

بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ A356 پس از فرآیند پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار و شبیه‌سازی آن

حمید مهاجرانی^۱، احمد افسری^۲

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران
۲ استادیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، شیراز، ایران، afsari@iaushiraz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۸

چکیده

پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار، یکی از مهم‌ترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید برای ایجاد موادی با دانه‌های فوق‌العاده ریز در فلزات و آلیاژها می‌باشد که کاربرد وسیعی در صنایع هوا فضا دارد. هدف از این تحقیق، مطالعه بهبود و اصلاح ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم (A356) توسط پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار است. برای این منظور، قالبی با زاویه برخورد کانال ۱۲۰ و زاویه انحنای خارجی ۲۰ درجه طراحی و ساخته شد. فرآیند پرسکاری در دمای محیط انجام گردید، علاوه بر این نمونه‌ها پیش از انجام عملیات، آنیل شده و تحت عملیات محلول سازی قرار گرفتند. آزمون‌های سختی، فشار و کشش بعد از انجام فرآیند روی نمونه‌ها انجام شد و ریز ساختار نمونه‌ها قبل و پس از پرسکاری، با میکروسکوپ نوری ارزیابی گردید. خواص مکانیکی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت و سطح مقطع شکست آنها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ارزیابی شد. نتایج حاصل نشان داد که میزان سختی در نمونه آنیل شده با دو مرحله عبور از ۴۸ به ۸۴/۲ ویکرز و میزان استحکام کششی نهایی با یک مرحله عبور از ۵۷ به ۱۷۷ مگاپاسکال افزایش یافت. شبیه سازی فرآیند به روش المان محدود نیز بر روی این آلیاژ به منظور ارزیابی چگونگی تغییرات توزیع تنش و کرنش بر روی نمونه‌ها صورت پذیرفت. مشاهده گردید که بیشترین کرنش در قسمت‌های مرکزی نمونه‌ها رخ داده و نسبت به حالت تئوری دارای ۰/۲۵ درصد خطا می‌باشد. با مقایسه تنش تسلیم حاصل شده نسبت به روش شبیه سازی شده مشاهده گردید که میزان خطا ۳/۷ درصد است.

واژگان کلیدی

پرسکاری، کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار، آلیاژ آلومینیوم (A356)، ریزساختار، سختی، استحکام کششی، شبیه سازی.

۱. مقدمه

آلیاژ A356 به عنوان یکی از مهمترین آلیاژهای Al-Si-Mg مطرح بوده که کاربرد گسترده‌ای در صنایع خودروسازی و هوا فضا مخصوصاً صنایع موشکی دارد. مهمترین مزیت‌های آن را می‌توان به مواردی از قبیل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی مناسب، سیالیت و قابلیت ریخته‌گری عالی، مقاومت به ترک گرم، قابلیت جوشکاری مناسب و همچنین ضریب انبساط حرارتی پایین نسبت داد. آلیاژ A356 به طور معمول دارای ۶/۵ تا ۷/۵ درصد وزنی سیلیسیم و ۰/۲۵ تا ۰/۷ درصد وزنی منیزیم بوده و از طریق فرآیندهای معمول ریخته‌گری تولید می‌شوند و انجماد آهسته این آلیاژ، منجر به تولید ریز ساختار بسیار درشت می‌گردد که در نتیجه آن ساختار یوتکتیکی متشکل از تیغه‌های بزرگ سیلیسیم در یک زمینه پیوسته آلومینیومی مشاهده می‌گردد. آلیاژهای این نوع یوتکتیک به علت طبیعت صفحات سیلیسیم، دانه درشت بوده و دارای انعطاف پذیری و چکش‌خواری پایینی هستند. در این رابطه برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب در آلیاژهای ریخته‌گری Al-Si-Mg معمولاً از اصلاح روشهای ریخته‌گری برای حذف عیوب و تقویت فاز آلومینیوم استفاده می‌شود و برای این منظور با ایجاد ساختمان گلوبولی و روش‌های بهسازی سیلیسیم و یا با به کار گیری روش‌های شکل دهی از جمله پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار جهت ریز نمودن ساختار آن برای حصول به خواص مکانیکی مطلوب استفاده می‌گردد.

در دو دهه اخیر، استفاده از روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک به منظور اصلاح ریزساختار و در نتیجه تولید فلزات و آلیاژهایی با ریز ساختار مناسب و استحکام بالا، به سرعت توسعه یافته است. از میان این روش‌ها می‌توان به پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه دار [۱]، اکستروژن و فشار چرخه‌ای [۲]، پیچش تحت فشار بالا [۲]، فرآیند نورد تجمعی [۳] و فرآیندهای اصطکاکی اغتشاشی [۴-۵] اشاره کرد. در این میان روش ECAP یکی از موضوعات اصلی و اساسی محققین در زمینه تغییر شکل پلاستیکی شدید (SPD) است. نخستین پژوهش در رابطه با این فرآیند در ایران در سال ۲۰۰۷ منتشر شد. از آن زمان، سهم ایران در این زمینه تحقیقاتی به طور مداوم افزایش یافته و سهم اصلی محققان ایرانی در این زمینه بر پایه شبیه‌سازی و مدل‌سازی تمرکز داشته است [۶]. در فرآیند پرسکاری در کانال‌های هم

مقطع زاویه‌دار، قالب دارای دو کانال با سطح مقطع مساوی و به صورت مدور یا چهارگوش بوده که به صورت زاویه‌دار نسبت به هم قرار می‌گیرند. نمونه با سطح مقطعی برابر با سطح مقطع کانال قالب، آماده گردیده و پس از قرار گرفتن در کانال عمودی توسط یک سنبه تحت اعمال بار هیدرولیکی قرار می‌گیرد. اعمال فشار بر روی نمونه سبب سیلان پلاستیکی در ماده شده و نمونه بدون هیچ تغییری در سطح مقطع، از کانال افقی خارج می‌شود. مقدار معادل کرنش اعمالی به نمونه از طریق رابطه (۱) قابل محاسبه است. در این رابطه از تأثیر اصطکاک موجود بین دیواره قالب و قطعه چشم پوشی شده است.

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

در حالی که ϕ و ψ به ترتیب زوایای برخورد کانال‌ها و انحنای خارجی قالب است و N تعداد دفعات عبور ماده از کانال‌های قالب یا به عبارتی تعداد پاس‌های فرآیند می‌باشد [۷]. ریحانیان و مشکسار [۸] با انجام تحقیقی، آلومینیوم خالص را که طی هشت مرحله فرآیند اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار به دست آمده بود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشات آن‌ها نشان داد که پس از مرحله اول، سختی و تنش تسلیم افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده در حالی که از مرحله دوم تا چهارم این مورد با نرخ بسیار کمتری افزایش می‌یابد.

رعنائی و همکاران [۹] عملکرد مس خالص ریز دانه را بعد از اینکه تحت عملیات پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار قرار داده شده را مورد بررسی قرار داده‌اند، نتایج حاصل حاکی از آن است که اندازه ساختار کریستالی به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد به طوری که در مرحله چهارم، ساختار دانه ریز شده و اندازه متوسط آن‌ها در حدود ۳۶۰ نانومتر بوده که درون ماده ایجاد گردیده است و این در حالی است که بعد از عبور هشتم، اندازه آن‌ها در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ نانومتر قرار گرفته است. طبق رابطه هال-پیچ (۲) با کوچک شدن اندازه‌ی دانه‌ها، استحکام ماده افزایش می‌یابد. در این رابطه σ_y تنش تسلیم، σ_0 مقاومت شبکه، d اندازه دانه و k_y ثابتی است که به جنس ماده بستگی دارد (ضریب هال-پیچ). در واقع این رابطه بیانگر آن است که استحکام ماده با عکس مجذور اندازه‌ی دانه آن ارتباط دارد.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (2)$$

ویژگی برجسته فرآیندهای تغییر پلاستیک شدید، ثابت ماندن ابعاد نمونه در حین فرآیند بوده که اعمال کرنش‌های بسیار زیاد بر

است تا اهداف مورد نظر شامل بهبود و اصلاح ریزساختار حاصل گردد و در نهایت منجر به بهبود خواصی از قبیل سختی، کشش و فشار شود.

۲. مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356 بهسازی شده با آمیزان استرانسیم به عنوان ماده اولیه استفاده شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۱ نشان داده شده است. نمونه‌های مورد استفاده به صورت استوانه‌ای شکل و دارای طول ۶۵ و قطر ۱۰ میلی‌متر بوده که با عملیات ماشین‌کاری تهیه شدند (شکل ۳). نمونه‌ها قبل از فرآیند پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار، مطابق با استاندارد ASTM-B917-01 تحت عملیات حرارتی آنیل و محلول‌سازی قرار گرفتند. در این تحقیق، قالب با زاویه برخورد داخلی (ϕ)، ۱۲۰ درجه و زاویه خارجی (ψ)، ۲۰ درجه طراحی و ساخته شد. همچنین کانال‌های ورودی و خروجی با سطح مقطع گرد و قطر ۱۰ میلی‌متر انتخاب گردیدند. شکل ۱ شماتیکی از قالب، سنبه و نمونه را در حین عملیات نشان می‌دهد.

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی آلیاژ آلومینیوم A356

عنصر	درصد وزنی (wt%)
Si	۶/۸۹
Mg	۰/۳۸
Fe	۰/۱۷
Cu	۰/۱۶
Mn	۰/۰۲
Zn	۰/۰۷
Al	Rem

فرآیند پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار توسط یک دستگاه پرس هیدرولیک TORSEE مدل ESG-20 با ظرفیت ۲۰ تن و با سرعت ثابت ۰/۲ میلی‌متر بر ثانیه در دمای اتاق بر روی نمونه‌ها انجام شد. به منظور کاهش تأثیر اصطکاک بین نمونه‌ها و بدنه قالب از تفلون و گریس به عنوان روان‌ساز استفاده شد.

پس از انجام فرآیند ابتدا نمونه‌ها از مقاطع مورد نظر بریده شدند و بعد از عملیات سمباده‌زنی و پولیش کاری مکانیکی، برای بررسی ریزساختار آماده گردیدند. سپس قطعات توسط محلول

ماده را امکان پذیر می‌سازد [۱۱-۱۰]. تحقیقاتی نیز در زمینه تأثیر هندسه و استحکام قالب، انتخاب نمونه، شرایط اصطکاک و دما و دیگر شرایط مرزی بر خواص مواد اکستروود شده به روش پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار (ECAP) و ریخته‌گری شده نیز انجام شده است، هر چند تولیدات حاصل شده با این روش کاربرد گسترده‌ای در توسعه محصولات میکرو دارند، اما این روش‌ها فقط در توسعه خواص مطلوب مانند تکران ابعادی، بافت سطح و خواص الکترومکانیکی محدود می‌شوند. همچنین نتایج نشان داده که اندازه و جهت دانه می‌تواند خواص مکانیکی را بر اساس الزامات و نوع کاربرد تغییر دهد [۱۲]. در تحقیقی [۱۳] تأثیر تغییر شکل پلاستیک شدید توسط فرآیند فورج چندجانبه (MDF) و پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار (ECAP) بر ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌هایی از آلیاژ آلومینیوم آلفا A520 در دمای اتاق و درجه حرارت بالا مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه کارایی ECAP و MDF نشان داد که اثر فرآیند ECAP بر بهبود سازی میکرو ساختار و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی از فرآیند MDF بیشتر است. نتایج یک فرآیند بهبود سازی با فعال نمودن فرآیند ذوب بر اثر فشار ایجاد شده (SIMA) که شامل همگن سازی، پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار و حرارت دهی بعدی تا رسیدن به دمای نیمه جامد است نشان می‌دهد که میکروساختار ایده‌آل که حاوی دانه‌های جامد ظریف و کروی هستند و توسط لایه‌های نازکی از مایع یکنواخت احاطه شده‌اند، از طریق مکانیزم تغییر شکل تبلور مجدد قابل دستیابی است [۱۴].

عمده تحقیقات به عمل آمده تا کنون بر روی آلومینیوم خالص و آلیاژهای آلومینیوم بوده است. با توجه به کاربردهای گسترده آلیاژ A356 در صنایع مختلف و همچنین خواص مکانیکی پایین این ماده که ناشی از فیبرهای بزرگ آلومینیوم در ریزساختار آن است؛ بنابراین به منظور بهبود خواص مکانیکی و گسترش کاربردهای آلیاژ A356، این ماده تحت فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید قرار داده شد و خواص مکانیکی آن مورد ارزیابی قرار گرفت.

هدف از این تحقیق، انجام فرآیند پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار است که حالت تغییر شکل برشی آن تقریباً از نوع برشی ساده بوده و یک روش تغییر شکل پلاستیک شدید محسوب می‌گردد. این فرآیند بر روی آلیاژ آلومینیوم (A356) ریخته‌گری شده انجام گردید که تحت عملیات حرارتی قرار گرفته

حکاکی Keller تحت عملیات حکاکی قرار گرفتند که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی محلول حکاکی Keller

2ml HF(48%), 3ml HCl, 5ml HNO ₃ , 190ml H ₂ O

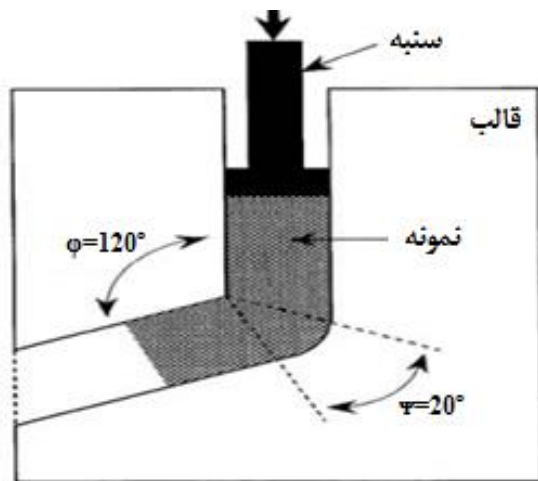
در نهایت ریزساختار نمونه‌ها با میکروسکوپ نوری Motic مدل BHZ MET مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه‌های کششی طبق استاندارد ASTM E8-04 با طول سنجه ۲۴ میلی‌متر، تهیه شدند. آزمون توسط دستگاه کشش SANTAM مدل STM-150 با نرخ کشش ۱ میلی‌متر بر دقیقه بر روی نمونه‌ها صورت گرفت. استحکام‌های گزارش شده، حاصل انجام حداقل دوبار آزمون کشش بر روی نمونه‌ها می‌باشد. سطح شکست نمونه‌ها بعد از آزمون کشش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل S360-Cambridge ارزیابی گردید. آزمون سختی سنجی ویکرز تحت نیروی ۳۰ کیلوگرم و به تعداد سه بار بر روی هر نمونه صورت گرفت و مقادیر میانگین برای آن‌ها گزارش شد.

نمونه‌ها جهت انجام آزمون فشار طبق استاندارد ASTM D695 به طول ۱۵ و قطر ۱۰ میلی‌متر تهیه شدند. سطوح نمونه‌ها با سمباده کاملاً صاف و صیقلی شده و به منظور کم کردن اصطکاک بین فک دستگاه و نمونه‌ها از روغن استفاده گردید. دستگاه پرس هیدرولیک TORSEE مدل ESG-20 برای انجام آزمون فشار به کار گرفته شد و حداکثر میزان کاهش طول نمونه‌ها ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

۱-۲. شبیه‌سازی فرآیند

شبیه‌سازی به روش المان محدود برای آلیاژ پایه A356 توسط نرم افزار ABAQUS انجام گردید. از آنجا که در حین تغییر شکل پلاستیک شدید (به‌خصوص در سرعتهای بالای تغییر شکل)، افزایش دمای آدیاباتیک محتمل است، شبیه‌سازی با استفاده از یک مدل کرنش صفحه‌ای^۱ و آنالیز میدان کوپله جابجایی - دما^۲ انجام گردید. سنبه و ماتریس به صورت صلب پیوسته^۳ و نمونه‌ها به صورت انعطاف پذیر^۴ مدل شده‌اند. برای مدل کردن نمونه‌ها از یک معادله ویسکوپلاستیک با در نظر گرفتن اثر توأم دما و نرخ کرنش استفاده شد. مقدار ضریب اصطکاک، برابر با ۰/۱ و در حین فرآیند ثابت در نظر گرفته شد. مش بندی قطعه با المانهای دو

بعدی مربعی با قابلیت آنالیز میدان کوپله و با استفاده از تعداد ۶۵۰ المان روی هر نمونه انجام شد. قید عدم جابجایی در تمام درجات آزادی بر روی قالب اعمال گردید. در حالیکه سرعت سنبه در جهت موازی کانال قالب معادل ۰/۲ میلی‌متر بر ثانیه انتخاب شد. دیگر پارامترهای مورد نیاز جهت شبیه سازی در جدول ۳ آورده شده است. اشاره می‌گردد که سهم حرارت غیر الاستیک در این جدول، معادل پارامتر تیلور-کویینی یعنی کسری از انرژی تغییر شکل است که صرف افزایش دمای قطعه می‌شود.



شکل ۱. شماتیک قالب، سنبه و نمونه

جدول ۳. پارامترهای آلیاژ A356 در شبیه‌سازی

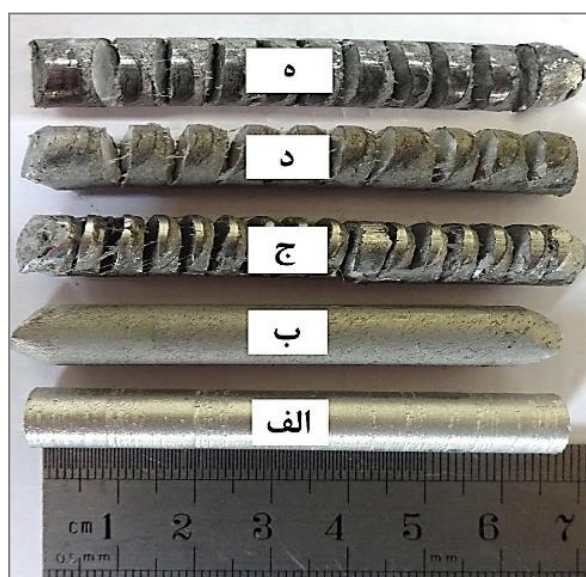
مقدار	پارامتر
2660	چگالی (kg/m ³)
151	هدایت گرمایی (w/m.k)
724e ⁸	مدول یانگ (pa)
0.33	ضریب پواسون
2.14e ⁻⁵	ضریب انبساط
963	گرمای ویژه (j/kg.°c)
0.9	سهم حرارت غیر الاستیک

۳. نتایج و بحث

۱-۳. انجام بررسی‌های ریزساختاری بر روی نمونه‌ها

شکل (۲- الف) تصویر میکروسکوپ نوری از شمش اولیه آلیاژ آلومینیوم A356 را قبل از افزودن عنصر استرانسیم نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ریزساختار شامل تیغه‌های درشت و سوزنی شکل سیلیسیم است. دندریت اولیه ضخیم آلومینیوم - آلفا به وضوح در شکل (۲- ب) قابل مشاهده است.

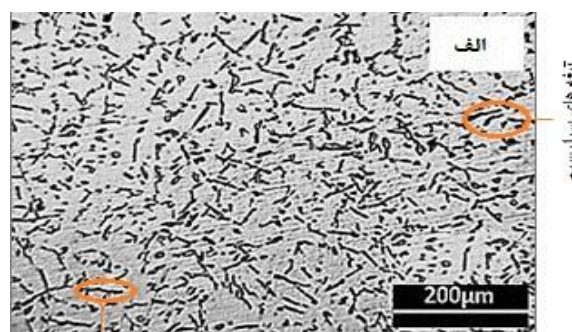
ذرات سیلیسیم که به شکل فیبرهای ضخیم و درشت بودند در امتداد صفحات برشی خرد شده‌اند و توزیع بهتری در زمینه پیدا کرده‌اند. همچنین کرنش‌های برشی که در ابتدای تغییر شکل به وجود آمده بودند به سرعت موجب تقسیم شدن و کاهش اندازه دانه‌های ضخیم آلیاژ اولیه می‌گردند در حالی که ریزساختار حاصل شده نسبتاً همگن‌تر از ریزساختار ارائه شده در شکل (۲- الف) است، توزیع ذرات سیلیسیم در زمینه نیز یکنواخت‌تر شده است. شکست دانه‌ها به اندازه کوچکتر با شکسته شدن نواحی غنی از سیلیسیم و دستیابی به ریزساختار همگن‌تر همراه است. نتایج حاصل با نتایج حاصل از تحقیقات آریاتا و همکاران مطابقت دارد [۱۶]. در این نمونه به دلیل ساختار لایه‌ای شکل یوتکتیکی و ترد بودن آلیاژ در مرحله اول فرآیند، نمونه‌ها دچار شکست شدند (شکل ۳- ج).



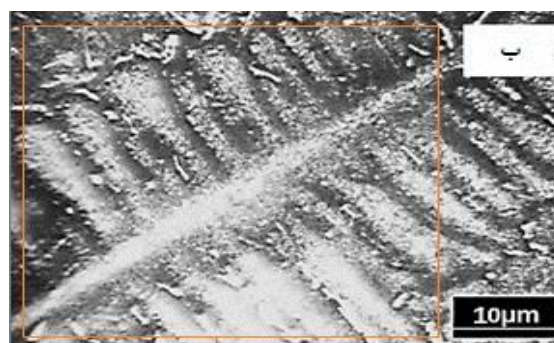
شکل ۳. تصاویر ماکروساختاری آلیاژ A356 الف) نمونه بهسازی شده (ب) نمونه آنیل شده پس از یک مرحله ECAP (ج) نمونه بهسازی شده پس از یک مرحله ECAP (د) نمونه محلول سازی شده پس از یک مرحله ECAP (ه) نمونه آنیل شده پس از دو مرحله ECAP

تصاویر متالوگرافی نمونه اولیه A356 قبل و بعد از یک مرحله ECAP، در شکل‌های ۴- الف و ب مشاهده می‌گردد. در نمونه آنیل شده این آلیاژ (شکل ۴- ج) دانه‌های آلومینیوم اولیه بزرگتر شده و فیبرهای سیلیسیم کروی‌تر گردیده‌اند. در حقیقت با افزایش دما، شرایط برای کاهش انرژی سطحی در اثر کروی شدن ذرات غنی از سیلیسیم فراهم شده است. فرآیند آنیل با توزیع

در شکل (۴- الف) ریزساختار انجمادی هیپویوتکتیک آلیاژ A356 شامل دندریته‌های اولیه و ضخیم آلومینیوم - آلفا با نواحی بزرگ بین دندریته‌ای و یوتکتیک لایه‌ای از فاز آلومینیوم بین فلزی و سیلیسیم (نواحی تیره‌تر)، قابل مشاهده می‌باشد. همچنین در اثر انجماد قطعات پس از فرآیند تولید شمش، ساختار غیر همگن دندریته‌ای مشاهده می‌شود که با توجه به جدایش عناصر و پس زدگی این عناصر در حین انجماد، ناحیه منجمد شده غنی از عناصر آلیاژی بوده و ساختار یوتکتیکی از خود نشان می‌دهد. به دلیل افزودن عنصر بهساز استرانسیم، می‌توان فیبرهای ریز سیلیسیم را به جای صفحات و تیغه‌های درشت سیلیسیم، مشاهده نمود که این موضوع در تحقیقی تحت عنوان تأثیر عملیات جوانه زنی به اثبات رسیده است [۱۵]. پس از انجام یک مرحله فرآیند پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار بر روی آلیاژ A356، (شکل ۴- ب)، این ساختار ناهمگن در هم شکسته و سبب پراکندگی قسمت‌های غنی از عناصر آلیاژی در نواحی زمینه می‌شود که حاصل آن ایجاد یکنواختی بیشتر در توزیع عناصر آلیاژی و ساختار همگن‌تر و ریزتر می‌باشد.



تیغه‌های سیلیسیم



دندریته آلومینیوم - آلفا

شکل ۲. ریز ساختار آلیاژ آلومینیوم A356 با میکروسکوپ نوری الف) قبل از افزودن عنصر بهساز استرانسیم (ب) ساختار دندریته‌ای آلومینیوم - آلفا

مجدد عناصر آلیاژی و برقراری نفوذ در بین ساختار سبب توزیع یکنواخت و همگن در ریز ساختار قطعه می‌شود به نحوی که به طور کامل آثار جدایش از ساختار محو شده و ذرات رسوب غنی از سیلیسیم مشاهده می‌شود.

پس از انجام یک مرحله فرآیند (شکل ۴-د) ذرات سیلیسیم در زمینه کامل خرد شده و ریزساختاری همگن‌تر با ذرات سیلیسیم کروی‌تر حاصل شده است. این موضوع باعث بهبود چکش‌خواری آلیاژ شده است (شکل ۳-ب را ببینید). با اعمال مرحله دوم پرسکاری، ساختاری ریزدانه‌تر ایجاد گردید (شکل ۴-ه)، لیکن همانطور که قبلاً اشاره شد، نمونه آنیل شده در مرحله دوم پرسکاری، با شکست همراه شد (شکل ۳-ه). بهبود چقرمگی ساختار پس از یک مرحله فرآیند بر روی نمونه آنیل شده از دو جنبه قابل بررسی است:

۱- با توجه به شکل (۵-الف) سطح زیر منحنی تنش- کرنش مربوط به نمونه آنیل شده پس از یک پاس پرسکاری، بیش از منحنی مربوط به نمونه‌های آنیل و ریخته‌گری شده است که نشان دهنده چقرمگی بالاتر می‌باشد. به عبارتی با دستیابی به کارسختی شدیدتر در این نمونه، نواحی گلوئی‌های میکروسکوپی که ممکن است در حین تغییر شکل نمونه ایجاد گردند، سریعاً مهار می‌گردد و امکان رشد و شکست نمونه را پیدا نمی‌کند.

۲- همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در اثر یک مرحله فرآیند پرسکاری بر روی نمونه آنیل شده، ساختار درشت و جدایش یافته ریختگی، در هم شکسته شده و فازهای موجود در یکدیگر به نحوی اختلاط یافته که یکنواختی و همگنی در آن مشاهده می‌شود. با در هم شکسته شدن ترکیب بین فلزی که به صورت پیوسته می‌باشد چقرمگی ساختار و به عبارت دیگر مقاومت ساختار در برابر گسترش ترک، بهبود می‌یابد.

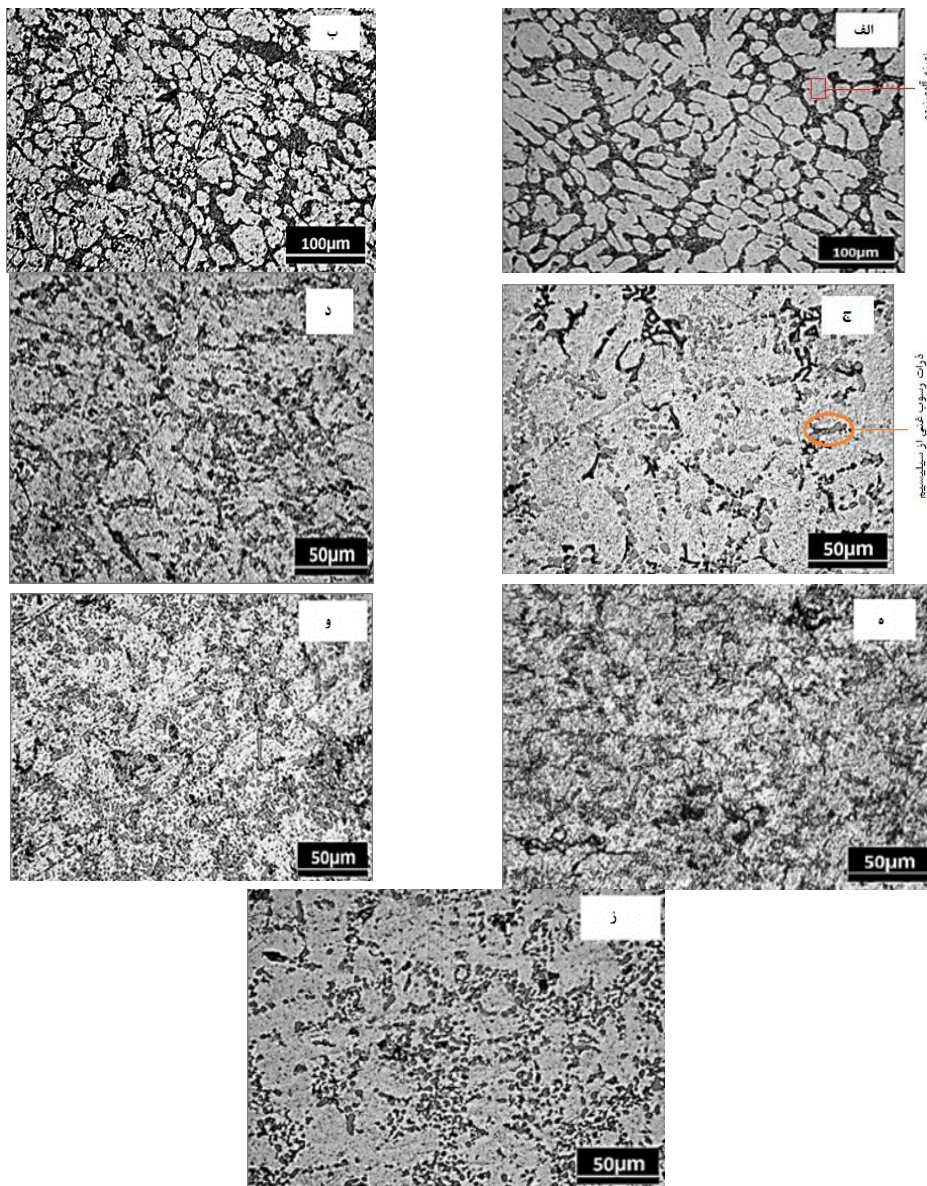
با انجام عملیات محلول‌سازی مطابق شکل (شکل ۴-و) ذرات سیلیسیم کروی می‌گردند. همچنین با انجام یک مرحله فرآیند ECAP مطابق شکل (۴-ز) یوتکتیک کروی تقسیم شده و به ذرات ریز و کاملاً کروی سیلیسیم تبدیل می‌شوند. در این حالت، ماده مانند یک کامپوزیت تقویت شده با ذرات سیلیسیم عمل می‌کند، در این نمونه پس از فرآیند محلول‌سازی و ایجاد پیر سختی طبیعی^۵ به دلیل شکل‌گیری رسوبات در آلیاژ آلومینیوم قابلیت شکل‌پذیری نسبت به حالت پیرسختی نشده کاهش یافته

و علاوه بر این در سطح نمونه در حین فرآیند ترک‌هایی مشاهده می‌گردد (شکل ۳-د را ببینید). نتایج تحقیقات پیشین بر روی آلیاژهای پیرسختی شونده نیز مؤید این مطلب است [۱۷-۱۸].

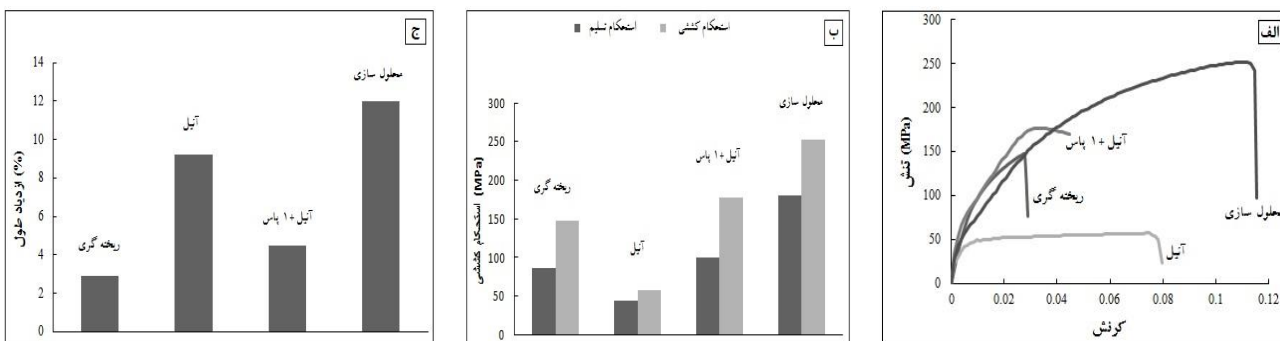
۳-۲. بررسی خواص کششی

نتایج حاصل از آزمون کشش در شکل ۵ نشان داده شده است. به طور کلی در فرآیند پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار، دو عامل کاهش اندازه دانه و افزایش چگالی نابعایی‌ها، به طور همزمان منجر به افزایش استحکام ماده می‌شود. بر اساس رابطه هال-پیچ استحکام مواد می‌تواند تابعی از اندازه دانه آنها باشد. در حین فرآیند پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار، مرزدهانه‌هایی با زاویه بزرگ و اندازه کوچک ایجاد می‌شوند و با توجه به رابطه هال-پیچ باعث بالا رفتن استحکام و افزایش سختی می‌گردند. عامل دوم استحکام بخشی از طریق افزایش چگالی نابعایی‌ها صورت می‌گیرد که این عامل در حین فرآیند به دلیل کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد در ماده ایجاد می‌شود و باعث بالا رفتن استحکام می‌گردد. این موضوع در تحقیقات پیشین نیز به اثبات رسیده است [۱۹-۲۰].

همچنین توزیع مناسب‌تر ذرات سیلیسیم منجر به بهبود استحکام کششی می‌شود (شکل ۵-ب). در انجام یک مرحله فرآیند، ذرات سیلیسیم مانع مهمی در برابر مسیر نابعایی‌ها خواهند بود که باعث بهبود استحکام می‌گردد. بنابراین با انجام یک مرحله فرآیند پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار بر روی نمونه آنیل شده، ذرات رشد یافته سیلیسیم در افزایش استحکام و تنش سیلان ماده مؤثر خواهند بود به طوری که در فرآیندهای تغییر شکل شدید پلاستیک با انجام یک مرحله فرآیند، درصد ازدیاد طول کاهش یافته و استحکام کششی به شدت افزایش پیدا می‌کند. بنابراین چنین روندی را می‌توان به دلیل غالب بودن پدیده کار سختی توضیح داد. باید توجه داشت که در مراحل بعدی فرآیند، پدیده ریز دانه شدن آلیاژ نیز مطرح است که به نوبه خود، منجر به افزایش استحکام ماده می‌گردد. در این میان نمونه محلول‌سازی شده مانند کامپوزیت تقویت شده با ذرات عمل می‌کند که هم استحکام و هم درصد افزایش طول بالایی دارد (شکل ۵-ج).



شکل ۴. ریز ساختار آلایز آلومینیوم A356 با میکروسکوپ نوری الف) قبل از عملیات ECAP (ب) پس از یک مرحله ECAP (ج) آنیل شده (د) آنیل شده پس از یک مرحله ECAP (ه) آنیل شده پس از دو مرحله ECAP (و) محلول سازی شده (ز) محلول سازی شده پس از یک مرحله ECAP

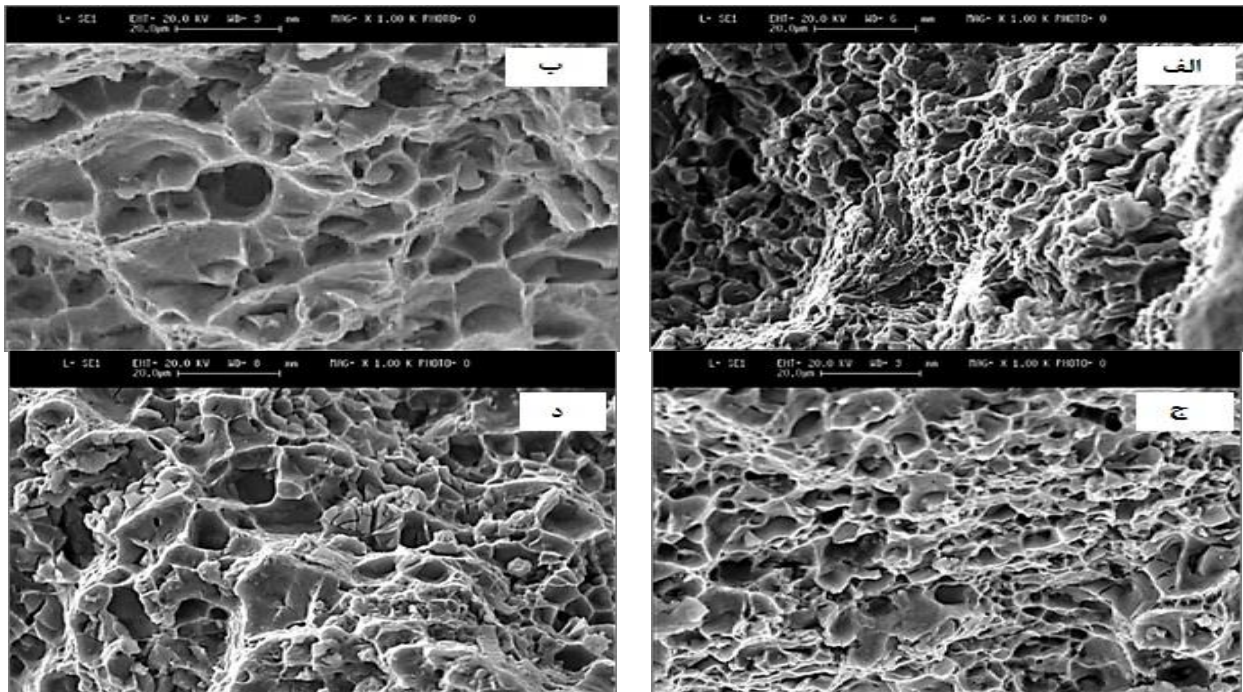


شکل ۵. تغییرات رفتار مکانیکی نمونه‌ها در آزمون کشش الف) منحنی تنش-کرنش (ب) استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی (ج) درصد ازدیاد طول نمونه‌ها

شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح شکست نمونه‌ها را پس از آزمون کشش نشان می‌دهد. با بررسی ریز ساختار نمونه‌ها پس از آزمون کشش و مشاهده دیمپل‌ها در ریز ساختار، مکانیزم غالب شکست، شکست نرم می‌باشد. شکل (۶-الف) سطح شکست آلیاژ بهسازی شده را نشان می‌دهد که به شکل فنجان و مخروط بوده به گونه‌ای که دیمپل‌های ریز و هم محور به طور یکنواخت در زمینه پراکنده شده‌اند. این موضوع را می‌توان به فرآیند بهسازی آلیاژ مرتبط دانست که تاثیر منفی ذرات سیلیسیم یوتکتیک که محل جوانه‌زنی شکست ترد هستند را تا حد زیادی خنثی کرده است. همچنین واضح است که اندازه دیمپل‌ها در این نمونه بزرگتر شده است که این موضوع نیز موید بهسازی صورت گرفته شده می‌باشد. اشاره می‌گردد که معمولا اندازه بزرگتر دیمپل‌ها نشان دهنده نرمی بیشتر در سطح شکست ماده است. وقتی عملیات بهسازی انجام می‌گردد، از میزان فاز یوتکتیک کاسته شده و به ذرات فیبری سیلیسیم اضافه می‌گردد، در نتیجه شکست از درون فاز یوتکتیک به دندریتها منتقل

می‌شود. بنابراین شکست، ماهیت نرم تری نسبت به آلیاژ بهسازی نشده نشان داد.

با توجه به شکل (۶-ب) در آلیاژ آنیل شده، دیمپل‌ها بزرگ‌تر شده و سطح شکست نسبت به آلیاژ پایه نرم‌تر خواهد بود. در این شکل سطوح و مناطق صاف کم‌تر مشاهده می‌شود در حالی که دیمپل‌های زیادی وجود دارند. با توجه به شکل (۶-ج) در آلیاژ آنیل شده که تحت یک مرحله فرآیند قرار گرفته است، دیمپل‌ها نسبت به آلیاژ آنیل شده ریزتر می‌باشد. این موضوع نشان دهنده افزایش استحکام در این حالت نسبت به حالت آنیل شده است، در همین رابطه دیمپل‌ها و مناطق پله‌ای کم شده و سطوح و مناطق صاف افزایش یافته است، علت آن هم تغییر شکل شدید پلاستیک می‌باشد که در حین فرآیند به نمونه اعمال شده و موجب افزایش استحکام و کاهش درصد ازدیاد طول نمونه گردیده است. مطابق شکل (۶-د) با توجه به عملیات محلول سازی، حفرات ریز و درشت مشاهده می‌گردد که افزایش همزمان استحکام و درصد افزایش طول را به خوبی توجیه می‌کند.



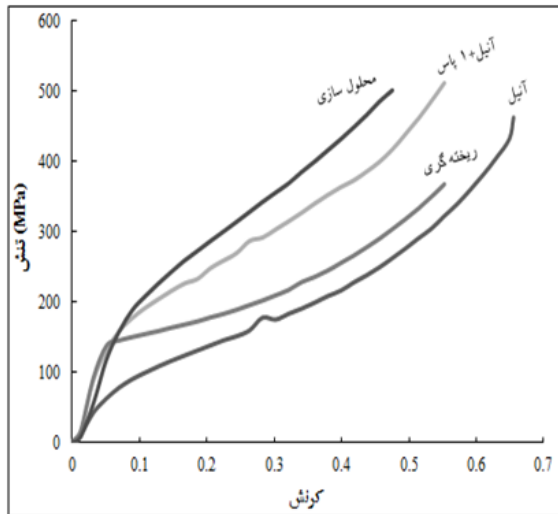
شکل ۶. سطح شکست آلیاژ آلومینیوم A356 با میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی 1000X (الف) بهسازی شده (ب) آنیل شده (ج) آنیل شده و تحت یک مرحله ECAP (د) محلول سازی شده

۳-۳. بررسی سختی

شکل ۷ نتایج سختی ویکرز بر روی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با انجام فرآیند پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار و افزایش

مقدار کرنش اعمال شده در هر مرحله، مقدار متوسط سختی نیز افزایش پیدا می‌کند. با انجام عملیات حرارتی آنیل بر روی آلیاژ، میزان سختی نیز کاهش پیدا می‌کند. همچنین در عملیات حرارتی

پیش از انجام فرآیند پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار، تنش تسلیم فشاری نمونه آنیل شده حدود ۵۰ مگاپاسکال بوده است در حالی که با انجام فرآیند، میزان تنش تسلیم فشاری افزایش یافته و به حدود ۱۴۰ مگاپاسکال رسیده است. از سوی دیگر با افزایش استحکام ماده پس از فرآیند، قابلیت کارسختی آن به شدت کاهش می‌یابد.



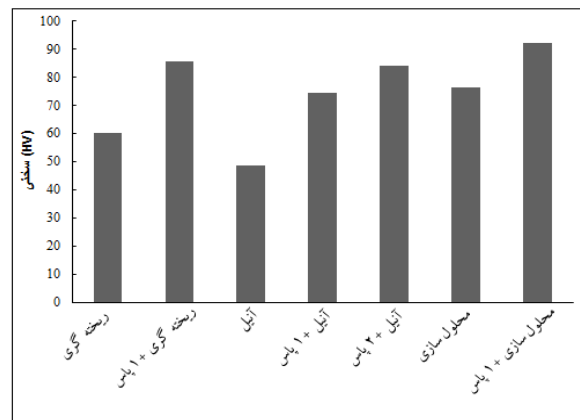
شکل ۸. منحنی تنش- کرنش فشاری

۳-۵. نتایج شبیه‌سازی

شکل ۹ نتایج حاصل از شبیه‌سازی آلیاژ A356 در فرآیند پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۹-الف) مشاهده می‌شود که توزیع کرنش به صورت تقریباً غیر یکنواخت است. مناطق پایینی نمونه که با سطح اصطکاکی بزرگتری در تماس هستند، در حین تغییر شکل، تشکیل منطقه فلز مرده داده و سیلان کمتری نسبت به مناطق بالایی تجربه می‌کنند. از طرفی، بیشترین مقدار کرنش پلاستیک در قسمت‌های مرکزی نمونه مشاهده می‌گردد که بیشترین آزادی سیلان را داشته‌اند. با توجه به رابطه (۱)، میزان کرنش اعمالی به نمونه در هر مرحله عبور در حالت تئوری برابر با 0.6344 بوده در حالی که در حالت شبیه‌سازی مقدار متوسط 0.6328 به دست آمده است که در مقایسه با یکدیگر دارای 0.25 درصد خطا می‌باشد و بیانگر دقت قابل قبول نتایج شبیه‌سازی است. شکل (۹-ب) توزیع تنش فون میز حاصل از شبیه‌سازی فرآیند را نشان می‌دهد که بیانگر بیشترین تنش در محل برخورد دو کانال و مرکز نمونه است و علت آن را می‌توان وجود تماس و اصطکاک

محلول سازی ذرات سیلیسیم کروی می‌شوند، اما به دلیل بروز پدیده پیرسختی طبیعی، میزان سختی نسبت به آلیاژ ریخته‌گری شده اولیه افزایش پیدا می‌کند. پس از انجام عملیات پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار بر روی نمونه‌ها، به دلیل خرد شدن بیشتر ذرات سیلیسیم، میزان سختی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است و بدیهی است که در این فرآیند دو عامل کاهش اندازه دانه و افزایش چگالی نابجایی‌ها به طور همزمان منجر به افزایش سختی ماده می‌شوند. مطابق رابطه هال-پیچ استحکام و سختی مواد تابعی از اندازه دانه آنها می‌باشد.

بنابراین هرگونه تغییر در اندازه ساختار کریستالی ماده، سبب تغییرات قابل توجهی در استحکام و سختی آن می‌شود. به طور کلی در حین فرآیند پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار مرزناهایی با زاویه بزرگ و اندازه کوچک ایجاد می‌شود که با توجه به رابطه هال-پیچ باعث استحکام بخشی و افزایش سختی می‌شوند. عامل دوم استحکام بخشی از طریق افزایش چگالی نابجایی‌ها است که در حین فرآیند به دلیل کرنش‌های پلاستیکی بسیار زیاد در ماده ایجاد می‌گردد و باعث استحکام بخشی می‌شود به گونه‌ای که نتایج حاصل از تحقیقات پیشین نیز این موضوع را تایید می‌کند [۲۰-۱۹]. در کرنش‌های زیاد، این چگالی بالای نابجایی‌ها، تبدیل مرزهای فرعی به مرزهای اصلی را به دنبال دارد که از مکانیزم‌های عمده استحکام بخشی است.



شکل ۷. نمودار نتایج آزمون سختی سنجی ویکرز

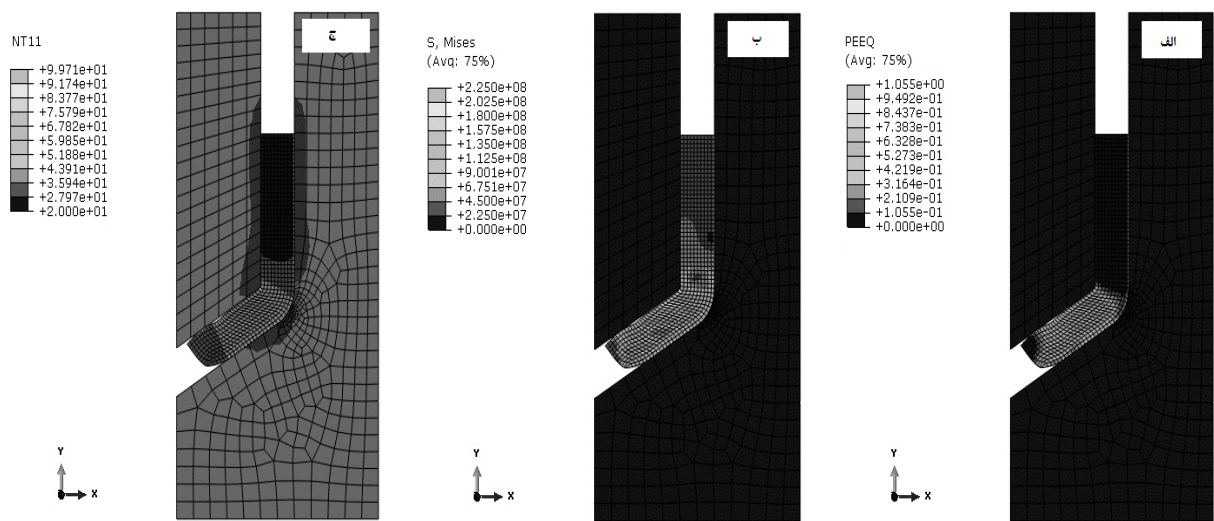
۳-۴. بررسی نتایج آزمون فشار

شکل ۸ منحنی تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمون فشار تک محوری را بر روی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که

بین نمونه و دیواره قالب و همچنین جلوگیری از تغییر شکل آزادانه قسمت‌های مجاور بیان کرد.

مقدار تنش تسلیم به دست آمده حاصل از آزمون فشار بر روی نمونه ریخته‌گری شده برابر با ۱۳۰ مگاپاسکال است. این مقدار در مقایسه با تنشی که در شبیه‌سازی برای مناطق دارای کمترین کرنش به دست آمد، یعنی مقدار ۱۳۵ مگاپاسکال، تنها خطایی معادل ۳/۷ درصد نشان می‌دهد که کاملاً قابل قبول است. همچنین مقادیر تنش فون میز در کرنش‌های بزرگتر نیز هم محدوده‌ی مقادیر تنش در نمودار تنش-کرنش ماده هستند و

اعدادی منطقی را نشان می‌دهند. بعلاوه، لازم است اشاره گردد از آنجا که نرم شدن حرارتی نیز برای ماده در نظر گرفته شده است و با توجه به مقادیر به دست آمده برای دمای قطعه در حین تغییر شکل پلاستیک (شکل ۹-ج)، مقداری کاهش تنش سیلان نسبت به مقادیر آزمون فشار که در دمای اتاق انجام شده‌اند، منطقی است. اشاره می‌گردد که نظر به هدایت حرارتی بالاتر آلومینیوم نسبت به فولاد، افزایش دمای ایجاد شده در مناطقی از قالب که با نمونه در تماس هستند، نیز منطقی است.



شکل ۹. نتایج حاصل از شبیه‌سازی آلیاژ آلومینیوم A356 در فرآیند ECAP (الف) توزیع کرنش پلاستیک (ب) توزیع تنش فون میز (ج) توزیع دما

۴. نتیجه‌گیری

خواص مکانیکی و رفتار شکست آلیاژهای آلومینیوم A356 وابستگی شدیدی به ریز ساختار آنها داشته و توسط رسوبات Mg-Si و پراکندگی تیغه‌های سیلیسیم یوتکتیک کنترل می‌شوند. اصولاً در آلیاژهای Al-Si اندازه و توزیع تیغه‌های سیلیسیم در فاز یوتکتیک مربوطه بسیار حائز اهمیت است. در واقع تردی تیغه‌های Si عامل اصلی خواص مکانیکی ضعیف در این دسته از آلیاژها است. در همین رابطه بهبود و اصلاح ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم A356 با فرآیند پرسکاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار در دمای محیط مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

- با افزایش تعداد مراحل فرآیند پرسکاری به دلیل افزایش تمرکز تنش، توزیع یکنواخت‌تر ذرات سیلیسیم همراه با

- ریزتر و کروی شدن ذرات در زمینه آلومینیوم مشاهده می‌گردد.
- دو عامل کاهش اندازه دانه و افزایش چگالی نابجایی‌ها در حین فرآیند پرسکاری، منجر به ریزتر شدن و بهبود توزیع ذرات سیلیسیم در ساختار شده و موجب افزایش سختی ماده می‌شود. به طوری که میزان سختی در نمونه آئیل شده با دو مرحله عبور و اکستروژن شدن، از ۴۸ به ۸۴/۲ ویکرز افزایش می‌یابد.
- با انجام یک مرحله فرآیند اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار بر روی نمونه آئیل شده، میزان استحکام تسلیم و استحکام کششی نسبت به نمونه آئیل شده افزایش پیدا می‌کند به گونه‌ای که میزان استحکام کششی نهایی با یک مرحله عبور از قالب، از ۵۷ به ۱۷۷ مگاپاسکال افزایش یافته است.

مگاپاسکال بعد از یک مرحله عبور از قالب افزایش یافته است.

- نتایج شبیه سازی المان محدود بر روی آلیاژ نشان داد که بیشترین کرنش در قسمت های مرکزی نمونه ها ایجاد شده و نسبت به حالت تئوری دارای خطای ناچیز ۰/۲۵ درصد می باشد. علاوه بر این با مقایسه تنش سیلان حاصل شده نسبت به روش شبیه سازی، مشاهده گردید که میزان خطا ۳/۷ درصد است.

- درصد ازدیاد طول، به دلیل افزایش موانع بر سر راه حرکت نابجایی ها، کاهش پیدا می کند. در همین رابطه میزان درصد ازدیاد طول از ۹/۲ درصد در نمونه آنیل شده به ۴/۵ درصد بعد از یک مرحله عبور نمونه از قالب کاهش پیدا کرده است.
- با انجام فرآیند اکستروژن در کانال های هم مقطع زاویه دار میزان استحکام فشاری افزایش یافته است به طوری که از ۵۰ مگاپاسکال در نمونه آنیل شده به ۱۴۰

۵. مآخذ

- [1] S. Ashouri., M. Nili, Ahmadabadi., M. Moradi., M. Iranpour., "Semi-solid microstructure evolution during reheating of aluminum A356 alloy deformed severely by ECAP", Journal of Alloys and Compounds, Vol.466, pp. 67-72, 2008.
- [2] R.Z. Valiev., Y. Estrin., Z. Horita., T.G. Langdon., M.J. Zehetbauer., "Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation", Nanostructured Materials. pp.33-39, 2006.
- [3] R. Jamaati., S. Amirkhanlou., M. R. Toroghinejad., B. Nirouman., "Significant improvement of semi-solid microstructure and mechanical properties of A356 alloy by ARB process", Materials science and Engineering A, Vol.528, pp. 2495-2501, 2011.
- [4] Z.Y. Ma., S.R. Sharma., R.S. Mishra., "Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum", Materials Science and Engineering A, Vol.433, pp. 269-278, 2006.
- [5] K. Natori., H. Utsunomiya., T. Tanaka., "Improvement in formability of semi-solid cast hypoeutectic Al-Si alloys by equal-channel angular pressing", Materials Processing Technology, Vol.240, pp. 240-248, 2017.
- [6] E. Bagherpour., M. Reihanian., N. Pardis., R. Ebrahimi., & T.G. Langdon., "Ten years of severe plastic deformation (SPD) in Iran, part I: equal channel angular pressing (ECAP)", Iranian Journal of Materials Forming, Vol.5(1), pp.71-113, 2018
- [7] M.A. Ranaei., A. Afsari., S.Y. Ahmadi Brooghani., M.M. Moshksar., "Microstructure, Mechanical and Electrical Properties of Commercially Pure Copper Deformed Severely by Equal Channel Angular Pressing", Modares Mechanical Engineering. Vol. 14, No. 15, pp. 257-266, 2014. (in Persian)
- [8] M. Reihanian., R. Ebrahimi., N. Tsuji., M.M. Moshksar., "Analysis of the mechanical properties and deformation behavior of nanostructured commercially pure Al processed by equal channel angular pressing (ECAP)", Materials Science and Engineering. Vol.473, pp. 189-194, 2008.
- [9] M.A. Ranaei., A. Afsari., S.Y. Ahmadi Brooghani., M.M. Moshksar., "Investigation on performance of ultrafine grained pure copper as electrode during electrical discharge machining", Modares Mechanical Engineering. Vol. 14, No. 1, pp. 97-105, 2013. (in Persian)
- [10] N. Haghdadi., A. Zarei-Hanzaki., H.R. Abedi., D. Abou-Ras., M. Kawasaki., A.P. Zhilyaev., "Evolution of microstructure and mechanical properties in a hypoeutectic Al-Si-Mg alloy processed by accumulative back extrusion", Materials Science and Engineering. Vol.651, pp. 269-279, 2016
- [11] R.Z. Valiev., T.G. Langdon., "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement", Progress in Materials Science, Vol. 51, pp. 881-981, 2006.
- [12] P. Kumar., & S. S. Panda., "A review on properties and microstructure of micro-extruded product using SPD and as-cast material", Sādhanā, Vol. 43(5), pp. 77, 2018
- [13] M.H. Shaeri., A. Razaghian-Arani., R. Ahmadi., "Effect of Severe Plastic Deformation on Mechanical Properties and Microstructure of A520 Al-Alloy Produced by Semisolid and Ordinary Casting", in Persian, Founding Research Journal, Vol. 1(1), pp. 9-21, 2017.
- [14] J. L. Fu., H. J. Jiang., & K. K. Wang., "Influence of Processing Parameters on Microstructural Evolution and Tensile Properties for 7075 Al Alloy Prepared by an ECAP-Based SIMA Process", Acta Metallurgica Sinica (English Letters), Vol. 31(4), pp. 337-350, 2018
- [15] M. Amneelahi., S. Shabestary., "Effect of grain growth operation, improvement and heat treatment on structure and strength to impact of Al-A356 alloy", 6th congress of Iranian Metallurgical and Iranian foundry Society., 1391 (in Persian)
- [16] I.G. Urrutia., M.A. Morris., D.G. Morris., "Contribution of microstructural parameters to strengthening in an ultrafine-

- grained Al-7%Si alloy processed by severe deformation”, *Materials Science and Engineering*. Vol.55.No.4, pp. 1319-1330, 2007.
- [17] N.Q. Chinh., J.Gubicza., T. Czepecc., J. Lendvai., C. Xu., R.Z. Valiev., T.G. Langdon., “Developing the strategy for the processing of age-hardenable alloys by ECAP at room temperatures”, *Materials Science and Engineering, A* 516 . pp. 248–252, 2009.
- [18] M.R. Roshan., S.A. Jenabali Jahromi., R. Ebrahimi., “Predicting the critical pre-aging time in ECAP processing of age-hardenable aluminum alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*. Vol.509 , pp. 7833-7839, 2011.
- [19] M. Reihanian., R. Ebrahimi., N. Tsuji., M.M. Moshksar., “Analysis of the mechanical properties and deformation behavior of nanostructured commercially pure Al processed by equal channel angular pressing (ECAP) ”, *Materials Science and Engineering*. Vol. 473, pp. 189-194, 2008.
- [20] B. Tolaminejad., K. Dehghani., “Microstructural characterization and mechanical properties of nanostructured AA1070 aluminum after equal channel angular extrusion”, *Materials and Design*, Vol. 34, No. 1, pp.285–292, 2012.

پی‌نوشت

-
- 1 . Plain strain
 - 2 . Coupled temperature displacement
 - 3 . Analytical rigid
 - 4 . Deformable
 - 5 . Natural age hardening