

بررسی تجربی و تحلیلی خواص مکانیکی آلیاژ ای. ۱۶۰۶۱ ریزساختار حاصل از فرایند اکستروژن در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار

محمد زارعی*	خلیل خلیلی	مهدی سلمانی تهرانی	یاشار بیات اصل
دانشجوی کارشناسی ارشد ساخت و تولید	دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک	استادیار دانشکده مهندسی مکانیک	مربی آموزش دانشکده مکانیک
دانشگاه بیرجند	دانشگاه بیرجند	دانشگاه صنعتی اصفهان	مؤسسه آموزش عالی غیرانتفاعی
		غیردولتی نجف‌آباد	
en.mohamadzare@gmail.com	khkhalili@yahoo.com	tehrani@cc.iut.ac.ir	en_ybyayat@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۱۴

چکیده

در فرایندهای تغییر فرم پلاستیکی شدید^۱ کرنش‌های شدیدی به نمونه اعمال می‌شود که موجب ریزدانه‌گی و تغییر خواص مکانیکی مواد می‌گردد. از جمله معروف‌ترین این روش‌ها، اکستروژن در کانال‌های مقطع زاویه‌دار^۲ یا به اختصار ECAP است. در این مقاله فرایند ECAP بر روی نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به منظور دستیابی به ساختار ریزدانه در دو مسیر A و Bc تا ۱۰ مرحله انجام و خواص مکانیکی آن بررسی شده است. در این رهگذر، مشاهده شد استحکام کششی، سختی و قابلیت ماشینکاری نمونه‌ها نسبت به نمونه اولیه در هر دو مسیر افزایش یافته است. نمودار استحکام کششی نمونه‌ها در هر دو مسیر با هم مقایسه و بهترین مسیر و مرحله فرایند مشخص گردید. همچنین مشاهده شد که مسیر A نسبت به مسیر Bc ارجحیت دارد. بهترین نمونه‌ها از میان نمونه‌های آزمایش‌شده، نمونه‌های ۳ و ۴ مرحله عبور در مسیر A می‌باشند. این انتخاب با توجه به ساختار نمونه، میزان انرژی مصرفی جهت تهیه آن و بالاترین استحکام کششی نهایی بوده است. همچنین این فرایند با نرم‌افزار آباکوس نسخه ۳۶/۱۱ شبیه‌سازی و میزان توزیع کرنش در نمونه‌ها و نیروهای وارده بر آنها بررسی شد. برخلاف نیروی وارده، میزان کرنش‌های اعمالی به نمونه‌ها در مسیر Bc بیشتر بود.

واژگان کلیدی: اکستروژن در کانال‌های مقطع زاویه‌دار، ECAP، خواص مکانیکی، آلیاژ ای. ۱۶۰۶۱، مواد ریزساختار

۱. مقدمه

اکستروژن در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار یکی از روش‌های تغییر فرم پلاستیکی شدید است. این فرایند یک

روش مؤثر جهت تولید مواد با دانه‌های بسیار ریز در حد چند صد نانومتر می‌باشد [۱]. تغییر ایجادشده درون ماده



طی این فرایند از نوع برش ساده می‌باشد. این امر به وسیله فشرده شدن نمونه درون کانال‌های قالب صورت می‌گیرد. روی هم رفته قالب ECAP دارای دو کانال با سطح مقطع یکسان است. این دو کانال با زاویه برخورد ϕ به هم متصل شده‌اند و ممکن است در گوشه خارجی تقاطع دو کانال نیز انحنایی با زاویه ψ وجود داشته باشد [۲]. در شکل ۱ نمایی شماتیک از این روش نمایش داده شده است.



شکل ۱. نمایی شماتیک از قالب ECAP

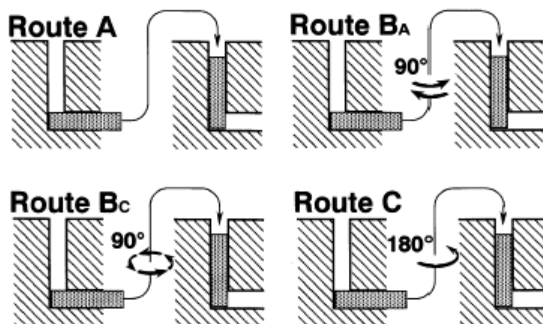
هنگام عبور نمونه از تقاطع دو کانال تغییر شکل برشی در آن رخ می‌دهد. به واسطه تغییر شکل ایجاد شده، کرنشی در نمونه ایجاد می‌شود که مقدار کرنش معادل ایجاد شده در هر عبور از قالب در فرایند ECAP مقداری است که می‌توان آن را براساس رابطه‌ای که ایواهاشی^۴ و همکاران به دست آوردند محاسبه نمود [۳].

$$\varepsilon_{eq} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(2 \cot \left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) + \psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) \right)$$

با ثابت بودن سطح مقطع نمونه در هر مرحله، کرنش‌ها در ماده ذخیره می‌شود. این امر سبب کوچک شدن شبکه دانه‌بندی و تغییر ساختار نمونه می‌گردد [۴]. فرایند ECAP افزون بر قابلیت تکرارپذیری باعث ایجاد مسیرهای کرنشی گوناگون از راه فعال شدن سامانه‌های لغزشی متفاوت نیز می‌گردد. این عمل با چرخش نمونه به روش‌های گوناگون بین مراحل فرایند صورت می‌گیرد. روی هم رفته، فرایند

ECAP براساس چرخش نمونه پس از هر مرحله به چهار مسیر A، B_A، B_C و C انجام می‌شود. مسیر A مسیری است که نمونه بدون هیچ‌گونه چرخشی مجدداً در قالب قرار می‌گیرد. در مسیر نمونه ۹۰ درجه به‌طور متناوب حول محور عمود بر سطح نمونه چرخانده می‌شود. در مسیر B_C نمونه ۹۰ درجه حول محور عمود بر سطح آن در یک جهت چرخش داده می‌شود. در مسیر C نمونه ۱۸۰ درجه بین دو عملیات چرخش داده می‌شود. این مسیرها در شکل ۲ قابل مشاهده است. این روش‌ها باعث فعال شدن سامانه‌های لغزشی گوناگون شده و در نتیجه ریزساختارهای متفاوتی در ماده ایجاد می‌شود [۵، ۶ و ۱۴].

در مسیر A برش ایجاد شده در عبورهای مختلف غیرقابل برگشت می‌باشد. در مسیر B_C برش در دو صفحه مجزا فعال و در عبورهای اول و دوم به ترتیب توسط عبورهای سوم و چهارم خنثی می‌گردد [۶].



شکل ۲. مسیرهای مختلف فرایند ECAP

خواص مکانیکی نمونه مورد بررسی پس از اعمال فرایند ECAP به عوامل گوناگونی چون مقدار کرنش اعمال شده طی عملیات، ساختار نمونه، میزان چگالی نابجایی‌ها و تغییرات ریزساختاری بستگی دارد. در این مقاله، جهت بررسی میزان تأثیر استفاده از ECAP در بهبود استحکام تسلیم نمونه‌های ای. ۱۶۰۶۱ خواص حاصل از فرایند بر روی نمونه‌های یک، دو، سه، چهار، شش، هشت و ده مرتبه عبور در هر دو مسیر A و B_C مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد با اعمال این فرایند، استحکام کششی

نمونه‌ها در هر دو مسیر نسبت به نمونه خام افزایش می‌یابد. اگرچه نرخ افزایش آن در بعضی موارد با کاهش و تغییراتی روبرو بوده است. مقدار افزایش استحکام کششی با توجه به شرایط هر مسیر و نحوه تنش برشی که روی نمونه‌ها اعمال می‌کند با مسیر دیگر متفاوت است.

۲. جزئیات آزمایش‌ها

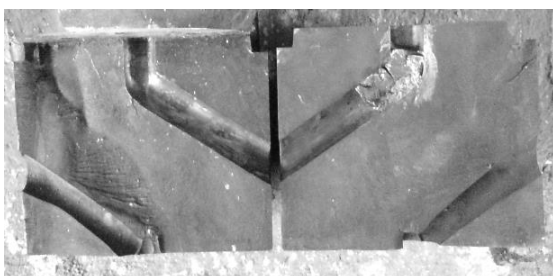
آلیاژ ای. ۱۶۰۶۱ به‌عنوان ماده مورد آزمایش در این مقاله انتخاب گردید. علت انتخاب این آلیاژ قابلیت کارپذیری سرد مناسب و استفاده زیاد آن در صنایع است. این آلیاژ به‌علت خواص مکانیکی مناسب و چگالی پایین از جمله پرکاربردترین آلیاژهای آلومینیوم می‌باشد. جدول ۱ آنالیز عنصری آلیاژ به‌کارگرفته را نشان می‌دهد.

جدول ۱. ترکیب و درصد عناصر به کار رفته در آلیاژ ای. ۱۶۰۶۱

ترکیبات	Al	Si	Mg	Fe	Mn	Zn
Al6061 (wt%)	97.7	0.48	0.762	0.5	0.08	0.086

نمونه‌های اولیه برای ورود به‌درون قالب مفتول‌هایی گرد به قطر ۲۰ میلی‌متر و به طول ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشند. برای آنیل‌نمودن و یکنواختی ساختار، تمامی نمونه‌ها به‌مدت ۲۰ ساعت در دمای ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد در کوره قرار گرفته و در اتمسفر محیط آنیل شدند. جهت محافظت نمونه‌ها از اکسیداسیون در کوره، از کربن فعال استفاده شد. جهت انجام فرایند، نمونه‌های میله‌ای با مقطع دایره با سطح صاف و آغشته به روانساز، در کانال ورودی قرار می‌گیرد. سپس نمونه‌ها به‌وسیله یک سنبه و با استفاده از یک ماشین پرس تحت فشار قرار می‌گیرد تا تغییر شکل داده و از طریق کانال خروجی خارج گردد. همان‌گونه که در شکل ۱ دیده می‌شود، در حالت کلی زاویه برخورد کانال‌ها با ϕ و زاویه انحنای خارجی کانال‌ها (زاویه کمان قالب) با ψ نشان داده می‌شود. در این مقاله از قالبی با زاویه‌های $\phi = 120$ و $\psi = 20$ درجه و قطر کانال ۲۰ میلی‌متر

استفاده شد. مزیت استفاده از این زوایا با توجه به میزان کرنش اعمالی در هر مرحله به نمونه، آن است که سبب می‌شود افزایش در تعداد مراحل عبور امکان‌پذیر باشد و بتوان قطعه را به دفعات بیشتر تحت اثر کرنش پلاستیکی شدید ناشی از فرایند قرار داد. همچنین انجام فرایند با دستگاه پرسی با تناژ کمتر انجام شود [۶]. طبق رابطه اخیر کرنشی به اندازه 0.63% در هر مرحله در نمونه ایجاد می‌شود. شکل ۳ دو کفه قالب استفاده‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳. دو کفه قالب استفاده‌شده

فرایند ECAP در دمای محیط و با استفاده از روغن SAE11 به عنوان روانکار سطح قالب انجام شد. سرعت حرکت سنبه در تمام مدت فرایند ۱ میلی‌متر بر ثانیه ثابت بود. نمونه‌های نشان داده شده در شکل ۴ به‌ترتیب از بالا، نمونه اولیه می‌باشد و در مجاورت آن نمونه‌های دیگری تحت اثر فرایند در مسیر A دیده می‌شود. شکل ظاهری این نمونه‌ها، با نمونه‌هایی که از مسیر BC به‌دست می‌آیند مشابه است، اما از لحاظ ریزساختاری با هم تفاوت دارند. به‌خوبی اثر عبورهای متعدد روی قطعات دیده می‌شود. به‌طوری‌که قطعات عبور داده شده در مرحله‌های بالاتر دارای سطحی کدرتر و زبرتر می‌باشند.

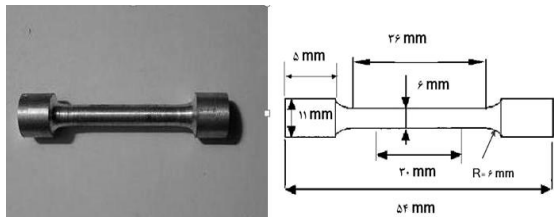
۳. بررسی استحکام کششی نمونه‌ها و مقایسه

آنها در هر دو مسیر A و Bc

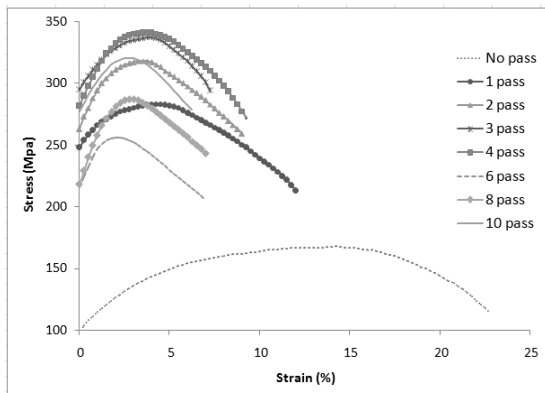
در این مقاله نمونه‌های ای. ۱۶۰۶۱ در دو مسیر A و Bc تحت اثر تغییر شکل پلاستیکی شدید قرار گرفتند. هرکدام از این دو مسیر ویژگی‌های خاصی را به نمونه می‌بخشند. به‌عبارتی ریزساختار نمونه در هر مسیر دستخوش تغییراتی



استحکام کششی نمونه تحت اثر عبور از مرحله اول بسیار افزایش یافته و مقدار استحکام نهایی آن از ۱۶۸ مگاپاسکال به مقدار ۲۸۳ مگاپاسکال رسیده است که مقدار قابل توجهی است. این روند افزایشی در نمونه‌های مراحل دوم و سوم فرایند نیز دیده می‌شود به گونه‌ای که استحکام کششی آنها به ترتیب برابر ۳۱۸ و ۳۳۷ مگاپاسکال می‌باشد.



شکل ۵. نمونه کششی ساخته شده جهت تست کشش



شکل ۶. نمودار استحکام کششی نمونه‌های مراحل اول الی دهم فرایند

این تغییرات مقدار استحکام نهایی به خوبی بیانگر آثار فرایند ECAP بر استحکام کششی ماده می‌باشد. از جمله این آثار تغییر شکل پلاستیکی شدید می‌باشد که با اعمال کرنش‌های زیاد باعث ریزساختار شدن نمونه مورد آزمایش می‌گردد. اندازه دانه‌ها در این حالت در ابعاد کمتر از یک میکرون می‌باشد [۷-۹]. همچنین اعمال این فرایند روی نمونه‌ها باعث می‌شود که دانسیته نابجایی‌ها در اثر اعمال تغییر شکل پلاستیکی شدید افزایش یابد. افزایش نابجایی‌ها، سبب می‌شود که لایه‌ها به سختی بر روی هم بلغزند و در برابر حرکت آنان به خصوص در مرز دانه‌ها مانعی

می‌گردد. بالتبع آن نمونه استحکام کششی ویژه‌ای خواهد یافت. هدف از این بخش مقایسه بین نمونه‌هایی است که از دو مسیر A و B تحت عبورهای مختلف قرار گرفته‌اند. سپس انتخاب بهترین مسیر و انتخاب بهترین تعداد عبور نمونه از میان تمام نمونه‌های مورد آزمایش مورد نظر می‌باشد. با توجه به مطالب بیان شده نمونه‌ای مطلوب است که با اعمال کمترین تغییر شکل پلاستیک یا به عبارتی مصرف کمترین انرژی جهت تولید، بیشترین میزان استحکام کششی را داشته باشد. به منظور اندازه‌گیری اثرات فرایند ECAP بر استحکام قطعه، از آزمایش کشش استفاده می‌شود. آزمایش کشش توسط دستگاه کشش Hounsfield انجام شد.



شکل ۷. نمونه‌های یک الی ده مرتبه عبور در مسیر A

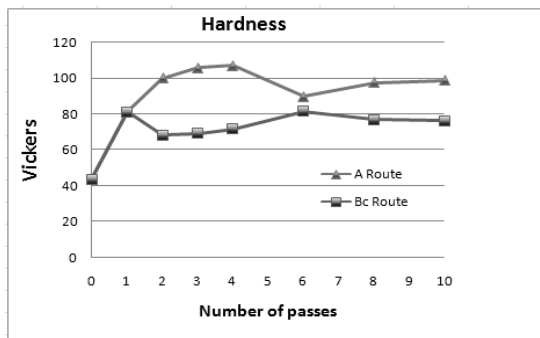
از هر کدام از نمونه‌های ECAP شده یک نمونه جهت آزمون کشش در راستای محور اکستروژن مطابق استاندارد ASTM B557M-84 تهیه شد. شکل ۵ نمونه کشش ساخته شده از هر نمونه را نشان می‌دهد. آزمایش در دمای محیط و با سرعت یک میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. همان‌طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌گردد، نمودار استحکام کششی نمونه اولیه و نمونه‌های مراحل اول الی دهم فرایند در مسیر A آورده شده است. مشاهده می‌شود

وجود داشته باشد [۸-۹]. این دو عامل باهم سبب می شوند تا نمونه ۱ مرتبه عبور، تحت اثر بار خارجی کششی مقاومت بیشتری از خود نشان دهد. به عبارتی استحکام کششی آن افزایش یابد و در اثر تنش بالاتری به حالت گلویی شدن برسد. این روند افزایش استحکام نهایی در نمونه حاصل از مرحله چهارم متوقف می شود به طوری که مقدار استحکام نهایی آن که ۳۴۴ مگاپاسکال می باشد تفاوت چندانی با نمونه قبلی ندارد. در چگونگی و توجیه شباهت نمودار این دو نمونه اینگونه بیان می شود که آثار ناشی از اعمال کرنش با شرایط کنونی؛ یعنی زاویه قالب، زاویه گوشه، اصطکاک، سرعت پرس، نوع ماده و دیگر شرایط به گونه ای پیش رفته است که افزایش نرخ چگالی نابجایی ها و ریزدانه شدن ساختار نمونه که باعث افزایش استحکام کششی می شود به حد آستانه خود رسیده است. مضاف بر آنکه پدیده خنثی شدن نابجایی های مثبت و منفی نیز مزید بر علت می باشد [۹-۱۱]. اثر این عوامل در شباهت زیاد نمودارهای استحکام کششی نمونه هایی که به این وضعیت رسیده اند قابل مشاهده است. نمونه بعدی نمونه حاصل از مرحله ششم می باشد، ملاحظه می گردد این نمونه دارای استحکام کششی با کمترین مقدار استحکام نهایی از میان نمونه های مورد آزمایش می باشد. مقدار استحکام نهایی نمونه مرحله ششم برابر ۲۵۶ مگاپاسکال می باشد که به میزان ۸۸ مگاپاسکال از مقدار استحکام نهایی مرحله چهارم کمتر است. اما هنوز هم آثار کرنش پلاستیکی شدید که به آن وارد شده مشهود است، چنانچه مشاهده می گردد مقادیر نمودار استحکام کششی این نمونه همچنان از مقدار نمودار نمونه اولیه بالاتر است. در توجیه و چگونگی این پدیده بیان می شود که پس از شش مرتبه عبور در مسیر A نرخ افزایش چگالی نابجایی ها و کاهش ابعاد دانه ها به خصوص در دانه های داخلی که بیشترین تغییر شکل در آنها رخ می دهد کاسته می شود. از طرفی انرژی نقص در چیده شدن که عاملی است جهت بازیابی^۵ ساختار داخلی به خصوص در دانه های درونی، افزایش یافته است. تقابل

این عوامل باعث می شود تا آثار ناشی از افزایش انرژی درونی بر دیگر عوامل غلبه یابد و نمودار استحکام کششی ماده با کاهش روبرو شود [۱۰-۱۲]. نمونه های بعدی، نمونه های ۸ و ۱۰ مرتبه عبور می باشند. همان طور که ملاحظه می گردد، مقادیر نمودار استحکام کششی این نمونه ها دوباره روند افزایشی به خود گرفته است. مقادیر استحکام نهایی آنها به ترتیب برابر ۲۸۷ و ۳۲۰ مگاپاسکال می باشد. افزایش مجدد در چگالی نابجایی ها، ریزدانه تر شدن ساختار نمونه و کارسختی از عوامل افزایش استحکام کششی نمونه ها می باشد که بر آثار ناشی از بازیابی غلبه می یابد. علاوه بر آنکه پدیده بازیابی، بستر مناسبی در ریزساختار نمونه جهت کرنش پذیری مجدد آن تحت اثر فرایند ECAP فراهم آورده است. قفل شدن نابجایی ها نیز از دیگر عوامل افزایش مقادیر استحکام کششی این نمونه ها می باشد [۱۱-۱۲].

تا اینجا استحکام کششی نمونه های مسیر A به تنهایی مورد بررسی قرار گرفتند تا دلائل تغییر رفتار آلیاژ ای. ۱۶۰۶۱ که بر تغییر خواص مکانیکی نمونه های مورد آزمایش اثرگذار است به صورت تحلیلی بیان شوند. این موارد در توجیه چگونگی تغییر رفتار نمونه ها در مسیر B و C در مورد تغییرات دیگر خواص مکانیکی مانند سختی نمونه های حاصل از این فرایند نیز کارائی دارد که به دلیل طولانی شدن مطلب از تکرار آنها خودداری کرده و از این به بعد فقط به بیان نتایج پرداخته می شود. در شکل ۷ نموداری به تصویر کشیده شده است که میزان استحکام نهایی نمونه ها در هر دو مسیر را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود میزان استحکام نهایی نمونه ها در مسیر A به جز در مرحله ششم بالاتر از مسیر B می باشد. به عبارتی می توان بیان داشت جهت دستیابی به نمونه ای از آلیاژ ای. ۱۶۰۶۱ با استحکام کششی بالا که از فرایند ECAP حاصل شده باشد، مسیر A دارای کارایی بهتری نسبت به مسیر B می باشد. نکته قابل توجه آن است که مقدار استحکام نهایی نمونه مرحله دهم نسبت به نمونه های

حاصل از انرژی نقص در چیده شدن، سختی نمونه رو به کاهش می‌گذارد و پس از آن در مراحل هشتم و دهم به حالت یکنواخت می‌رسد. دلیل این یکنواختی ناشی از به حد آستانه رسیدن عواملی همچون افزایش در چگالی نابجائی‌هاست است که باعث افزایش سختی در نمونه می‌گردید.

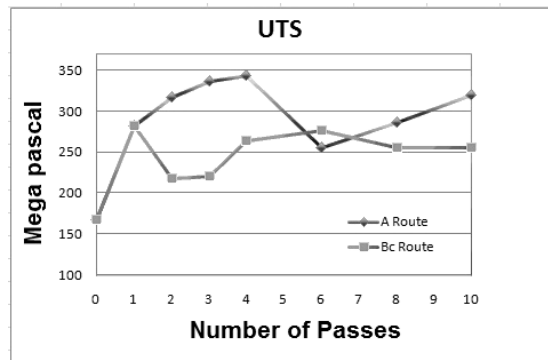


شکل ۸ نمودار تغییرات سختی نمونه‌های حاصل از فرایند ECAP

۵. بررسی قابلیت ماشینکاری نمونه‌ها

قابلیت ماشینکاری خاصیتی از مواد است که سهولت و سختی ماشینکاری را تحت یک شرایط خاص تعیین می‌کند. معیارهای مشترکی مانند عمر ابزار، نیروی برش و صافی سطح ایجاد شده بر روی قطعه کار عموماً برای ارزیابی قابلیت ماشینکاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی دیگر از این معیارها سختی و چقرمگی قطعه کار می‌باشد. به عبارتی در حالتی که دو آلیاژ یا ماده یکسان مقدار چقرمگی برابری داشته باشند، نیروهای ماشینکاری ماده‌ای که سختی بیشتری دارد، مقادیر بالاتری خواهد داشت و قابلیت ماشینکاری آن کمتر خواهد بود. تاثیر چقرمگی نیز به همین صورت می‌باشد. در حالتی که سختی دو ماده یکسان، برابر باشد نیروهای ماشینکاری در ماده‌ای که چقرمگی بالاتری داشته باشد بیشتر از ماده‌ای با مقدار چقرمگی کمتر خواهد بود [۱۵]. می‌توان انتظار داشت فرایندهایی که موجب تغییر در این دو مقدار می‌شوند خواص ماشینکاری مواد را نیز تغییر دهند. با توجه به تغییر خواص مکانیکی از جمله سختی و چقرمگی در مواد حاصل

مرحله سوم و چهارم در مسیر A مقادیر کمتری دارد و با نمونه مرحله دوم در همان مسیر مقداری مشابه دارد که در شکل ۷ به خوبی مشهود است. در اینصورت با توجه به میزان مصرف انرژی جهت تولید قطعات در فرایند ECAP که در کمترین زمان ممکن به دست آمده باشد و بالاترین استحکام کششی را داشته باشد، نمونه‌های حاصله از مراحل سوم و چهارم فرایند بهترین نمونه‌ها می‌باشند.



شکل ۷. نمودار استحکام نهایی نمونه‌های فرایند ECAP

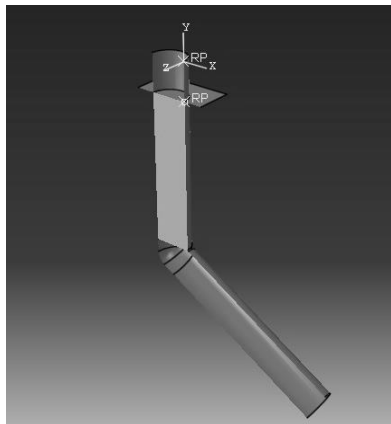
تحت اثر یک الی ده مرتبه عبور در مسیر A و Bc

۴. بررسی سختی نمونه‌ها و مقایسه آنها در هر دو

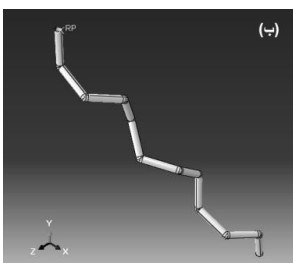
مسیر A و Bc

شکل ۸ سختی نمونه‌های تحت فرایند ECAP در هر دو مسیر A و Bc را نسبت به هم و در مقایسه با نمونه اولیه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود نمونه‌های حاصل از فرایند، عبور کرده در مسیر A دارای سختی بیشتری نسبت به نمونه اولیه و همچنین نسبت به نمونه‌های مسیر Bc می‌باشد. به عبارتی مسیر Bc جهت حصول به سختی بالاتر در قطعات از کارایی لازم برخوردار نیست. سختی نمونه پس از مرحله اول فرایند تقریباً دو برابر سختی نمونه اولیه می‌باشد. تغییرات سختی در نمونه‌های مسیر A از مرحله اول تا مرحله چهارم فرایند به علت ریزساختار شدن و افزایش در چگالی نابجائی‌ها به صورت افزایشی می‌باشد اما نرخ افزایش آن به علت کاهش نرخ دو عامل مذکور کاهش می‌یابد. در مرحله ششم به علت پدیده بازیابی

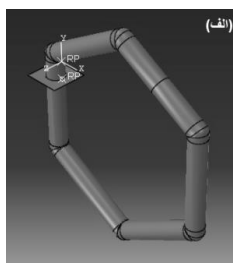
مرحله از فرایند به کار می‌رود و برای مراحل بالاتر، قالب‌های دیگری طراحی شد که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. قالب مسیر A قطعه را در هر مرحله تحت زاویه ۱۲۰ درجه تحت تنش برشی قرار می‌دهد، اما قالبی که مسیر BC را شبیه‌سازی می‌کند علاوه بر اعمال تنش برشی در گذر از زاویه ۱۲۰ درجه‌ای قالب، نمونه را ۹۰ درجه حول محور طولی‌اش می‌چرخاند.



شکل ۱۰. قالب و نمونه مدل‌سازی شده



(ب)



(الف)

شکل ۱۱. الف) قالب شبیه‌سازی شده در مسیر A

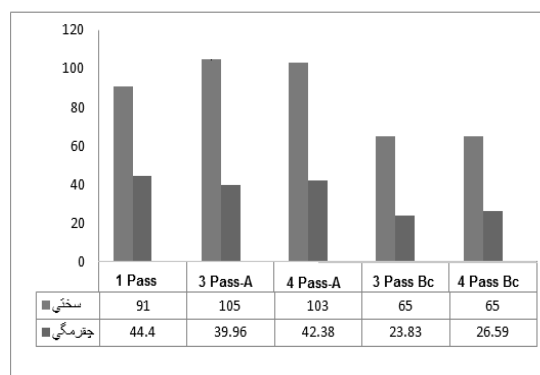
ب) قالب شبیه‌سازی شده در مسیر BC

شبیه‌سازی شبه استاتیکی می‌باشد و به صورت Dynamic Explicite انجام گرفته است. اصطکاک بین دیواره قالب و نمونه‌ها برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است.

۷. بررسی نیروهای وارد بر نمونه‌ها

حداکثر نیرویی که بر قطعه وارد می‌شود بر انتخاب ظرفیت دستگاه پرس، نحوه طراحی قالب و سنجه، طول عمر آنها و

از فرایند ECAP می‌توان انتظار داشت که خواص ماشین‌کاری مواد به‌دست آمده از این فرایند نیز تغییر یابد. شکل ۹ نشان‌دهنده مقادیر سختی و چقرمگی نمونه‌های مراحل اول، سوم و چهارم از هر دو مسیر A و BC می‌باشد. محاسبه مقادیر چقرمگی براساس محاسبه سطح زیر منحنی δ - ϵ می‌باشد. برای اینکه امکان نشان‌دادن هر دو پارامتر سختی، و چقرمگی بر روی یک نمودار وجود داشته باشد واحد چقرمگی، هکتونیوتن بر میلی‌متر مربع و واحد سختی، ویکرز در نظر گرفته شد.



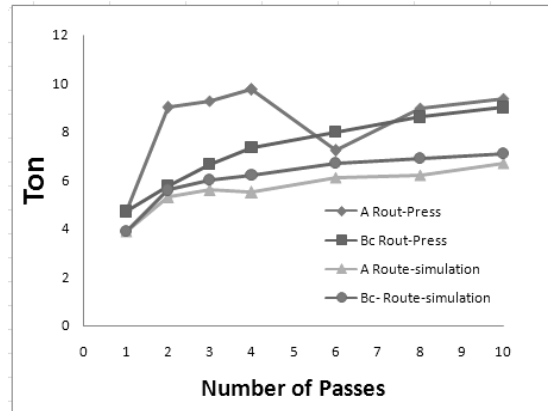
شکل ۹. سختی و چقرمگی نمونه‌ها

همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان چقرمگی و سختی در نمونه‌های مسیر BC کمتر از نمونه‌های مسیر A می‌باشند. به‌عبارتی می‌توان بیان داشت نمونه‌هایی که از مسیر BC به‌دست می‌آیند، به‌علت داشتن سختی و چقرمگی کمتر دارای قابلیت ماشین‌کاری بهتری نسبت به نمونه‌های مسیر A می‌باشند.

۶. شبیه‌سازی فرایند

در این مقاله برای شبیه‌سازی فرایند ECAP از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. به‌علت به واقعیت نزدیکتر بودن جواب‌ها مدل‌سازی به‌صورت سه‌بعدی انجام گرفته است. شکل ۱۰ مدل ایجادشده را برای یکی از حالت‌های فرایند ECAP نشان می‌دهد. زاویه قالب برابر ۱۲۰ درجه و زاویه کمان قالب برابر ۲۰ درجه می‌باشد. این قالب برای یک

میزان تغییر شکل قطعه‌ها موثر است. با این تفاسیر حداکثر نیروهای وارد آمده بر نمونه‌ها (عکس العمل نیروی وارده بر سنبه) در هر دو مسیر از شبیه‌سازی به دست آمد و در کنار مقادیر ثبت شده از نمایشگر دیجیتالی دستگاه پرس قرار گرفت که این مقادیر در شکل ۱۲ قابل مشاهده می‌باشند.

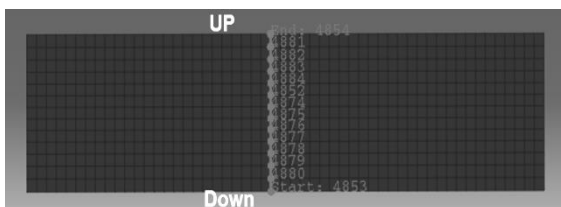


شکل ۱۲. نمودار تغییرات نیروی وارد بر نمونه‌ها در مسیر A و Bc حاصل از شبیه‌سازی

مقادیر نیروها به خوبی در مسیر Bc محاسبه شده‌اند. نیروهای حاصله از شبیه‌سازی در مسیر Bc برخلاف نیروهای ثبت شده از دستگاه پرس دارای مقادیر بالاتری نسبت به نیروهای مسیر دیگر می‌باشند. این تفاوت به علت نحوه تغییر شکل المان‌های نمونه شبیه‌سازی شده و پیچش و خمش همزمان نمونه در اثر گذر از زاویه قالب می‌باشد که باعث ایجاد تماس بیشتر بدنه نمونه با بدنه قالب می‌گردد.

۸. بررسی میزان توزیع کرنش در نمونه‌ها

تعدادی از نودهای میانی در جهت عرضی نمونه برای بررسی کرنش پلاستیک معادل انتخاب شدند. در شکل ۱۳ نودهای انتخابی مشخص شده‌اند و نودهای پایینی و بالایی متمایز گردیده‌اند.



شکل ۱۳. نودهای انتخابی در عرض نمونه

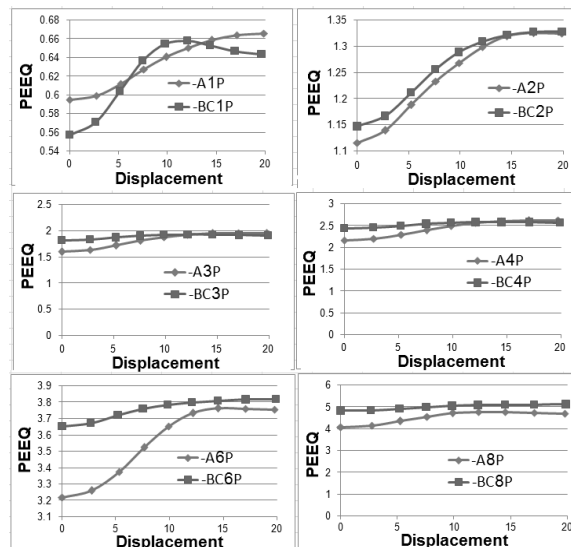
شکل ۱۴ نمودار توزیع کرنش نمونه‌های مراحل مختلف فرایند و در هر دومسیر را برحسب میزان کرنش به جابجایی در راستای عرض قطعه را نشان می‌دهد. جهت بررسی کرنش پلاستیک معادل، منطقه و زمان یکسانی از فرایند انتخاب شده است. مشاهده می‌شود میزان کرنش پلاستیک معادل در نودهای بالایی، یعنی نودهایی که در حال گذر از زاویه قالب می‌باشند بیشتر است. این میزان کرنش پلاستیک بالاتر، بر سختی نمونه و ترک‌هایی که بر روی نمونه واقعی در مراحل بالاتر فرایند ایجاد می‌شوند اثرگذار است. با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می‌شود درکل کرنش‌های وارده بر نمونه‌ها در مسیر Bc بیشتر از مسیر A می‌باشد گرچه این مقادیر در مراحل بالاتر به هم نزدیک شده و همگرا می‌شوند.

مشاهده می‌گردد نیروهای وارده بر قطعات در مسیر A که از دستگاه بدست آمده‌اند از مقادیر نیروهای وارده در مسیر دیگر بیشتر می‌باشد. روند تغییرات نیروها، متناسب با نحوه تغییرات استحکام کششی و سختی آن نمونه‌ها می‌باشد. دلایلی که درباره چگونگی افزایش و یا کاهش استحکام کششی نمونه‌ها گفته شد درمورد نیروها نیز صادق است [۱۳]. با بررسی نیروهای حاصله از شبیه‌سازی و نیروهای ثبت شده از دستگاه پرس مشاهده می‌شود مقداری تفاوت در این مقادیر وجود دارد. این تفاوت‌ها به دلیل وجود پدیده‌هایی همچون افزایش چگالی نابعائی‌ها، ایجاد مرزخانه‌های با زاویه بزرگ، بازیابی ناشی از انرژی نقص در چیده شدن و ... می‌باشد که نرم‌افزار قادر به شبیه‌سازی آنها نیست [۱۴]. این تفاوت در مسیر A بیشتر از مسیر Bc دیده می‌شود. در مراحل بالاتر فرایند، مقادیر حاصل از شبیه‌سازی و مقادیر عملی به هم نزدیکتر شده و همگرا می‌شوند. با در نظر گرفتن ۲۰ درصد تolerانس مجاز،

می‌باشند. سختی تمام نمونه‌های تولید شده در مسیر A از سختی نمونه‌های مسیر BC بیشتر است اما قابلیت ماشینکاری نمونه‌های مسیر BC بهتر می‌باشد. با توجه به کمترین میزان مصرف انرژی و کمترین زمان به کار رفته جهت تولید نمونه، همچنین دارا بودن استحکام کششی بالا و ساختار ریزدانه، نمونه‌های ۳ و ۴ مرتبه عبور در مسیر A بهترین نمونه‌ها در این پژوهش می‌باشند که تمام ویژگی‌های ذکر شده در آنها وجود دارد. نیروهای وارده بر نمونه‌ها در مسیر A بیشتر از مسیر BC می‌باشد. تغییر خواص مکانیکی آلیاژ Al6061 در اثر انجام فرایند ECAP بر آن حد آستانه ای دارد و به مقدار ثابتی همگرا می‌شود، همچنانکه کرنش‌های اعمالی به سمت همگرا شدن سوق می‌یابند.

۱۰. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

با توجه به موارد ذکر شده، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با در نظر گرفتن تغییرات مطلوب به دست آمده در استحکام کششی، سختی و قابلیت ماشینکاری آلیاژ ای. ۱۶۰۶۱ و مصارف متنوع این آلیاژ در صنعت، اعمال فرایند ECAP در مسیر A بر روی آن جهت دستیابی به خواص مکانیکی مناسبتر سودمند می‌باشد.



شکل ۱۴. توزیع کرنش پلاستیک معادل در نمونه‌های

به‌دست آمده از هر دو مسیر A و BC

۹. نتایج

تغییرات حاصل از اعمال فرایند ECAP به شرح زیر می‌باشد: اعمال فرایند ECAP در هر دو مسیر A و BC موجب افزایش در استحکام کششی و سختی قطعات تهیه شده از Al6061 می‌شود. نمونه‌های تولید شده در مسیر A به جز از نمونه مرحله ششم دارای استحکام کششی بالاتری نسبت به نمونه‌های مشابه تهیه شده از مسیر BC

۱۱. مأخذ

- [1] A.K. Parimi, P.S. Robi, S.K. Dwivedy, 2011. "Sever plastic deformation of copper and Al-Cu alloy using multiple channel-die compression", Materials and Design, vol.32, pp.1948-1956.
- [2] M. Reihanian, R. Ebrahimi, M.M. Moshksar, D. Terada, N.Tsuji, 2008 "Microstructure quantification and correlation with flow stress of ultrafine grained commercially pure Al fabricated by equal channel angular pressing ECAP", Materials Characterization, Vol. 59, pp.1312-1323.
- [3] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, & T. G. Langdon, 1997. "An Investigation of Microstructural Evolution during Equal-Channel Angular Pressing", Acta Mater. 45, 4733-41.

- [4] R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov, Prog. Mater. Sci.45, 2000, 103. "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation", Mater. Sci.45. pp115-125.
- [5] H. Mughrabi, H.W. Hoppel, 2001. "Materials Research Society Symposium Proceedings", vol. 634, Materials Research Society, Warrendale, PA, p. B2.1.
- [6] Minoru Furukawa et al, 2002. "Factors influencing the shearing patterns in equal – channel angular Pressing", Materials Science and Engineering, pp.97 – 119.
- [7] S.Kalpajian, S. R. Schmid, 2003. "Manufacturing Processes for Engineering Materials", Prentice Hall, New Jersey.
- [8] R.Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T.G. Langdon, M.J. Zehetbauer, Y.T. Zhu, 2006 "Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation", JOM 58(4), pp.33-39.
- [9] S. Ferrasse, V.M. Segal, K.T.H. Hartwig, R.E. Goforth, J. Mater, 1997. "Development of a Submicrometer-Grained Microstructure in Aluminum 6061 Using Equal Channel Angular Extrusion", Res. 12, 1253.
- [10] Z. Horita, T. Fujinami, M. Nemoto, T.G. Langdon, 2000. "ECAP Processing of Commercial Aluminum Alloys: Grain Refinement, Thermal Stability and Tensile Properties", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.31, pp. 691-706.
- [11] M. Furukawa, Z. Horita and T.G. Langdon, 2007. "Application of Equal-Channel Angular Pressing to Aluminum and Copper Single Crystals," Materials Science Forum 539-543, 2853-2858.
- [12] Atkins, A. G. Toughness, "the shearing of self-mated junctions, and friction". Wear, 233, (2003b), pp 1–3.
- [13] V.P Basavaraj., Ch Uday., T.S Prasanna Kumar., "Influence of friction in equal channel angular pressing – A study with simulation", Proceedings of the 17th International Conference of Metallurgy and Materials (Metal 2008), Czech Rep., pp.1-9, 2008.
- [14] J Bidulska., R Kocisko., T Kvackaj., R Bidulsky., M Actis Grande., "Numerical simulations of EN AW 2014 Aluminum alloy in ECAP process", Acta Metallurgica Slovaca, Vol.14, pp.342-348, 2008.

[15] محمد رضا رازفر، "اصول ماشینکاری و ابزار شناسی"، ۱۳۸۲، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

پی نوشت

-
1. Sever Plastic Deformation
 2. Equal Channel Angular Pressing (ECAP)
 3. ABAQUS6.11
 4. Iwahashi
 5. Recovery

