ECAP بر ساختار آلیاژ AM30 طی پاس‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی توزیع کرنش در سطح نمونه‌ها، آزمون سختی سنجی در مقطع عرضی نمونه‌ها به عمل آمده است. همچنین نتایج مربوط به آزمون کشش در پاس چهارم ارائه و با حالت اولیه مقایسه شده است.

۲- روش پژوهش

در این پژوهش از نمونه مستطیلی اکستروژن شده آلیاژ AM30 منیزیم به ابعاد $22 \times 70 \times 400$ میلی‌متر مکعب استفاده شده است که ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول (۱) ارائه شده است. بر اساس مشخصات قالب، نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۹ میلی‌متر و طول ۱۲۵ میلی‌متر در راستای اکستروژن از آن استخراج شد.

قالب به صورت مخروط ناقص است و از دو قسمت متقارن تشکیل شده است. شکل (۱) مدل قالب ECAP را نشان می‌دهد. قطر کانال قالب ۱۹ میلی‌متر و طول هر یک از کانال‌های قالب ۱۶۰ میلی‌متر است. عوامل مؤثر قالب که در فرایند ECAP ایفای نقش می‌کنند، عبارت از $\phi = 90^\circ$ (زاویه برخورد دو کانال به یکدیگر) و $\psi = 20^\circ$ (انحناء خارجی کانال) هستند. رابطه (۱) کرنش اعمالی را در هر پاس ECAP نشان می‌دهد [۲]:

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) + \psi \operatorname{Cosec} \left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) \right] \quad (1)$$

در این رابطه ϕ ، ψ و N به ترتیب زاویه برخورد دو کانال به یکدیگر، زاویه انحناء خارجی کانال و تعداد پاس است. بر اساس مشخصات قالب، کرنش اعمالی در هر پاس در حدود یک است. برای اعمال نیروی لازم ECAP، از پرس هیدرولیکی با ظرفیت ۳۵۰ تن و سرعت ثابت ۵ میلی‌متر بر ثانیه استفاده شد. با توجه به پژوهش‌های کانگ^۳ و همکارانش [۱۰]

فرایند ECAP اولین بار توسط سگال^۲ و همکارانش در دهه ۱۹۷۰ معرفی شد و یکی از جذاب‌ترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید است. در این فرایند با اعمال کرنش‌های شدید به نمونه، اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری کاهش و در مقابل خواص مکانیکی فلز بهبود چشم‌گیری می‌یابد [۱ و ۲].

منیزیم به دلیل دارا بودن برخی از خواص مناسب مانند پایین‌ترین چگالی در میان همه مواد فلزی و استحکام ویژه بالا، دارای کاربردهای وسیعی در صنعت هوافضا است، ولی با توجه به ضعف‌هایی که در خواص مکانیکی این فلز وجود دارد، استفاده از آن با محدودیت‌هایی همراه است [۳]. در سال‌های اخیر مقررات کاهش وزن خودرو به عنوان یک قسمت از مقررات محدودیت مصرف سوخت، باعث شده است که توجه بیشتری به منیزیم شود، زیرا کاهش ۱۰٪ وزن خودرو تقریباً منجر به کاهش ۶٪ مصرف سوخت می‌شود [۴].

یکی از روش‌های بهبود خواص مکانیکی منیزیم ایجاد ساختار ریز دانه است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد، انجام فرایند ECAP موجب ریز ساختار شدن منیزیم می‌شود، به گونه‌ای که اندازه دانه منیزیم خالص از ۹۰۰ میکرومتر در حالت ریختگی به ۳۸ میکرومتر پس از ۴ پاس کاهش یافته است. این موضوع باعث افزایش استحکام نهایی ماده از ۷۰ به ۱۰۰ مگاپاسگال و افزایش چکش‌خواری از ۴٪ به ۵/۵٪ شده است [۵]. همچنین انجام فرایند ECAP روی آلیاژهایی از منیزیم که فرایند اکستروژن روی آن‌ها انجام شده است، بسیار مؤثرست [۶]. نتایج فرایند ECAP روی آلیاژ ZA62 منیزیم نیز کاهش اندازه دانه‌ها از ۱۰ میکرومتر در پاس دوم به ۲ میکرومتر در پاس ۶ را نشان می‌دهد. همچنین استحکام تسلیم و نهایی به ترتیب ۵۱٪ و ۴۳٪ افزایش یافته است [۷]. در بیش‌تر پژوهش‌های صورت گرفته بر روی ECAP آلیاژهای منیزیم، استحکام افزایش یافته است [۷، ۵، ۱]. اگرچه نتایج مبنی بر کاهش استحکام طی پاس‌های مختلف ارائه شده است [۸ و ۹]. علت این موضوع

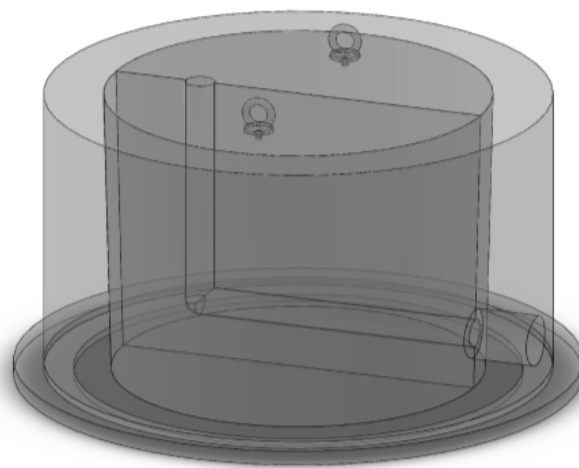
جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ AM30 منیزیم

Al	Zn	Mn	Cu	Fe	Ni	Mg	آلیاژ
۳٫۴	۰٫۱۶	۰٫۳۳	۰٫۰۰۰۸	۰٫۰۰۲۶	۰٫۰۰۰۶	عنصر پایه	AM30

دار صورت می‌پذیرد.

برای بررسی ساختار و تعیین اندازه دانه ماده، ابتدا در پاس‌های مختلف نمونه‌ها در راستای عرضی برش خورد و به دنبال آن عملیات سنباده‌زنی و پولیش به وسیله پودر آلومینیوم انجام شد. سپس نمونه‌ها به وسیله محلول اچ^۴ با مشخصات ۲٫۴ گرم اسید پیکریک، ۱۰ میلی‌لیتر اسید استیک، ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۷۰ میلی‌لیتر اتانول برای متالوگرافی آماده شدند [۱۳]. سطح نمونه‌ها به وسیله طلا پوشش داده شد و از آن‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۵ (SEM) عکس برداری به عمل آمد. هم‌چنین از تصاویر بدست آمده، بر اساس استاندارد ASTM-E-112-96 [۱۴]، اندازه دانه در نواحی مختلف از هر پاس بدست آمد.

نمونه‌های استوانه‌ای در راستای فرایند اکستروژن و راستای فرایند ECAP برای انجام آزمون کشش، مطابق اندازه نمونه‌های کوچک استاندارد ASTM-B-557M-06 [۱۵] با طول گیج^۶ ۲۰ میلی‌متر تهیه شد. آزمون به وسیله دستگاه Universal Testing Machine-Zwick مدل Z050 مجهز به اکستنسیومتر^۷ روی نمونه‌های متعدد انجام شده است. آزمون در دمای محیط و با نرخ $10^{-3} S^{-1}$ صورت گرفته است. به دلیل اهمیت پاس چهارم فرایند، نتایج این پاس ارائه و با حالت اولیه آلیاژ مقایسه شده است. آزمون سختی در مقطع عرضی نمونه‌های پاس‌های مختلف از بالا (قسمتی از نمونه در بالای کانال ECAP) به سمت پایین در ۸ نقطه و به فاصله ۲ میلی‌متر انجام گرفته است. آزمون سختی بر اساس استاندارد ASTM E 384-99 [۱۶] و به وسیله دستگاه Laizhou Huayin Micro Hardness Tester مدل HV-5 انجام شده است.



شکل ۱- مدل قالب مورد استفاده در فرایند ECAP.

بر روی آلیاژ AZ31، این میزان سرعت، زیاد است و برای انجام فرایند بدون ایجاد شکست در ماده، لازم است دمای انجام فرایند افزایش یابد. این دما در حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد پیشنهاد شده است. قالب ECAP توسط المنت‌های الکتریکی تا دمای مورد نظر گرم می‌شود و به وسیله ترموکوبلی که در دیواره کانال قالب نصب شده است، در محدوده $\pm 5^{\circ}C$ دما کنترل می‌شود. فرایند ECAP در دمای $275^{\circ}C$ و برای یک، دو، سه و چهار پاس در مسیر B_C [۱۱] (نمونه به اندازه ۹۰ درجه در یک جهت ساعت‌گرد و یا پاد ساعت‌گرد بین هر پاس می‌چرخد) انجام شده است. مسیر B_C بیش‌ترین تاثیر را در ریز کردن دانه‌ها و ایجاد ساختار مناسب دارد [۱۲].

سطح داخلی کانال‌های قالب و سطح نمونه به طور کامل با روان‌کننده دی‌سولفید مولیبدن (MoS₂) پوشش داده شده است. سپس به نمونه ۲۰-۳۰ دقیقه زمان داده می‌شود تا با قالب هم‌دما شود. سرانجام فرایند پرس با کانال‌های همسان زاویه

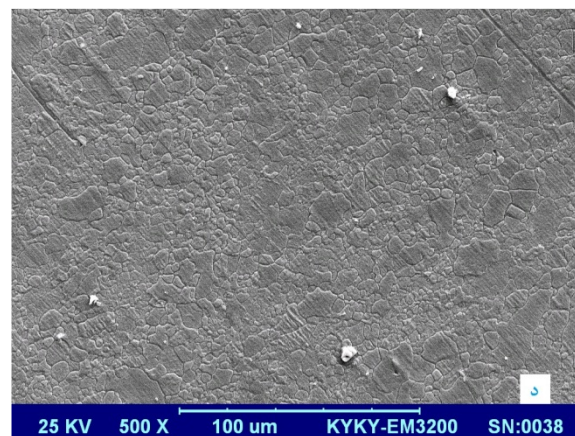
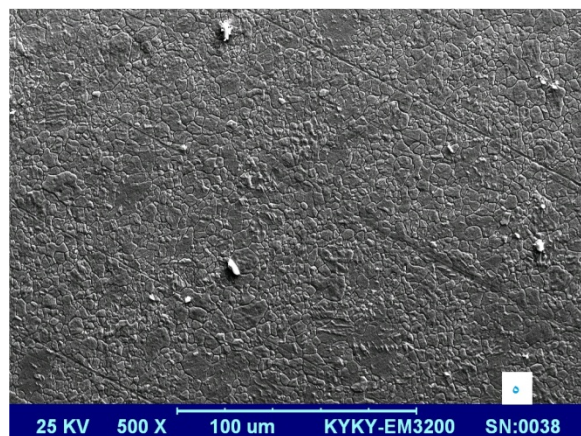
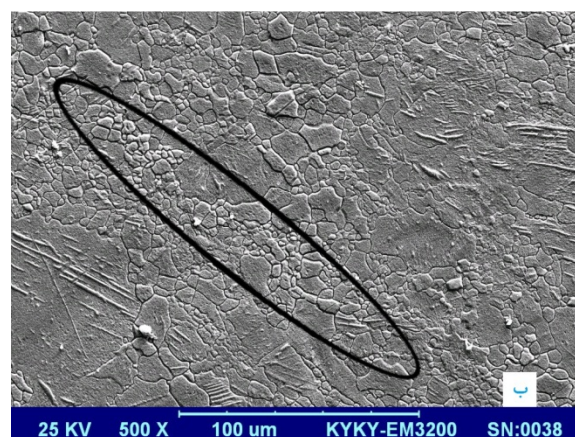
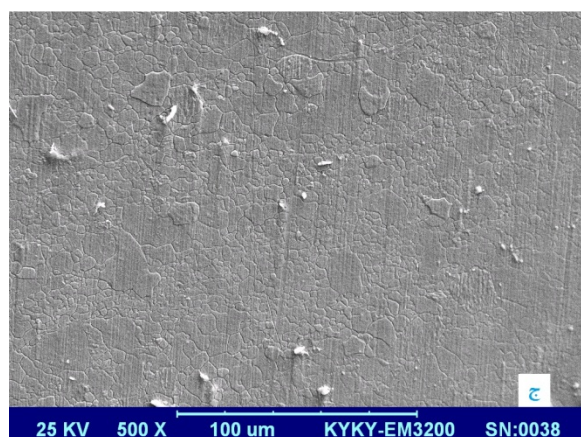
۳- نتایج و بحث

شکل (۲) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پاس‌های مختلف فرایند ECAP آلیاژ AM30 را نشان می‌دهد. تصویر (الف) نمونه اکسترود شده، (ب) پاس اول، (ج) پاس دوم، (د) پاس سوم، (ه) پاس چهارم را نشان می‌دهد. بر اساس تصاویر بدست آمده، فرایند ECAP در ایجاد ساختار ریز دانه بسیار مؤثرست. در پاس اول فرایند، دانه‌های درشت اولیه شکسته شده، ساختار دوگانه‌ای از دانه‌های ریز و درشت در ماده به وجود آمده است. تجزیه ساختار دانه‌ها در ناحیه مرز دانه‌ها در تصویر (ب) قابل مشاهده است. در واقع فرایند ECAP باعث افزایش چگالی نابجایی‌ها و منجر به ایجاد مرزدانه‌ها با زاویه کوچک^۷ (LAGB) می‌شود. با افزایش چگالی نابجایی‌ها، مرزدانه‌های فرعی و در نهایت مرز دانه‌هایی با زاویه بزرگ^۶ (HAGB) تشکیل می‌شود و ردیف‌هایی از دانه‌های ریز به وجود می‌آید [۲]. با افزایش تعداد پاس‌ها، ساختار ماده همگن و یکنواخت‌تر شده است. نتایج نشان می‌دهد پس از فرایند، دانه‌ها هم محور شده‌اند، بنابراین اعتقاد بر این است که تبلور مجدد دینامیکی طی فرایند ECAP رخ داده است [۸]. مهم‌ترین کاهش اندازه دانه مربوط به پاس اول است و علت این شدت تغییر اندازه دانه در پاس اول، افزایش انرژی محرکه برای بازیابی و تشکیل سلولهای نابجایی و تبلور مجدد دینامیکی با ریزتر شدن دانه هاست [۱۷]. این موضوع باعث ایجاد کسر بالایی از ریزدانه‌ها و دانه‌های هم محور با تشکیل مرز دانه با زاویه بزرگ شده است. در سایر پاس‌ها از میزان شدت اثر بخشی فرایند ECAP در ایجاد دانه‌هایی با اندازه کوچکتر، کاسته شده است.

شکل (۳) روند تغییرات اندازه دانه را نشان می‌دهد. میانگین اندازه دانه در حالت اکسترود شده ۲۰/۴ میکرومتر، پاس اول ۷/۲ میکرومتر، پاس دوم ۶/۱ میکرومتر، پاس سوم ۵ میکرومتر و پاس چهارم ۳/۹ میکرومتر است. هم‌چنین میله‌های خطا^۷ مقدار بیشینه و کمینه میانگین اندازه

دانه در نواحی مختلف نمونه‌ها را نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به شکل (۳) تغییرات میانگین اندازه دانه با افزایش تعداد پاس‌ها کاهش و در نتیجه میزان همگنی ساختار در نمونه‌ها افزایش یافته است. در پاس چهارم فرایند، دانه‌هایی با اندازه چند صد نانومتر نیز مشاهده شد. نتایج مشابه، کاهش اندازه دانه پس از انجام فرایند در سایر آلیاژهای منیزیم را نشان می‌دهد [۹، ۱۸، ۱۹]. جدول (۲) تاثیر فرایند بر اندازه دانه در سایر آلیاژهای منیزیم را نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج دمای فرایند و تعداد پاس‌ها، در اندازه دانه مؤثرست. این در حالی است که دمای فرایند یک پارامتر تجربی است و حداقل دمایی که امکان انجام فرایند در آن امکان پذیرست، در آلیاژهای مختلف متفاوت ظاهر می‌شود.

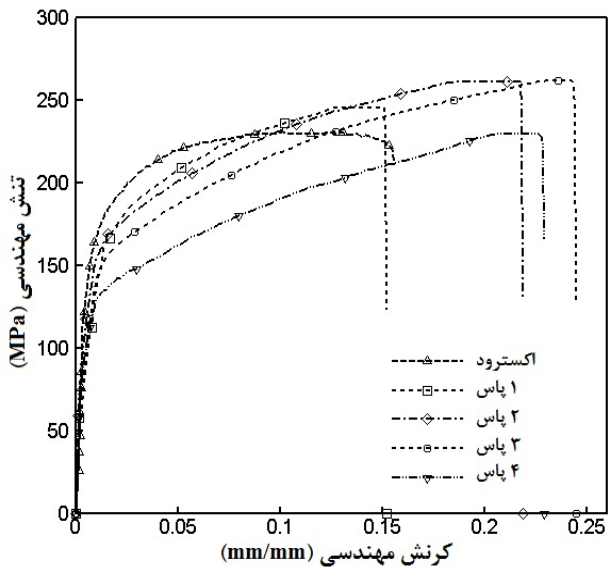
شکل (۴) نتایج آزمون کشش آلیاژ AM30 پس از چهار پاس فرایند ECAP و در مقایسه با حالت اکسترود را در دمای محیط و با نرخ کرنش $10^{-3} S^{-1}$ نشان می‌دهد. از این نمودار دو نکته قابل برداشت است: اولاً استحکام تسلیم در کلیه پاس‌ها کم شده است، به گونه‌ای که پس از هر پاس تنش تسلیم در حدود ۲۰ مگاپاسکال در مقایسه با حالت اکسترود (۱۶۲ مگاپاسکال) کاهش یافته است. استحکام نهایی حدود ۱۵ مگاپاسکال در پاس اول و ۳۰ مگاپاسکال در پاس‌های دوم و سوم افزایش یافته است، هم‌چنین در پاس چهارم تغییر چندانی قابل مشاهده نیست. ثانیاً میزان ازدیاد طول آلیاژ از حدود ۱۵٪ در حالت اکسترود به ترتیب به ۲۲٪، ۲۴٪ و ۲۳٪ در پاس‌های دوم، سوم و چهارم افزایش و در پاس اول تغییری نداشته است. علی‌رغم کاهش اندازه دانه و بهبود ساختار در پاس‌های مختلف، میزان استحکام تسلیم در همه پاس‌ها کاهش یافته است. علت این موضوع را می‌توان به تغییر در بافت آلیاژ طی انجام فرایند نسبت داد. پژوهش مشابه صورت گرفته روی آلیاژ AM60 نشان می‌دهد که استحکام تسلیم پس از ۶ پاس دارای کاهش بوده است [۹]. در این پژوهش تغییر بافت از طریق نمودارهای پل فیگر^{۱۱} در پاس‌های مختلف مورد بررسی قرار



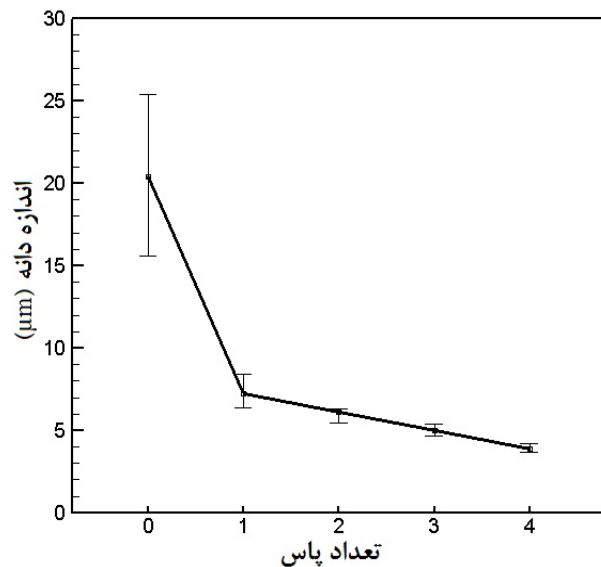
شکل ۲- تصویر SEM : (الف) نمونه اکستروود شده، (ب) پاس اول، (ج) پاس دوم، (د) پاس سوم و (ه) پاس چهارم.

جدول ۲- مقایسه تاثیر فرایند ECAP بر آلیاژهای مختلف منیزیم.

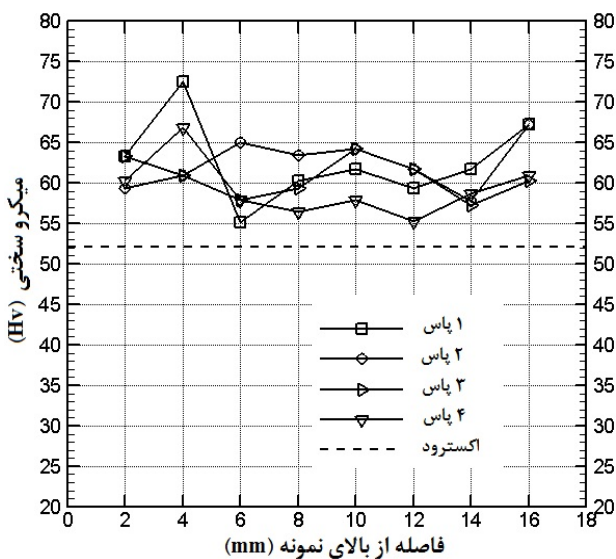
آلیاژ	دمای فرایند (درجه سانتی‌گراد)	اندازه دانه اولیه (میکرومتر)	تعداد پاس	اندازه دانه نهایی (میکرومتر)
AZ91 [۱۸]	۲۷۰	۴۰	۸	۱/۲
AM60 [۹]	۲۲۰	۱۹/۲	۶	۲/۳
AZ31 [۱۹]	۲۰۰	۴۸/۱	۴	۱/۴



شکل ۴- نتایج آزمون کشش آلیاژ AM30 در حالت اکستروژن و پس از چهار پاس فرایند ECAP.



شکل ۳- مقایسه اندازه دانه در هر پاس ECAP.



شکل ۵- نتایج سختی از بالای نمونه‌ها در چهار پاس.

به ترتیب ۶۲/۲۹، ۶۲/۴۵، ۶۰/۶۲ و ۵۹/۲۷ ویکرز است، که نسبت به حالت اکستروژن (۵۲/۱۳HV) افزایش یافته است. علت این موضوع افزایش مقاومت به تغییر شکل پلاستیک ماده در اثر ریز دانه شدن است. کیم و همکارانش [۲۱] نیز افزایش سختی آلیاژ AZ31 منیزیم را از ۴۴،۵HV در حالت اولیه به ۶۴،۱HV در پاس چهارم گزارش داده‌اند. بر اساس نتایج بدست آمده، میانگین

گرفته است. به دلیل ساختار HCP منیزیم تعداد صفحات لغزش دارای محدودیت است و تغییر شکلی که در دمای محیط انجام می‌شود، علاوه بر صفحات لغزش اصلی، نیازمند فعال شدن سایر سیستم‌های فرعی لغزش است. صفحات لغزش اصلی در اثر فرایند ECAP به گونه‌ای چرخش می‌کنند که نیروی کمتری برای تسلیم شدن آلیاژ ECAP شده لازم است. در واقع اثر نرم شدن بافت^{۱۲} در مقابل اثر ناشی از افزایش بهبود دانه، غالب می‌شود. به همین دلیل نتایج آزمون کشش در پاس‌های مختلف، کاهش تنش تسلیم را نشان می‌دهد. گزارش کیم^{۱۳} و همکارانش [۲۰] در مورد ECAP آلیاژ AZ61 نشان می‌دهد که فاکتور اشمیت در صفحه اصلی (۰۰۰۱) به دلیل چرخش صفحات اصلی در اثر فرایند ECAP افزایش یافته است، که این موضوع موجب تسلیم آلیاژ در تنش کمتری شده است.

برای بررسی توزیع کرنش، از مقطع عرضی نمونه‌ها از بالای نمونه به سمت پایین آزمون سختی به عمل آمد. شکل (۵) نتایج آزمون سختی در مقطع نمونه‌ها طی چهار پاس را نشان می‌دهد. علی‌رغم تفاوت در مقادیر سختی در نواحی مختلف، نتایج نشان می‌دهد فرایند ECAP در حالت کلی موجب افزایش سختی ماده شده است. میانگین مقادیر سختی پاس‌های ۱ تا ۴

است. در تصویر میکروسکوپی (ب) از شکل اول، ناحیه‌ای از جریان غیر یکنواخت دانه‌ها نشان داده شده است. این در حالی است که با افزایش تعداد پاس‌ها، پراکندگی نتایج آزمون سختی کاهش یافته است که این موضوع به دلیل ایجاد ساختار همگن و یکنواخت در پاس سوم و چهارم است.

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعه تجربی تاثیر فرایند ECAP بر ساختار ماده، نتایج زیر حاصل می‌شود:

(۱) فرایند ECAP در ایجاد ساختار ریز دانه در آلیاژ AM30 بسیار مؤثرست، به گونه‌ای که میانگین اندازه دانه در حالت اکستروژن شده از ۲۰/۴ به ۷/۲ میکرومتر در پاس اول و ۳/۹ میکرومتر در پاس چهارم کاهش یافته است.

(۲) توزیع دانه در پاس اول غیر یکنواخت و دارای ساختار دوگانه به صورت ترکیبی از جریان دانه‌های ریز و درشت است. (۳) افزایش تعداد پاس موجب یکنواختی بیش‌تر ساختار می‌شود.

(۴) نتایج آزمون کشش نشان می‌دهد علیرغم کاهش اندازه دانه، استحکام تسلیم در هر پاس بطور متوالی در حدود ۲۰ مگاپاسکال نسبت به حالت قبلی خود کاهش یافته است. این در حالی است که چکش خواری بطور میانگین در حدود ۵۳٪ زیاد شده است. هم‌چنین استحکام نهایی در پاس‌های ۱، ۲ و ۳ افزایش و در پاس چهارم تغییر چندانی نداشته است.

(۵) نتایج آزمون سختی نشان می‌دهد میزان سختی از ۵۲/۱HV به ۵۹/۳HV در پاس چهارم افزایش یافته است. البته توزیع سختی در مقطع نمونه در پاس‌های اولیه به صورت غیر یکنواخت است که علت آن را می‌توان توزیع غیر یکنواخت کرنش و ایجاد ساختار دوگانه در پاس‌های اولیه دانست.

سختی در مقطع نمونه‌ها در پاس‌های اولیه افزایش قابل توجهی دارد، در حالی که در پاس‌های بعدی مقدار سختی کاهش یافته است. علت این موضوع می‌تواند لغزش مرز دانه‌ها^{۱۴} تحت بار اعمال شده در آزمون سختی باشد که در اثر ساختار ریز دانه در پاس‌های بالاتر ایجاد شده است. هم‌چنین در پژوهش مشابه انجام شده بر روی آلیاژ AM60 منیزیم، علت کاهش سختی در پاس‌های بالاتر، کاهش استحکام نهایی بیان شده است [۹]. لازم به بیان است که کاهش استحکام تسلیم با افزایش سختی مغایرتی ندارد. علت این موضوع، تفاوت در ماهیت آزمون کشش و سختی است، زیرا آزمون سختی به صورت موضعی است، این در حالی است که در آزمون کشش، تمامی آلیاژ بررسی می‌شود و جهت گیری مجموع صفحات لغزش و تغییر بافت ناشی از فرایند مد نظر قرار می‌گیرد. افزایش سختی و کاهش استحکام در سایر آلیاژهای منیزیم تحت فرایند ECAP گزارش شده است [۸ و ۹].

هم‌چنین با توجه به نتایج، میزان پراکندگی مقادیر سختی در پاس‌های اول بیش‌تر از سایر پاس‌هاست، به گونه‌ای که انحراف مقادیر سختی در پاس‌های اول، دوم و چهارم به ترتیب در حدود ± 8 ، ± 5 و ± 4 ویکرز است. علت این موضوع را می‌توان در ساختار ماده و توزیع غیر یکنواخت کرنش یافت. در برخی از پژوهش‌ها [۲۲-۲۴] نشان داده شده است که در فرایند ECAP و یا اکستروژن آلیاژهای منیزیم، جریانی از توزیع غیر یکنواخت کرنش در ماده ایجاد می‌شود که این موضوع باعث ایجاد ساختار دوگانه در ماده می‌شود. این موضوع با افزایش نرخ کرنش در ماده شدیدتر است. بدین معنی که هر چه سرعت انجام فرایند بیش‌تر باشد، یکنواختی ساختار کم‌تر و دوگانگی آن بیش‌تر می‌شود. از آن جایی که در این پژوهش سرعت انجام فرایند زیاد بوده است [۱۰] (سرعت پرس ۵ میلی‌متر بر ثانیه)، توزیع کرنش در سطح نمونه غیر یکنواخت

واژه‌نامه

- | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 1. equal channel angular pressing | 6. Gauge | 11. pole figure |
| 2. Segal | 7. Extensometer | 12. texture softening |
| 3. Kang | 8. low angle grain boundary | 13. Kim |
| 4. etching solution | 9. high angle grain boundary | 14. grain boundary sliding |
| 5. scanning electron microscope | 10. error bars | |

1. Lin, H.K., Huang, J. C., Langdon, T. G., "Relationship between Texture and Low Temperature Superplasticity in an Extruded AZ31 Mg Alloy Processed by ECAP", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 402, pp. 250–257, 2005.
2. Valiev, R.Z., Langdon, T.G., "Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement", *Progress in Materials Science*, Vol. 51, pp. 881–981, 2006.
3. Czerwinski, F., *Magnesium Injection Molding*, Springer, New York, 2008.
4. Friedrich, H.E., Mordike, B.L., *Magnesium Technology*, Springer, Berlin Heidelberg, 2006.
5. Gan, W.M., Zheng, M.Y., Chang, H., Wang, X.J., Qiao, X.G., Wu, K., Schwebke, B., Brokmeier, H.G., "Microstructure and Tensile Property of the Ecaped Pure Magnesium", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 470, pp. 256–262, 2009.
6. Horita, Z., Matsubara, K., Makii, K., Langdon, T.G., "A Two-Step Processing Route for Achieving a Superplastic Forming Capability in Dilute Magnesium Alloys", *Scripta Materialia*, Vol. 47, pp. 255-260, 2002.
7. Yan, K., Sun, Y. S., Bai, J., Xue, F., "Microstructure and Mechanical Properties of ZA62 Mg Alloy by Equalchannel Angular Pressing", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 1149–1153, 2011.
8. Kim, H.K., Kim, W.J., "Microstructural Instability and Strength of an AZ31 Mg Alloy after Severe Plastic Deformation", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 385, pp. 300–308, 2004.
9. Akbaripناه, F., Fereshteh-Saniee, F., Mahmudi, R., Kim, H.K., "Microstructural Homogeneity, Texture, Tensile and Shear Behavior of AM60 Magnesium Alloy Produced by Extrusion and Equal Channel Angular Pressing", *Materials and Design*, Vol. 43, pp. 31–39, 2013.
10. Kang, F., Wang, J.T., Peng, Y., "Deformation and Fracture during Equal Channel Angular Pressing of AZ31 Magnesium Alloy", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 487, pp. 68–73, 2008.
11. Jin, L., Lin, D., Mao, D., Zeng, X., Chen, B., Ding, W., "Microstructure Evolution of AZ31 Mg Alloy during Equal Channel Angular Extrusion", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 423, pp. 247–252, 2006.
12. Figueiredo, R.B., Szaraz, Z., Trojanova, Z., Lukac, P., Langdon, T.G., "Significance of Twinning in the Anisotropic Behavior of a Magnesium Alloy Processed by Equal-Channel Angular Pressing", *Scripta Materialia*, Vol. 63, pp. 504–507, 2010.
13. Hassani, F. Z., Ketabchi, M., Hassani, M.T., "Effect of Twins and Non-Basal Planes Activated by Equal Channel Angular Rolling Process on Properties of AZ31 Magnesium Alloy", *Journal of Materials Science*, Vol. 46, pp. 7689–7695, 2011.
14. ASTM E 112-96, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM International, 2004.
15. ASTM B 557M-06, Standard Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products, ASTM International, 2006.
16. ASTM E 384–99, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, ASTM International, 2002.
17. Hradilova, M., Lejcek, P., "Dynamic Recrystallization during Hot Deformation of Mg-Zn-Ca", *Metals*, Vol. 5, pp. 15-17, 2013.
18. Mathis, K., Gubicza, J., Namc, N.H., "Microstructure and Mechanical Behavior of AZ91 Mg Alloy Processed by Equal Channel Angular Pressing", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 394, pp. 194–199, 2005.
19. Su, C.W., Lu, L., Lai, M.O., "A Model for the Grain Refinement Mechanism in Equal Channel Angular Pressing of Mg Alloy from Microstructural Studies", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 434, pp. 227–236, 2006.
20. Kim, W.J., An, C.W., Kim, Y.S., Hong, S.I., "Mechanical Properties and Microstructures of an AZ61 Mg Alloy Produced by Equal Channel Angular Pressing", *Scripta Materialia*, Vol. 47, pp. 39–44, 2002.
21. Kim, H.K., Lee, Y.I., Chung, C.S., "Fatigue Properties of a Fine-Grained Magnesium Alloy Produced by Equal Channel Angular Pressing", *Scripta Materialia*, Vol. 52, pp. 473–477, 2005.
22. Spigarelli, S., Mehtedi, M.E., Cabibbo, M., Evangelista, E., Kaneko, J., Jager, A., Gartnerova, V., "Analysis of High-Temperature Deformation and Microstructure of an AZ31 Magnesium Alloy", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 462, pp. 197–201, 2007.
23. Yan, K., Sun, Y.S., Bai, J., Xue, F., "Microstructure and Mechanical Properties of Za62 Mg Alloy by Equal-Channel Angular Pressing", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 1149–1153, 2011.
24. Tong, L.B., Zheng, M.Y., Hu, X.S., Wu, K., Xu, S.W., Kamado, S., Kojima, Y., "Influence of ECAP Routes on Microstructure and Mechanical Properties of Mg–Zn–Ca Alloy", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 4250–4256, 2010.