





دانشگاه صنعتی شاهرود

پردیس بین المللی خوارزمی

پایان نامه کارشناسی ارشد ساخت و تولید

بررسی اثر تعداد پاس های شکل دهی بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ طی
فرآیند پرس کاری در کانال های همسان زاویه دار

نگارنده : حامد خدابخشیان

استاد راهنما

دکتر سید هادی قادری

شهریور ۱۳۹۵

دانشکده: مهندسی مکانیک

گروه: ساخت و تولید

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حامد خدابخشیان به شماره دانشجویی ۹۲۳۵۷۰۴ تحت عنوان بررسی اثر تعداد پاس‌های شکل‌دهی بر خواص مکانیکی آلیاژ ۷۰۷۵ آلومینیوم ، طی فرآیند پرس کاری در کانال‌های همسان زاویه‌دار در تاریخ ۱۳۹۵/۰۶/۱۷ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد در مهندسی مکانیک-ساخت و تولید مورد ارزیابی و با درجه‌ی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
			دکتر سید هادی قادری

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر علی عباس نژاد		دکتر مهدی گردویی
			دکتر محسن کریمی

تقدیم نامه

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است
به پاس قلب‌های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید
و به پاس محبت‌های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند
این مجموعه را به خانواده ام به ویژه پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم.

سپاس‌گزاری

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و دورد بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز

من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق

سپاس فراوان از

استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر قادری که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند.

و از اساتید فرزانه و بزرگوار؛ جناب آقای دکتر گردویی و جناب آقای دکتر کریمی که زحمت داوری این

پایان نامه را متقبل شدند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعهد نامه

اینجانب حامد خدابخشیان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان‌نامه ((بررسی اثر تعداد پاس‌های شکل‌دهی بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ طی فرایند پرس‌کاری در کانال‌های همسان زاویه‌دار)) تحت راهنمایی

دکتر سید هادی قادری

متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا «Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

متن این صفحه باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان‌نامه وجود داشته باشد

چکیده

پرسکاری در کانال‌های همسان زاویه‌دار (ECAP) یکی از موثرترین فرآیندهای اعمال تغییرشکل مومسان شدید جهت تولید مواد فوق ریزدانه و حتی نانوساختار است. از میان فلزات، آلیاژهای آلومینیوم به علت نسبت استحکام به وزن بالا کاربردهای وسیعی در صنایع هوایی، نظامی و پزشکی دارد. با ریزدانه کردن این مواد می‌توان این نسبت را افزایش داد. در این مطالعه اثر تعداد پاس‌های شکل‌دهی بر ریز ساختار و خواص مکانیکی آلومینیوم ۷۰۷۵ طی این فرآیند مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌هایی با سطح مقطع دایروی با قطر

۱۲ mm و طول ۱۴۰ mm در قالبی با زاویه‌ی کانال 90° ، مقطع دایروی و مسیر گذر Bc در دمای محیط، طی سه پاس پرسکاری و مشاهده شد که نمونه دچار ترک‌هایی مایل به راستای افقی می‌شود، سپس با گرم نمودن قالب این عملیات در دمای 130°C ، بدون مشکل و طی ده پاس تحت پرس انجام‌گرفت و اثرات آن بر ریز ساختار، سختی و استحکام مطالعه شد. از تحلیل نتایج به‌دست آمده با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمون تست کشش و میکرو سختی سنج چنین استنباط شد که آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ طی این فرآیند قابلیت بالایی را در ریزدانه شدن، افزایش استحکام و سختی در پاس اول از فرآیند داشته است و از پاس دوم به بعد استحکام و سختی آن کاهش می‌یابد و در مقابل ازدیاد طول و نرمی آن افزایش پیدا می‌کند.

واژگان کلیدی: تغییر شکل مومسان شدید (SPD)، تغییر شکل در کانال‌های همسان زاویه دار (ECAP)، مواد

بسیار ریزدانه (UFG)، آلیاژ آلومینیوم، استحکام

فهرست عنوان‌ها

فصل ۱ مقدمه	۱
۱-۱- استحکام دهی توسط کاهش اندازه دانه	۲
۲-۱- مفهوم تغییر شکل مومسان	۴
۳-۱- تغییر شکل مومسان	۵
۴-۱- روش تغییر شکل مومسان شدید برای تولید مواد نانوساختار	۶
۵-۱- مفهوم تغییر شکل مومسان شدید	۷
۶-۱- روش های تغییر شکل مومسان شدید:	۸
۷-۱- فرآیندهای تغییر شکل مومسان شدید مواد بالک:	۹
۱-۷-۱ فرآیند پرسکاری در کانال‌های همسان زاویه‌دار (ECAP)	۹
۲-۷-۱ پیچش با فشار بالا (HPT)	۱۰
۳-۷-۱ فرآیند فورج چند جهته (MDF)	۱۰
۴-۷-۱ فرآیند اکستروژن - فشردن تناوبی (CEC)	۱۱
۸-۱ فرآیندهای تغییر شکل شدید برای ورق‌ها:	۱۲
۱-۸-۱ فرآیند پیوند نوردی انباشتی (ARB)	۱۲
۲-۸-۱ روش کنگره دار کردن و صاف کردن متوالی (RCS)	۱۳
۹-۱ فرآیندهای تغییر شکل مومسان شدید برای لوله‌ها:	۱۴
۱۰-۱- نتیجه‌گیری از روش‌های تغییر شکل مومسان شدید	۱۶
۱۱-۱- معرفی بیشتری از فرآیند ECAP و بررسی عوامل موثر در آن	۱۶
۱۲-۱- بررسی عوامل موثر در فرآیند ECAP	۱۸
۱-۱۲-۱ - تاثیر مسیر	۱۸
۲-۱۲-۱ تاثیر زاویه کانال	۱۹
۳-۱۲-۱ تاثیر زاویه مربوط به شعاع انحنای قالب	۲۰
۴-۱۲-۱ تاثیر سرعت پرس	۲۰
۵-۱۲-۱ تاثیر دمای پرس	۲۰
۶-۱۲-۱ تاثیر گرم شدن درونی حین ECAP	۲۱
۷-۱۲-۱ تاثیر نیروی پستی	۲۱
۸-۱۲-۱ تاثیر تعداد مرحله	۲۱
۱۳-۱- مشخصات آلومینیوم گروه ۷۰۰۰	۲۱
۱-۱۳-۱ مفهوم پیر سختی در آلومینیوم	۲۲
۱۴-۱- پیشینه تحقیق	۲۳

۱-۱۵- اهداف پژوهشی و مروری بر فصل های پایان نامه ۲۶

فصل ۲ آزمایش های تجربی ۲۹

۲-۱- مواد و روش آزمایش ۲۹

۲-۱-۱ ماده اولیه ۲۹

۲-۱-۲ اجزا و ساخت قالب ECAP ۳۰

۲-۱-۳ انجام فرآیند ECAP ۳۱

۲-۲ آماده سازی نمونه ها جهت آزمون شناسایی ۳۵

۲-۲-۱ نمونه برداری ۳۶

۲-۲-۲ آماده سازی نمونه های سختی سنجی و متالوگرافی ۳۷

۲-۳ سختی سنجی ۳۸

۲-۳-۱ اندازه گیری سختی ۳۹

۲-۴ متالوگرافی و کاربرد آن ۴۰

۲-۴-۱ وسایل و تجهیزات مورد استفاده در متالوگرافی ۴۱

۲-۴-۲ میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی ۴۲

۲-۵ عملیات آماده سازی و تهیه یک مقطع متالوگرافی ۴۳

۲-۵-۱ ظاهر سازی ساختمان - اچ کردن ۴۳

۲-۵-۲ روش اندازه گیری دانه ۴۴

۲-۶ آزمون کشش ۴۶

۲-۶-۱ آماده سازی نمونه آزمون کشش ۴۶

۲-۶-۲ دستگاه آزمون کشش ۴۷

فصل ۳ نتایج و بحث ۵۱

۳-۱ نتایج بدست آمده از پرسکاری نمونه ها در قالب ۵۱

۳-۲ بررسی نتایج آزمون سختی سنجی ۵۲

۳-۲-۱ مقایسه نمودارهای بدست آمده از سختی نمونه و تاثیر تعداد پاس های ECAP بر آن ۵۷

۳-۲-۲ تصاویر بدست آمده از متالوگرافی ماده ۵۸

۳-۲-۳ تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) ۵۹

۳-۳ نتایج آزمون کشش ۶۱

۳-۴ درصد کاهش سطح مقطع ۶۳

فصل ۴ نتیجه گیری و پیشنهادها ۶۵

۴-۱ نتیجه گیری ۶۵

۶۷ ۲-۴- پیشنهادها

۶۹ منبعها

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- نمایش دو دانه A و B با مرز مشترک ولی جهات بلوری متفاوت [۴۳و۴۶]. ۳
- شکل ۱-۲- نمودار نمایش تاثیر اندازه دانه بر استحکام آلیاژ فلزات [۱]. ۴
- شکل ۱-۳- نمودار شماتیک تنش- کرنش یک فلز در حالت کشسان [۶]. ۵
- شکل ۱-۴- نمایش تنش برشی τ در تغییر شکل مومسان یک نمونه تک کریستالی [۴۳]. ۶
- شکل ۱-۵- دسته بندی کلی روش های تغییر شکل مومسان شدید بر اساس شکل محصول [۴۲]. ۸
- شکل ۱-۶- شکل شماتیک فرآیند ECAP با هندسه مکعبی (مقطع چهارگوش) و زاویه کانال 90° [۱۱و۱۲]. ۹
- شکل ۱-۷- فرآیند پیچش با فشار بالا، (الف) با سنبه چرخان، (ب) با قالب چرخان و (ج) نمونه تحت فرآیند [۱۳]. ۱۰
- شکل ۱-۸- شماتیک فرآیند فورج چند جهته [۱۲]. ۱۱
- شکل ۱-۹- شماتیک فرآیند آهنگری چند جهته [۱۲]. ۱۱
- شکل ۱-۱۰- تصویر شماتیک و مراحل فرآیند ARB [۱۴]. ۱۲
- شکل ۱-۱۱- شمای کلی از فرآیند RCS [۱۲]. ۱۳
- شکل ۱-۱۲- (الف) مقایسه تفاوت دو روش CGP (بالا) و RCS (پایین) [۱۵]، (ب) فرآیند کنگره دار کردن دو مرحله‌ای [۱۶]. ۱۴
- شکل ۱-۱۳- مراحل مختلف فرآیند PTCAP برای ایجاد تغییر شکل مومسان شدید بر روی لوله ها [۱۹]. ۱۴
- شکل ۱-۱۴- شمای کلی و مراحل فرآیند TCP [۲۰]. ۱۵
- شکل ۱-۱۵- نمای کلی از فرآیند ECAP [۲۱و۲۶]. ۱۷
- شکل ۱-۱۶- مسیرهای مختلف اصلی برای روش ECAP [۱۱و۲۲]. ۱۹
- شکل ۱-۱۷- قابلیت انجام عملیات ECAP بر روی ورق های ضخیم [۱۱]. ۱۹
- شکل ۱-۲- قالب ECAP ساخته شده. ۳۰
- شکل ۲-۲- میل پران های مورد استفاده به عنوان سنبه. ۳۱

- شکل ۲-۳- نمونه قطعه خام برش خورده و سنباده زده شده. ۳۲.....
- شکل ۲-۴- دستگاه پرس هیدرولیکی ۱۰۰ تن مورد استفاده. ۳۲.....
- شکل ۲-۵- ماده روانکار EHT. ۳۳.....
- شکل ۲-۶- بریده بریده شدن قطعه طی فرآیند در دمای محیط. ۳۴.....
- شکل ۲-۷- نحوه گرم کردن قالب توسط المنت های حرارتی. ۳۴.....
- شکل ۲-۸- نمونه ای از قطعات ECAP شده در پاس های ۲ و ۶ و ۱۰. ۳۵.....
- شکل ۲-۹- دستگاه پولیش نیمه اتوماتیک مورد استفاده. ۳۸.....
- شکل ۲-۱۰- نمونه های پولیش خورده جهت آزمون های سختی سنجی و متالوگرافی. ۳۸.....
- شکل ۲-۱۱- دستگاه اندازه گیری میکرو سختی ویکرز. ۴۰.....
- شکل ۲-۱۲- دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد استفاده. ۴۳.....
- شکل ۲-۱۳- نقشه تراشکاری نمونه ها جهت آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM E8. ۴۶.....
- شکل ۲-۱۴- نمونه ای از قطعات آماده شده جهت آزمون کشش. ۴۷.....
- شکل ۲-۱۵- دستگاه اندازه گیری آزمون کشش مورد استفاده. ۴۹.....
- شکل ۳-۱- نمایش روند تغییر شکل در حین فرایند ECAP. ۵۲.....
- شکل ۳-۲- نمونه قطعه پاس اول ECAP شده. ۵۲.....
- شکل ۳-۳- اثر فرورونده ویکرز و نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف از نمونه قطعه خام. ۵۳.....
- شکل ۳-۴- نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف از نمونه پاس اول ECAP. ۵۴.....
- شکل ۳-۵- نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف از نمونه پاس دوم ECAP. ۵۴.....
- شکل ۳-۶- نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف از نمونه پاس چهارم ECAP. ۵۵.....
- شکل ۳-۷- نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف از نمونه پاس ششم ECAP. ۵۵.....
- شکل ۳-۸- نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف از نمونه پاس هشتم ECAP. ۵۶.....
- شکل ۳-۹- نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف از نمونه پاس دهم ECAP. ۵۷.....

- شکل ۳-۱۰- نمودار مقایسه تغییرات سختی نمونه طی مراحل مختلف فرآیند ECAP ۵۷
- شکل ۳-۱۱- نمودار مقایسه ای اثر تعداد پاس های فرآیند ECAP بر روی سختی ماده ۵۷
- شکل ۳-۱۲- تصویر متالوگرافی از نمونه خام توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۵۰۰x ۵۸
- شکل ۳-۱۳- تصویر متالوگرافی از نمونه خام با بزرگنمایی ۵۰۰x و اندازه دانه مطابق با استاندارد ASTM E112-12 ۵۹
- شکل ۳-۱۴- تصویر FE-SEM نمونه پاس اول از فرآیند ECAP با بزرگنمایی ۵۰۰۰X ۵۹
- شکل ۳-۱۵- تصویر FE-SEM نمونه پاس دوم از فرآیند ECAP با بزرگنمایی ۵۰۰۰X ۶۰
- شکل ۳-۱۶- تصویر FE-SEM نمونه پاس چهارم از فرآیند ECAP با بزرگنمایی ۵۰۰۰X ۶۰
- شکل ۳-۱۷- منحنی های تنش - کرنش مهندسی آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده در پاس های مختلف از فرآیند ۶۱
- شکل ۳-۱۸- استحکام تسلیم آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده در پاس های مختلف از فرآیند ۶۲
- شکل ۳-۱۹- استحکام نهایی آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده در پاس های مختلف از فرآیند ۶۲

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ [۴۶]..... ۲۲
- جدول ۱-۲- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ مورد استفاده ۲۹
- جدول ۲-۲- محلول اچ مناسب جهت آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده..... ۴۴
- جدول ۱-۳- میزان کرنش مومسان ایجاد شده در پاس‌های مختلف از فرآیند ECAP ۵۱
- جدول ۲-۳- اعداد سختی بدست آمده ۵۳
- جدول ۳-۳- استحکام تسلیم و استحکام نهایی نمونه‌ها طی آزمون کشش..... ۶۲
- جدول ۴-۳- میزان درصد کاهش سطح مقطع طی آزمون کشش در پاس‌های مختلف از فرآیند ECAP ۶۳

فهرست نشانه‌ها

H	ارتفاع	σ_y	تنش تسلیم
D	قطر	σ_0	مقاومت شبکه
Φ	زاویه برخورد	d	اندازه دانه
Ψ	زاویه انحنای خارج قالب	k_y	عدد ثابت (وابسته به جنس ماده)
n	تعداد پاس انجام فرآیند	τ	تنش برشی
ε_N	کرنش معادل	σ	تنش عمودی
f	نیروی کشش	θ	زاویه بین خط عمود بر صفحه لغزش
		زاویه بین جهت لغزش با امتداد تنش کششی	
		λ	
		W	عرض

فصل ۱ مقدمه

در سال های اخیر، روش های تولید و خواص مکانیکی آلیاژهای فلزی با اندازه دانه نانومتری (اندازه دانه کوچکتر از ۱۰۰ nm) یا بسیار ریزدانه^۱ (UFG) موضوع بسیاری از تحقیقات انجام شده در زمینه علم مواد و علوم مرتبط با آن بوده است. این مواد که با نام ابر فلز^۲ شناخته می شوند، خواص بی نظیری همانند استحکام زیاد در دمای محیط، خاصیت سوپر پلاستیک در دمای بالا و نرخ کرنش کم و مقاومت عالی در برابر خوردگی از خود نشان می دهند [۱ و ۲]. تغییر الگوهای لغزش متداول در مواد با اندازه دانه نانومتری و فعال شدن مکانیزم های لغزش مرزدانه ای از ویژگی های این مواد است که منجر به خواص مکانیکی منحصر به فرد آنها می شود. دنیای نانومواد را از یک دیدگاه می توان به دو دسته اصلی مواد نانو اندازه و مواد نانوساختار دسته بندی نمود. مواد نانو اندازه به این معنی است که ماده مورد نظر، دارای ابعاد نانومتری است که می تواند به صورت نانوذرات (مانند نانولوله های کربنی و یا نانو ذرات سیلیس) و یا نانو الیاف^۳ (مانند نانو الیاف کربنی) و یا نانو ورق ها^۴ (مانند نانو ورق های میکا یا نانو ورق های خاک رس) باشد. در دیگر سوی، مواد نانوساختار قرار دارند. مواد نانوساختار به موادی گفته می شود که ابعاد ظاهری آنها به صورت حجمی است، ولی ساختار تشکیل دهنده آنها در ابعاد نانو قرار دارد. تاکنون روش های مختلفی برای تولید مواد نانومتری ارائه شده و تحقیقات گسترده ای روی آنها انجام شده است. روش های تولید آلیاژهای فلزی نانومتری را می توان به دو

¹ Ultra fine Grained

² Super Metals

³ Nano-fibers

⁴ Nano-plates

گروه کلی تقسیم بندی کرد. روش اول که تحت عنوان روش پایین به بالا^۱ معرفی شده است، شامل فرآیندهایی نظیر آلیاژ سازی مکانیکی^۲، رسوب شیمیایی بخار^۳ و انجماد سریع^۴ است، که قابلیت تولید دانه‌هایی با اندازه‌ای در حدود ۱۰ تا ۵۰ نانومتر را دارند [۲ و ۳]. این فرآیندها به طور گسترده‌ای برای تولید مقادیر زیاد پودرهای نانو بلور مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما مشکل اصلی این فرآیندها تولید یک محصول نهایی از طریق پرس کردن این پودرها است. به دلیل سختی بالای پودرهای تولید شده با روش های مکانیکی، پرس سرد آنها تقریباً غیر ممکن است. از طرف دیگر استفاده از پرس داغ برای تف جوشی کردن این پودرها می‌تواند منجر به رشد دانه‌ها و وقوع تبلور مجدد شود. تاکنون روش‌های مختلفی برای رفع این مشکلات پیشنهاد شده است اما هنوز تحقیقات برای پیدا کردن روشی کاملاً مناسب برای پرس پودرهای نانوکریستالی و تولید محصول نهایی کاملاً یکپارچه با اندازه دانه نانومتری ادامه دارد [۳]. روش دوم برای تولید مواد با اندازه دانه نانومتری که با نام روش بالا به پایین^۵ شناخته می‌شود، شامل فرآیندهای متعددی است که با اعمال کرنش‌های شدید پلاستیک در مواد فلزی باعث کاهش اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری می‌شوند [۲ و ۳]. علت انتخاب این نام برای روش مذکور این است که اساس آن کاهش مستقیم اندازه دانه‌ها در نمونه‌ای با ابعاد بزرگ است. این فرآیندها به عنوان روش‌هایی جدید برای تولید مواد نانوکریستالی یا بسیار ریزدانه در مقیاس صنعتی مطرح شده و در بسیاری موارد با موفقیت‌هایی نیز همراه بوده‌اند. در رویکرد بالا به پایین، روش‌های گوناگونی وجود دارد که دسته‌ای از آنها، به صورت اعمال کار مکانیکی بر روی ماده هستند. یکی از روش‌های اصلی این دسته، روش تغییر شکل مومسان شدید^۶ (SPD) است.

۱-۱- استحکام دهی توسط کاهش اندازه دانه

مرز دانه‌ها یکی از موانع حرکت نابجایی‌ها^۷ محسوب می‌شوند. در شکل ۱-۱ مشاهده می‌شود که دو دانه مجاور جهات کریستالی متفاوت و مرز مشترک دارند. نابجایی که از دانه A به سمت دانه B حرکت می‌کند، نیازمند تغییر جهت حرکت است که منجر به مشکل شدن ادامه حرکت آن می‌شود. بی‌نظمی ساختار اتمی در مرز دانه منجر به ناپیوستگی صفحات لغزش در دو سوی مرز خواهد شد [۴۳].

¹ Bottom-up

² Mechanical Alloying

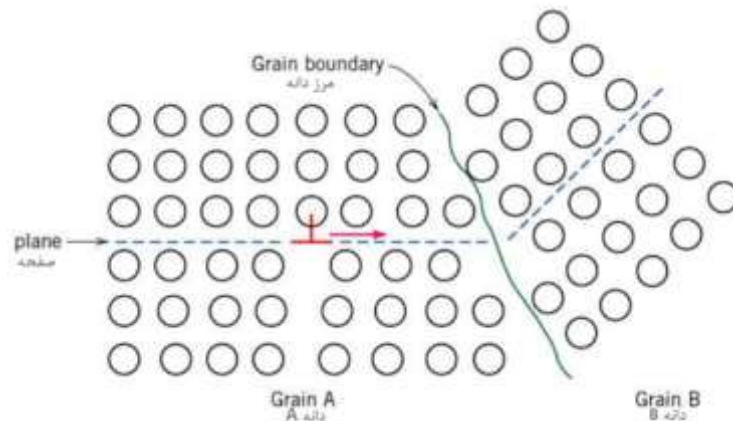
³ Chemical Vapor Deposition

⁴ Rapid Solidification

⁵ Top-down

⁶ Severe plastic deformation

⁷ Dislocations



شکل ۱-۱- نمایش دو دانه A و B با مرز مشترک ولی جهات بلوری متفاوت [۴۳].

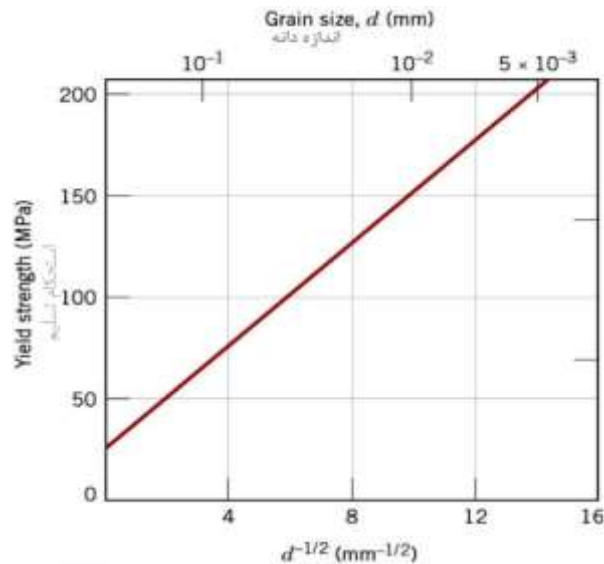
در مرزهای با زاویه بزرگ عملاً امکان عبور نابجایی از مرز دانه وجود ندارد و به همین دلیل با تجمع نابجایی‌ها در مرز دانه مواجه خواهیم بود که منجر به تمرکز تنش در مرز دانه و تشکیل نابجایی جدید در مرز دانه مجاور می‌شود. از آنجایی که ریزدانه کردن مواد منجر به افزایش میزان مرزها در داخل ریز ساختار می‌شود، مواد ریز دانه معمولاً استحکام و سختی بیشتری از خود نشان می‌دهند. تاثیر اندازه دانه در میزان استحکام معمولاً با رابطه (هال - پچ^۱) نشان داده می‌شود [۴۳].

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

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 - پچ).

کنترل اندازه دانه معمولاً توسط کنترل فرآیندهای انجماد، تغییر شکل مومسان و عملیات حرارتی صورت می‌پذیرد. نکته بسیار مهم این است که کاهش اندازه دانه نه تنها منجر به افزایش استحکام و سختی می‌شود بلکه در غالب موارد چقرمگی را نیز بهبود می‌بخشد. مرزهای با زاویه کوچک تاثیر چندانی در ایجاد مانع برای حرکت نابجایی‌ها ندارد ولی در مقابل مرزهای دو قلوبی بطور موثر مانع از عبور نابجایی‌ها می‌شوند. همچنین مرزهای بین فازهای مختلف نیز موانع مهمی در راه حرکت نابجایی‌ها محسوب می‌شوند، بنابراین نوع مرزهای بین فازی و پراکندگی آنها تاثیر مهمی بر استحکام مواد چند فازی خواهد داشت.

¹ Hall-Petch equation



شکل ۱-۲- نمودار نمایش تاثیر اندازه دانه بر استحکام آلیاژ فلزات [۱].

در دو دهه‌ی اخیر مواد پلی کریستال با دانه‌بندی بسیار ریز در حد نانو متر و یا چند صد نانومتر (کمتر از میکرومتر) به دلیل برخورداری از خواص مکانیکی و فیزیکی ویژه شدیداً مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند [۴]. خواص مکانیکی و فیزیکی مواد کریستالی تحت تاثیر فاکتورهای متعددی می‌باشند که اندازه متوسط دانه در تعیین این خواص تاثیر بسزایی دارد. به طور کلی مطابق رابطه‌ی ۱-۱ (رابطه هال-پچ) استحکام ماده با عکس مجذور اندازه دانه‌ی آن متناسب است. به عبارت دیگر با کوچک شدن اندازه دانه استحکام ماده افزایش می‌یابد. یکی از رویکردهای جدید برای تولید مواد نانو کریستال^۱ (NC) و مواد با دانه‌های بسیار ریز^۲ (UFG) اعمال تغییر شکل شدید مومسان^۳ (SPD) بر روی نمونه اولیه با دانه‌های درشت می‌باشد. در این روش با اعمال کرنش‌های شدید به نمونه، طی چندین مرحله اندازه‌های دانه آن تا مقیاس نانومتری کاهش می‌یابد و این امر باعث بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی ماده می‌شود [۵و۴]. از آنجایی که تغییرات ابعادی ماده می‌تواند مانعی در مقابل میزان کرنش اعمالی باشد، اکثر روشهای SPD به نحوی طراحی شده‌اند که ابعاد نمونه در حین فرایند ثابت مانده و تغییر نمی‌کند [۵و۴].

۲-۱- مفهوم تغییر شکل مومسان

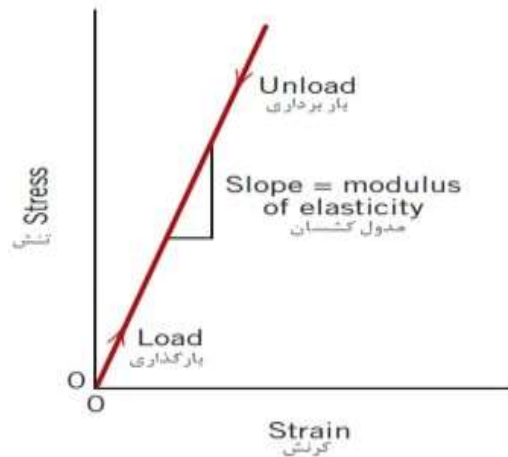
هنگامی که یک فلز تغییر شکل می‌دهد، بسته به مقدار نیروی وارد شده، این تغییر می‌تواند به دو صورت در فلز اتفاق بیافتد؛ «تغییر شکل کشسان» و یا «تغییر شکل کشسان به اضافه تغییر شکل مومسان».

¹ Nano Crystalline

² Ultra Fine Grained

³ Severe Plastic Deformation

تغییر شکل کشسان آن قسمت از تغییر شکل است که قابل بازگشت می‌باشد و حالت فنری داشته و در صورتی که بار اعمالی برداشته شود، فلز تغییر شکل یافته به حالت اول باز می‌گردد. در این نوع تغییر شکل، کرنشی که به فلز وارد می‌شود، متناسب با مقدار تنش وارد شده است، به این معنی که رابطه بین تنش و کرنش اعمالی به صورت خطی است که به شیب این خط، مدول کشسان (E) گفته می‌شود [۶] (شکل ۱-۳). این رابطه را می‌توان با قانون فنر (یا همان قانون هوک) معادل در نظر گرفت.



شکل ۱-۳- نمودار شوماتیک تنش-کرنش یک فلز در حالت کشسان [۶].

هنگامی که تنش اعمالی به فلز، از حد محدوده کشسان فراتر رود، فرآیند تغییر شکل وارد محدوده مومسان می‌شود [۷]. تغییر شکل مومسان که در ادامه تغییر شکل کشسان می‌آید، یک فرآیند غیر قابل بازگشت است و تغییر شکل دائمی محسوب می‌شود.

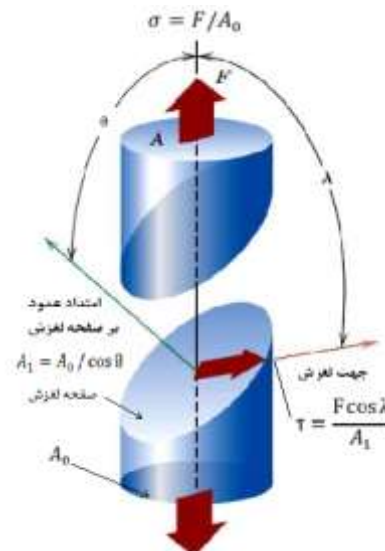
۳-۱- تغییر شکل مومسان

تغییر شکل مومسان در اثر لغزش صفحات اتمی در امتداد صفحات و جهات بلوری معین که جمعا به نام سیستم های لغزشی معین^۱ نامیده می‌شود انجام می‌گیرد. مقدار لغزش در یک تک کریستال که تحت تاثیر نیروی کششی f قرار گرفته به تنش برشی حاصل از f در سیستم لغزشی معین و فعال بستگی خواهد داشت. تنش برشی بحرانی به کمترین مقدار تنش برشی گفته می‌شود که اگر به صفحه اعمال شود سبب لغزش آن می‌شود. تنش برشی بحرانی به مقدار مولفه تنش عمود بر صفحه لغزشی بستگی نخواهد داشت چرا که مولفه قائم تنش می‌تواند فقط باعث لغزش نابجایی پیچی شود. مقدار تنش برشی در اثر اعمال تنش قائم در یک صفحه دلخواه از رابطه اشمید به دست می‌آید [۴۳].

¹ specified sliding systems

$$\tau = \sigma \cos \lambda \cos \theta \quad (۲-۱)$$

در این رابطه θ زاویه بین خط عمود بر صفحه لغزش و λ زاویه بین جهت لغزش با امتداد تنش کششی است. به ضریب $\cos \lambda \cos \theta$ ضریب اشמיד گفته می‌شود. ضریب اشמיד حداکثر می‌تواند به مقدار $0/5$ برسد و این هنگامی است که θ و λ هر دو برابر 45° باشند.



شکل ۴-۱- نمایش تنش برشی τ در تغییر شکل مومسان یک نمونه تک کریستالی [۴۳].

۴-۱- روش تغییر شکل مومسان شدید برای تولید مواد نانو ساختار

روش‌های تغییر شکل مومسان شدید^۱ (SPD)، از جمله روش‌های تولید مواد نانو ساختار است که در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این فرآیندها که با توجه به شکل محصول آن دسته بندی می‌شوند، در اثر اعمال تغییر شکل مومسان شدید به فلز، باعث تغییرات ریزساختاری در آن شده و ساختار ماده را تا حد نانومتری تغییر می‌دهند. اصول این روش، اعمال کرنش به ماده فلزی بدون تغییر ابعاد ظاهری آن است.

تاکنون فرآیندهای متعددی برای اعمال تغییر شکل شدید پلاستیک در مواد فلزی و رسیدن به ساختارهای نانومتری پیشنهاد شده‌اند که در بسیاری موارد با موفقیت‌هایی نیز همراه بوده‌اند. ویژگی مشترک و منحصر به فرد این فرآیندها، ثابت بودن ابعاد و عدم تغییر شکل ظاهری ماده حین فرآیند می‌باشد که در نتیجه آن محدودیت در اعمال کرنش از بین می‌رود و دستیابی به کرنش‌های بسیار بالا (در حدود هشت تا ده) در ماده به راحتی میسر است. به این ترتیب در اثر اعمال کرنش، امکان اصلاح ریزساختار، کاهش اندازه دانه ها تا

¹ Severe Plastic Deformation

مقیاس نانومتری و بهبود خواص مکانیکی نمونه فلزی فراهم می‌آید، در حالی که شکل نمونه تغییری نکرده است. ویژگی دیگر این فرآیندها افزایش استحکام و اصلاح ساختار دانه‌ها بدون اضافه کردن عناصر آلیاژی یا ذرات سرامیکی است. به طور خلاصه مزایای روش تغییر شکل شدید پلاستیک عبارتند از: امکان تولید مستقیم قطعات فلزی با ابعاد بزرگ و اندازه دانه‌های نانومتری؛ قابلیت انجام فرآیند به وسیله دستگاه‌ها و قالب‌های معمولی؛ امکان اعمال کرنش‌های شدید مومسانی بدون تغییر ابعاد نمونه‌ها؛ عدم وجود محدودیت در اعمال کرنش، زیرا از لحاظ نظری تعداد دفعات انجام فرآیندها نامحدود است؛ امکان تهیه نمونه‌های بسیار ریز دانه با ابعاد مناسب برای انجام آزمایش‌های مکانیکی؛ با وجود پیشرفت‌های انجام شده در زمینه تولید مواد نانومتری، هنوز اطلاعات کمی در مورد خواص مکانیکی این مواد وجود دارد. علت این مسئله دشواری تهیه مقدار کافی نمونه با ابعاد مناسب برای آزمایش‌های مکانیکی است. با استفاده از روش تغییر شکل شدید پلاستیک، حتی در آزمایشگاه می‌توان نمونه‌هایی با اندازه دانه بسیار ریز (زیر میکرونی یا نانومتری) برای انجام آزمایش‌های مکانیکی تولید کرد.

۱-۵- مفهوم تغییر شکل مومسان شدید

هنگامی که یک فلز در دماهای نه چندان بالا، تحت تغییر شکل مومسان قرار می‌گیرد، ساختار درونی فلز شروع به مقاومت در برابر تغییر شکل بیشتر می‌کند؛ در نتیجه برای ادامه تغییر شکل، باید مقدار تنش بیشتری اعمال نمود. به این حالت ایجاد شده در فلز، کار سختی و یا کرنش سختی^۱ گفته می‌شود. در واقع، کار سختی باعث افزایش استحکام و سختی فلز در اثر تغییر شکل می‌شود [۸]. در مقابل این افزایش استحکام، فلز نرمی^۲ خود را از دست می‌دهد و قابلیت تغییر شکل آن پایین می‌آید. بنابراین این محدودیت باعث می‌شود که افزایش استحکام بیشتر فلز توسط اعمال کار مکانیکی محدود شود، چرا که باعث شکست ماده خواهد شد. بسیاری از فرآیندهای شکل دهی صنعتی که بر روی فلزات انجام می‌گیرد، به خاطر این محدودیت فلزات، امکان افزایش استحکام فلز را تا مقدار مورد نظر ندارند [۹]. در روش‌های مرسوم، در برخی موارد هم محدودیت ابزار وجود دارد، به این معنی که اعمال کرنش بالاتر به ماده باعث خرابی دستگاه و ابزار آلات می‌شود [۱۰].

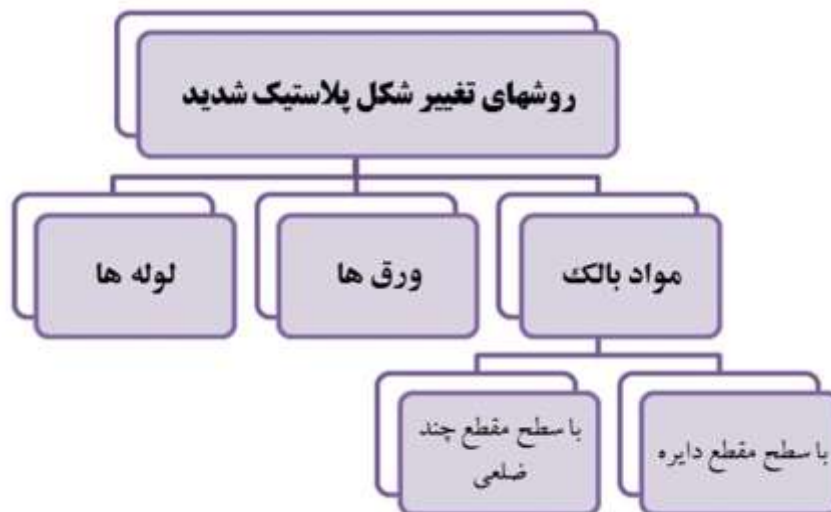
¹ Work hardening or Strain hardening

² Ductility

تغییر شکل شدید، در واقع مجموعه روش هایی است که طی آن می توان کار مکانیکی نسبتاً زیادی را به فلز اعمال نمود، بدون اینکه فلز دچار شکست و ترک خوردگی شود. واژه «شدید» به این خاطر اطلاق می شود که با توجه به تمهیداتی که در این روش ها انجام می گیرد، تغییر شکل شدیدی را می توان به فلز در مقایسه با سایر روش های معمولی شکل دادن فلزات اعمال نمود. نکته جالب توجه در روش تغییر شکل مومسان شدید این است که نه تنها موجب افزایش استحکام فلز می شود، بلکه در بسیاری از اوقات افت نرمی حذف شده و گاهی افزایش نرمی نیز مشاهده می شود. این موضوع دقیقاً وجه تمایز این روش با سایر روش های تغییر شکل مومسان است که علت این ویژگی خاص را باید در ساختار نانو ایجاد شده در فلز توسط روش تغییر شکل مومسان شدید جستجو نمود.

۱-۶- روش های تغییر شکل مومسان شدید:

روش های تغییر شکل شدید مومسان را با توجه به هندسه محصول این فرآیند، می توان به سه دسته اصلی تقسیم بندی نمود. این سه دسته شامل تغییر شکل شدید مواد بالک، ورق ها و تغییر شکل شدید لوله ها می باشد. شکل ۱-۵، دسته بندی کلی از روش های تغییر شکل مومسان شدید را نشان می دهد.



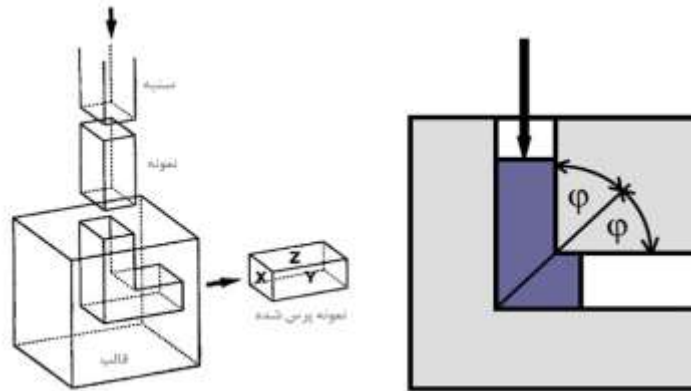
شکل ۱-۵- دسته بندی کلی روش های تغییر شکل مومسان شدید بر اساس شکل محصول [۴۲].

اگرچه این فرآیندها از نظر ماهیت تغییرات ریزساختاری تفاوت چندانی با همدیگر ندارند و همگی دچار تغییر شکل مومسان شدید می شوند، اما از نظر نحوه توزیع میدان های تنش و کرنش در فلز تحت تغییر شکل متفاوت خواهند بود. در ادامه به معرفی برخی از مهمترین و پرکاربردترین این روش ها پرداخته می شود.

۷-۱- فرآیندهای تغییر شکل مومسان شدید مواد بالک:

۱-۷-۱ فرآیند پرسکاری در کانالهای همسان زاویه‌دار^۱ (ECAP)

این روش که اکستروژن در کانال زاویه‌دار^۲ (ECAE) نیز نامیده می‌شود، به نوعی مادر روش های SPD محسوب می‌شود. قالب این روش، دارای یک کانال برای ورود قطعه مورد نظر است که در وسط مسیر کانال، دارای یک تغییر زاویه است. شماتیک این روش در شکل ۱-۶ نشان داده شده است.



شکل ۱-۶- شماتیک فرآیند ECAP با هندسه مکعبی (مقطع چهارگوش) و زاویه کانال 90° [۱۱ و ۱۲].

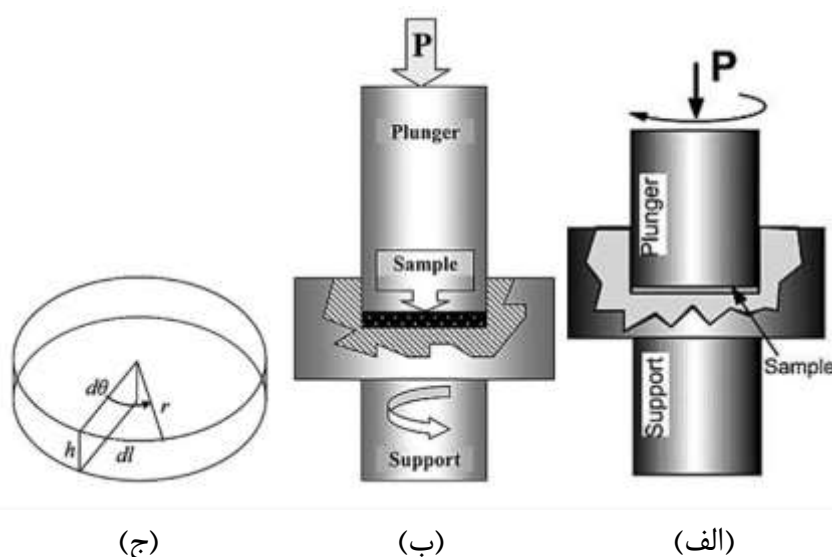
در این روش، فلزی که قرار است تحت تغییر شکل مومسان شدید قرار بگیرد، در کانال قرار گرفته و از بالا توسط یک سنبه به داخل کانال، فشرده می‌شود. قطعه فلزی حین عبور از کانال، با رسیدن به محل تغییر زاویه، شروع به خم و سپس بازخم می‌کند. در اثر این تغییر شکل سرتاسری که در قطعه اتفاق می‌افتد، کل قطعه به شدت تغییر شکل یافته و از انتهای دیگر قالب خارج می‌شود. شدت تغییر شکل به زاویه کانال بستگی داشته و همچنین شعاع گوشه‌ها و انحنای رئوس کانال در محل تغییر زاویه نیز از جمله پارامترهای کنترلی این فرآیند است. در اینجا باید توجه شود که چون قطعه فلزی تحت فرآیند، درون قالب مقید است و تحت تنش هیدرواستاتیک فشاری بالایی قرار دارد، امکان ترک خوردن و شکست قطعه وجود ندارد که این موضوع، همان وجه تمایز روش های تغییر شکل مومسان شدید با روش های مرسوم شکل‌دهی است.

¹ Equal Channel Angular Pressing

² Equal Channel Angular Extrusion

۲-۷-۱ پیچش با فشار بالا^۱ (HPT)

در این روش که شماتیک آن در شکل ۷-۱ آمده است، یک قطعه دیسکی شکل، همزمان تحت فشار عمودی و نیروی پیچشی قرار می‌گیرد. به این صورت که ابتدا دیسک فلزی درون قالب قرار گرفته، سپس یک سنبه وارد قالب شده و بر روی دیسک فشار مشخصی را وارد می‌کند، سپس همزمان و در حالی که فشار در حال اعمال شدن به دیسک فلزی است، سنبه شروع به چرخش خواهد نمود. البته در برخی حالت‌ها، پس از اعمال فشار، سنبه ثابت بوده و در عوض، قالب می‌چرخد.



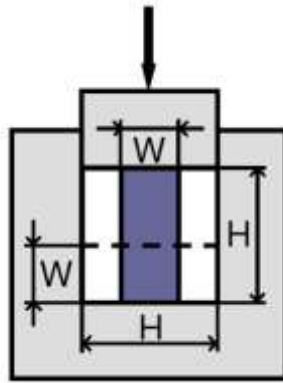
شکل ۷-۱- فرآیند پیچش با فشار بالا، (الف) با سنبه چرخان، (ب) با قالب چرخان و (ج) نمونه تحت فرآیند [۱۳]. این فرآیند نیاز به نیروهای نسبتاً بالایی دارد. پارامترهای کنترلی اصلی در اینجا، یکی مقدار فشار اعمالی است و دیگری مقدار زاویه دوران. باید توجه کرد که در این فرآیند، مقدار تغییر شکلی که به ماده دیسکی شکل اعمال می‌شود، با حرکت از لبه‌ها به سمت مرکز دیسک کاهش می‌یابد؛ به طوری که مرکز دیسک تقریباً کرنشی را متحمل نمی‌شود. بنابر این باعث می‌شود که از نظر توزیع کرنش، به جای یکنواختی، شیب کرنشی در راستای شعاعی وجود داشته باشد.

۳-۷-۱ فرآیند فورج چند جهته^۲ (MDF)

در این فرآیند، یک قطعه مکعب مستطیل شکل از یک محور با مقطعی به عرض W و ارتفاع H ، درون قالبی به عرض H تا ارتفاع W فشرده می‌شود. شکل ۸-۱، به طور شماتیک این فرآیند را نشان می‌دهد [۱۲].

¹ High Pressure Torsion

² Multi-directional Forging

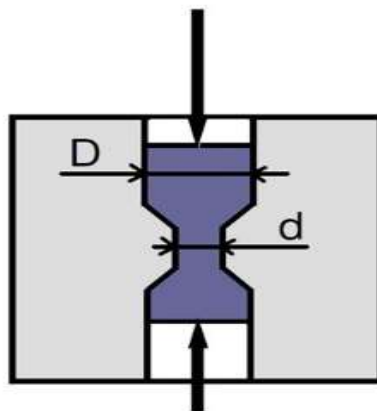


شکل ۱-۸- شماتیک فرآیند فورج چند جهته [۱۲].

طی این فرآیند، قطعه پس از یک تغییر شکل مومسان با درصد بالا، مجدداً به شکل مکعب مستطیلی با ابعاد اولیه باز می‌گردد. این فرآیند نیز همانند فرآیند ECAP می‌تواند مسیرهای مختلفی را برای پاس‌های بعدی تجربه کند؛ به خصوص اگر بعد سوم قطعه نیز دارای عرض W باشد. در این فرآیند باید دقت شود که نمونه به طور کامل در وسط قالب قرار بگیرد تا میزان کرنش به طور کنترل شده اعمال شود.

۱-۷-۴ فرآیند اکستروژن-فشردن تناوبی^۱ (CEC)

تصویر شماتیک فرآیند CEC در شکل ۱-۹ نشان داده شده است. در این فرآیند، یک میله با قطر D ، از قالبی که قطر داخلی آن در وسط مسیر به d کاهش می‌یابد توسط یک سنبه از بالا فشار داده شده تا این کانال کوچکتر اکستروژد شود. بلافاصله پس از خروج ماده از کانال اکستروژن، یک سنبه با فشار، نمونه را به سمت بالا فشرده می‌کند ولی فشار سنبه پایین به گونه‌ای است که مانع از اکستروژن ماده به سمت پایین نمی‌شود [۱۲].



شکل ۱-۹- شماتیک فرآیند آهنگری چند جهته [۱۲].

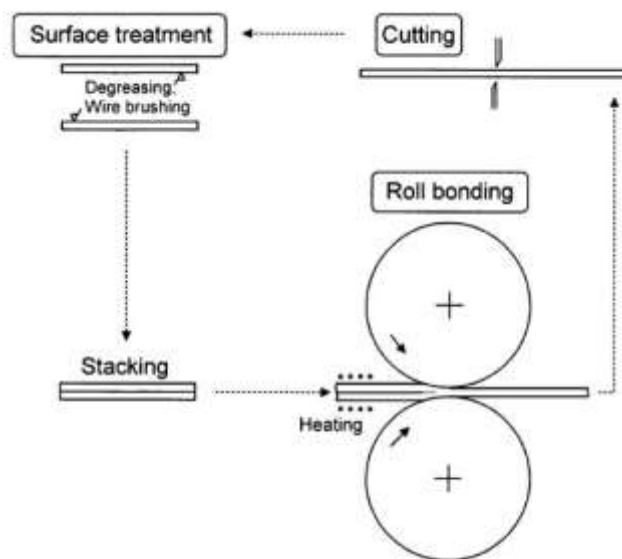
¹ Cyclic extrusion-compression

این فرآیند قابلیت انجام روی میله های با مقطع مستطیلی را نیز دارد که در این حالت و به خصوص در صورت مربع بودن مقطع، باز هم می توان همانند دو فرآیند ECPA و MDF، مسیرهای مختلفی برای پاس های بعدی فرآیند تعریف نمود.

۸-۱- فرآیندهای تغییر شکل شدید برای ورق ها:

۸-۱-۱ فرآیند پیوند نوردی انباشتی^۱ (ARB)

در این فرآیند، دو ورق با ضخامت t که یک سمت از هر کدام مقداری زبر شده است، از قسمت زبر شده روی همدیگر قرار گرفته و تحت عملیات نورد قرار می گیرند. فرآیند نورد باید به گونه ای باشد که ضخامت هر دو ورق را که روی همدیگر قرار دارند، را به ضخامت t برساند (یعنی میزان تغییر شکل برابر ۵۰٪ باشد). سپس این ورق دولایه که اکنون ضخامت t دارد، از وسط نصف شده، یک سمت از هر کدام زبر شده و روی هم قرار می گیرد. سپس مجدداً تحت فرآیند نورد به صورت ذکر شده قرار خواهند گرفت. تکرار این فرآیند باعث می شود که در هر پاس تغییر شکل نسبتاً بالایی به هر لایه اعمال و تغییر شکل مومسان شدیدی را در کل ورق سبب شود. این فرآیند به صورت شماتیک در شکل ۱-۱۰-۱ نمایش داده شده است.



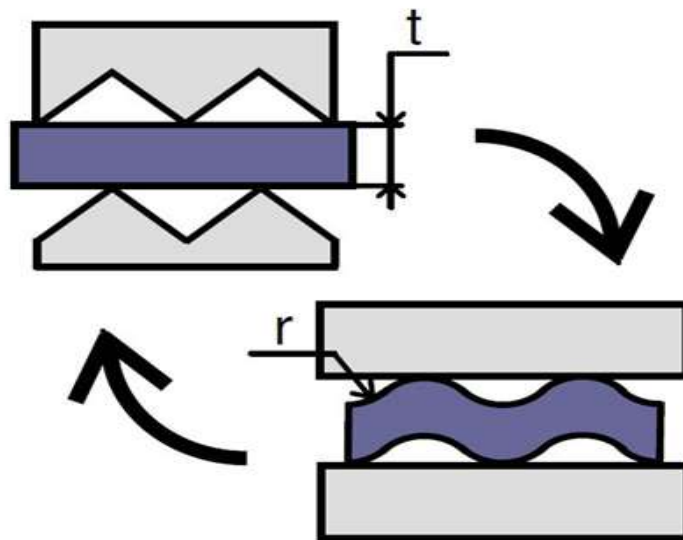
شکل ۱-۱۰-۱- تصویر شماتیک و مراحل فرآیند ARB [۱۴].

طبق این روش، اگر فرآیند تا ۱۰ پاس ادامه پیدا کند، در نهایت ورقی خواهیم داشت با ساختار لایه ای متشکل از ۱۰۲۴ لایه که هر کدام از این لایه ها دچار تغییر شکل مومسان شدید شده اند.

¹ Accumulative roll bonding

۲-۸-۱ روش کنگره دار کردن و صاف کردن متوالی^۱ (RCS)

در این روش، ورق ابتدا در یک قالب قرار گرفته تا به صورت کنگره ای شکل در بیاید. سپس این ورق کنگره ای در قالب دیگری قرار داده و مجدداً صاف می‌شود. تکرار این فرآیند سبب کرنش های مومسان شدید در ورق می‌شود. شکل ۱-۱۱ این فرآیند را نشان می‌دهد.

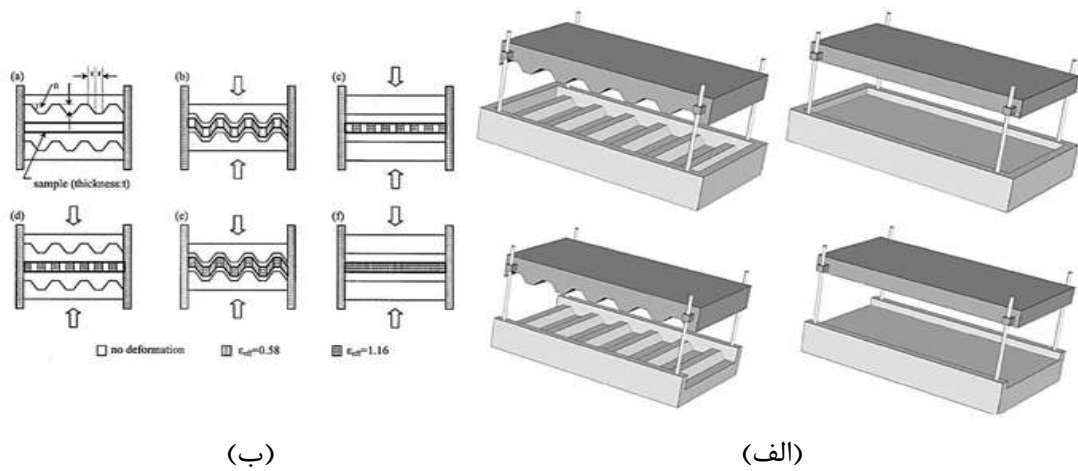


شکل ۱-۱۱- شمای کلی از فرآیند RCS [۱۲].

این روش، همانند برخی از روش های ذکر شده در بالا، خود دارای زیر مجموعه هایی است که به نوعی مدل های اصلاح شده این فرآیند است. به طور مثال، کنگره دار شدن ورق می‌تواند به جای یک مرحله، در دو مرحله انجام بگیرد، یعنی در پاس اول، نوارهایی از ورق بدون تغییر شکل باقی بماند. یکی از مشکلاتی که در روش RCS وجود دارد، مقداری افزایش در طول نمونه است که منجر به کرنش ناهمگن در ورق می‌شود. به همین خاطر روش پرس کاری در قالب شیاردار^۲ (CGP) که به نوعی منتج شده از روش RCS است ابداع شد. در این روش نیز همانند روش قبل، کنگره دار شدن ورق در دو مرحله اتفاق می‌افتد. شکل ۱-۱۲، مقایسه ای بین دو روش RCS و CGP را از نظر نوع قالب نشان می‌دهد و همچنین نحوه فرآیند کنگره دار کردن در دو مرحله را نشان می‌دهد [۱۵ و ۱۶].

¹ Repetitive corrugation and straightening

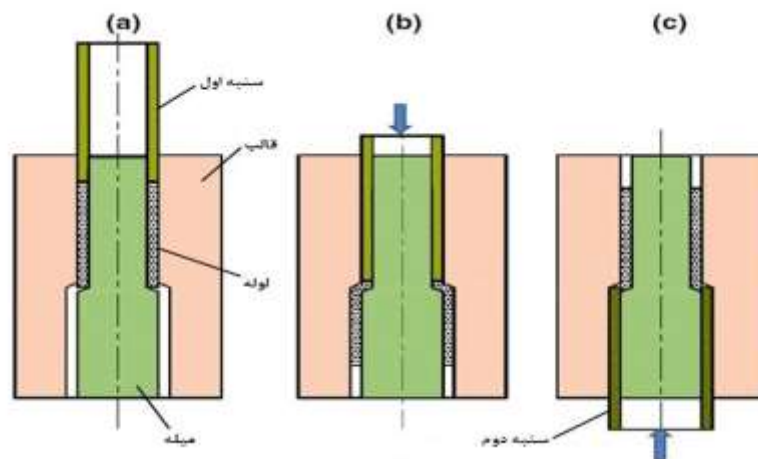
² Constrained Groove Pressing



شکل ۱-۱۲- (الف) مقایسه تفاوت دو روش CGP (بالا) و RCS (پایین) [۱۵]، (ب) فرآیند کنگره دار کردن دو مرحله‌ای [۱۶]

۱-۹- فرآیندهای تغییر شکل مومسان شدید برای لوله‌ها:

روش‌های تغییر شکل مومسان شدید برای لوله‌ها، از جمله روش‌های نسبتاً جدید است و قدمت کمتری نسبت به سایر روش‌های SPD دارد. از جمله برخی از این روش‌ها می‌توان به پیچش لوله با فشار بالا^۱ [۱۷] و یا روش پیوند چرخشی تجمعی^۲ [۱۸] اشاره نمود. ولی روش بهتری توسط فرجی و همکارانش [۱۹] با نام روش فشردن در کانال زاویه دار لوله‌ای موازی^۳ (PTCAP) ارائه شده که به نوعی^۴ شبیه فرآیند ECAP است. تصویر این فرآیند در شکل ۱-۱۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱-۱۳- مراحل مختلف فرآیند PTCAP برای ایجاد تغییر شکل مومسان شدید بر روی لوله‌ها [۱۹].

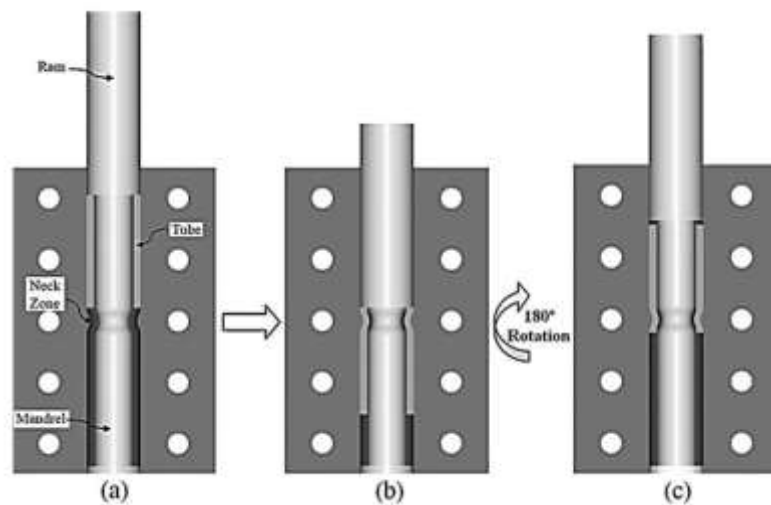
¹ High-pressure tube twisting

² Accumulative spin-bonding

³ Parallel tubular channel angular pressing

در این فرآیند دو مرحله ای، ابتدا لوله به درون منطقه با قطر بزرگتر اکستروژن شده که در نتیجه آن، قطر لوله بیشتر می شود، سپس مجدداً از همان مسیر اکستروژن معکوس شده تا به قطر اولیه خود باز گردد.

دو مرحله ای بودن و همچنین افزایش قطر لوله در اثر این فرآیند می تواند یکی از عیوب این فرآیند محسوب شود. شاید بهترین روشی که اخیراً برای لوله ها پیشنهاد شده است، روشی باشد که توسط زنگی آبادی و کاظمی نژاد [۲۰] با عنوان فشردن در کانال لوله ای^۱ (TCP) ارائه شده است. تصویر شماتیک این فرآیند در شکل ۱-۱۴ آورده شده است.



شکل ۱-۱۴- شمای کلی و مراحل فرآیند TCP [۲۰].

این فرآیند شامل یک قالب با کانال استوانه ای است که در وسط مسیر کانال، دارای یک گلوگاه با قطر کمتر از قطر اولیه می باشد. قطر داخلی لوله توسط ماندرل^۲ کنترل می شود که در وسط میله ماندرل، جایی که به گلوگاه کانال می رسد، قطر آن مشابه با گلوگاه کاهش می یابد؛ به طوری که فاصله بین گلوگاه و ماندرل همواره برابر قطر اولیه لوله است. سپس با یک سنبه لوله ای شکل (هم قطر با لوله تحت فرآیند) از بالا، لوله به داخل کانال فشرده می شود. طی این فرآیند (که به نوعی با فرآیند CEC برای مواد بالک مشابهت دارد)، لوله با رسیدن به گلوگاه، قطر آن کاهش یافته و با ادامه حرکت داخل کانال، مجدداً به قطر اولیه باز می گردد. هنگامی که سنبه به گلوگاه قالب رسید (شکل ۱-۱۴، b)، برای انجام پاس بعدی، فرآیند را می توان از سمت دیگر تکرار نمود. با توجه به ابعاد قالب، می توان از دو لوله پشت سر هم استفاده کرد تا کل لوله SPD شده از سمت دیگر بتواند خارج شود.

¹ Tube Channel Pressing

² Mandrel

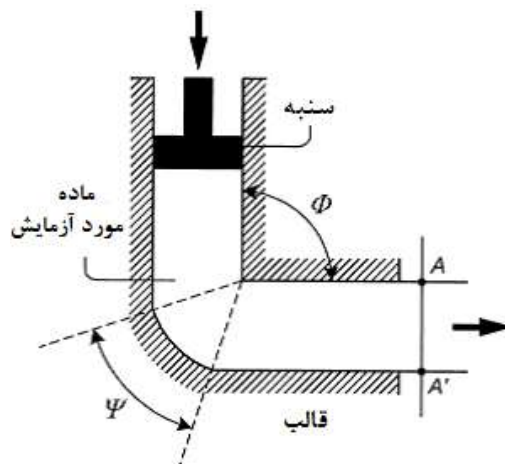
۱-۱۰- نتایج‌گیری از روش‌های تغییر شکل مومسان شدید

همانطور که مشاهده می‌شود، یکی از نکات قابل توجه در تمامی روش‌های تغییر شکل مومسان شدید، عدم تغییر ابعاد اولیه قطعه می‌باشد که این موضوع علاوه بر نانساختار کردن و بهبود خواص ماده، از ویژگی‌های منحصر به فرد روش تغییر شکل مومسان شدید است. میله ای فلزی را تصور کنید که پس از انجام فرآیند SPD، استحکام آن به شدت افزایش یافته، نرمی آن تقریباً حفظ شده و در عین حال، تغییر ابعادی ندارد. حال از این موضوع می‌توان به اهمیت بسیار بالای این روش در کاربردهای مهندسی پی برد. گاهی اوقات جهت کنترل خواص متالورژیکی نمونه و یا سایر خواص ماده، تغییر شکل مومسان شدید را در حالت گرم یا داغ انجام می‌دهند. برخی اوقات نیز بین پاس‌های مختلف فرآیند و یا پاس از پاس نهایی، نمونه‌های SPD شده را در کوره قرار داده و آنیل می‌کنند تا به خواص مورد نظر دست پیدا کنند. در برخی از موارد هم انجام آنیل باعث می‌شود که بتوان تعداد پاس‌های بیشتری را بدون ترک خوردن نمونه انجام داد. البته باید توجه شود که انجام فرآیند در دمای بالا و یا انجام آنیل‌های میانی و پایانی، نیاز به دقت‌های متالورژیکی بسیار بالایی دارد و باید طراحی بسیار دقیقی انجام بگیرد. روش‌های ذکر شده در این پایان‌نامه، فرآیندهای اصلی تغییر شکل مومسان شدید است که بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. ولی به طور کلی روش‌های انجام تغییر شکل مومسان شدید، محدود به فرآیندهای ذکر شده نیست. روش‌های نسبتاً زیادی وجود دارد که به نوعی اصلاح شده روش‌های قدیمی SPD است.

۱-۱۱- معرفی بیشتری از فرآیند ECAP و بررسی عوامل موثر در آن

یکی از مهم‌ترین روش‌های SPD، اکستروژن در کانالهای همسان زاویه دار (ECAP) است. فرآیند تغییر شکل در کانال‌های همسان زاویه دار توسط سگال و همکارانش معرفی شده است [۲۱]. در این فرآیند نمونه فلزی به داخل قالبی با کانال مشابه که نسبت به هم زاویه دار هستند اکستروود می‌شود. نمونه‌های مورد استفاده معمولاً استوانه‌ای یا چهارگوش هستند و در حین عبور از داخل کانال‌ها، در گوشه قالب تغییر شکل برشی ساده به نمونه اعمال می‌شود و اگر ابعاد دو کانال یکسان باشد، اندازه نمونه قبل و بعد از فرآیند تغییری نمی‌کند و می‌توان نمونه اکستروود شده را مجدداً در قالب ECAP تغییر شکل داد. میزان کرنش پلاستیک اعمال شده در هر سیکل ECAP به زاویه قالب و شعاع گوشه آن بستگی دارد که در قالبی با زاویه 90° تقریباً برابر با یک است. در این فرآیند مسیر کرنش اهمیت زیادی دارد و گزارش شده که چرخش نمونه بین سیکل

های ECAP می‌تواند باعث تغییر در شکل گیری ریزساختار ماده بشود. فرآیند ECAP روشی موثر جهت تولید مواد با ساختار UFG بوده تا از این طریق خواص مکانیکی و فیزیکی آنها را بطور چشم گیری بهبود بخشد [۴]. از دیگر مزایای این فرآیند می‌توان به دستیابی حجم بسیار قابل توجه از دانه های بسیار ریز درون مواد پلی کریستال برای مصارف صنعتی با قیمت مناسب اشاره نمود [۴]. طی فرآیند ECAP، ماده درون قالبی با دو کانال متقاطع و همسان فشرده می‌شود. این دو کانال تحت زاویه برخورد Φ به هم متصل شده‌اند و ممکن است در گوشه‌ی خارجی تقاطع دو کانال نیز انحنایی با زاویه‌ی Ψ وجود داشته باشد. شکل ۱-۱ این پارامترها را نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۱۵- نمای کلی از فرآیند ECAP [۲۱ و ۲۶].

با عبور ماده از تقاطع دو کانال تغییر شکل برشی ساده درون آن ایجاد می‌شود. با ثابت بودن سطح مقطع ماده در هر عبور (پاس) مقدار قابل ملاحظه‌ای کرنش مومسان مطابق رابطه‌ی ۱-۳ درون آن ایجاد می‌شود [۱۷].

$$\varepsilon_N = \frac{n}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \csc \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (۳-۱)$$

در این رابطه Ψ و Φ به ترتیب زوایای برخورد کانال‌ها (زاویه شیار)، انحنای خارجی (زاویه گوشه) قالب ECAP، n تعداد پاس انجام فرآیند و ε_N کرنش معادل^۱ به ازای هر مرحله انجام فرآیند ECAP می‌باشند. رابطه ۱-۳ بدون در نظر گرفتن ضریب اصطکاک بین سطح ماده با قالب و همچنین تاثیر ضریب کار سختی ماده بر روی رفتار سیلان آن محاسبه شده است. در این رابطه فقط تاثیر پارامترهای هندسی قالب در آن گنجانده شده است. یکنواختی ساختار و خواص مکانیکی ماده‌ی تولید شده به روش ECAP به میزان و نحوه کرنش

^۱ Total Strain

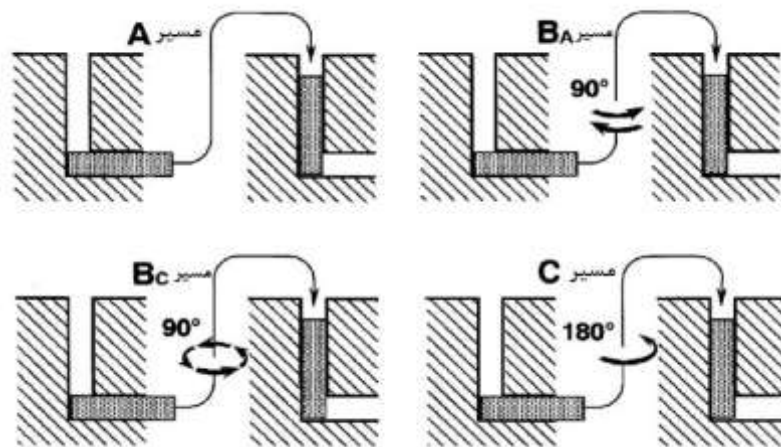
مومسان در حین سیلان ماده درون کانال های قالب بستگی دارد [۱۷]. از مهم ترین عواملی که بر این کمیت ها تاثیر

گذارند می توان به زاویه شیار Φ و زاویه ی گوشه Ψ قالب اشاره نمود.

۱-۱۲-۱- بررسی عوامل موثر در فرآیند ECAP

۱-۱۲-۱- تاثیر مسیر

با توجه به سطح مقطع نمونه ی تحت ECAP، می توان مسیرهای^۱ مختلفی برای این فرآیند انتخاب نمود. این مسیرها می تواند شامل چرخاندن نمونه برای پاس بعدی به میزان 180° حول محور اصلی نمونه و یا 90° (در صورت وجود تقارن) و همچنین شامل سر و ته کردن نمونه باشد. برخی از این مسیرها تنها برای نمونه های با مقطع چند ضلعی قابل اعمال است. شکل ۱-۱۶ نمونه ای از این مسیرها را که به عنوان مسیرهای اصلی هستند، مشخص کرده است. هر کدام از این مسیرها، میدان های تنش متفاوت و همچنین سیستم های لغزش مختلف در نمونه ها ایجاد می کنند. با توجه به تحقیقات انجام شده از ۴ مسیر موجود در ECAP مسیر B بیشترین تنش جریان را در قطعه ایجاد می نماید همچنین مسیر A مقدار میانگین از تنش جریان را در قطعه ایجاد می نماید و در نهایت پایین ترین مقدار تنش جریان را در قطعه مسیر C ایجاد می کند [۲۲].

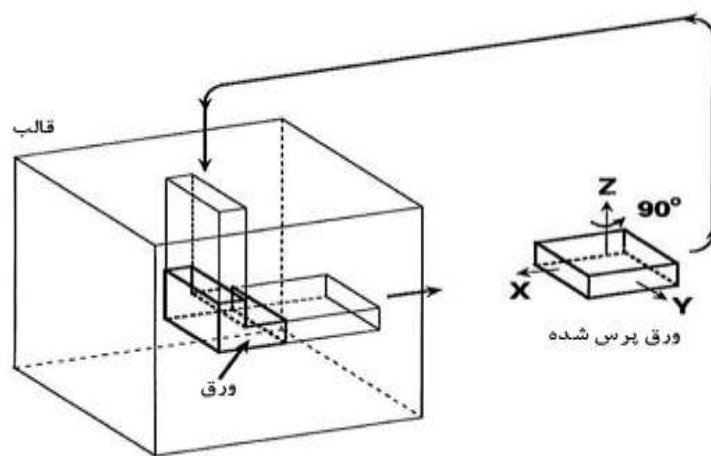


¹ Route

شکل ۱-۱۶- مسیره‌های مختلف اصلی برای روش ECAP [۲۲و۱۱].

در این تحقیق از مسیر Bc استفاده شده است. علت استفاده از این نوع مسیر تحقیقاتی بودن این پژوهش می‌باشد و می‌توان تاثیرات این فرآیند را بر روی آلیاژ مورد تحقیق طی مسیرهای مختلف دیگر مورد آزمون قرار داد.

هر یک از این مسیرها اثرات متفاوتی بر روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد و آلیاژ می‌گذارد. روش ECAP قابلیت اعمال بر روی ورق‌های ضخیم^۱ را هم دارد که در این حالت، مسئله مسیرهای مختلف، بیشتر خود را نشان می‌دهد. در شکل ۱-۱۷ این فرآیند نمایش داده شده است.



شکل ۱-۱۷- قابلیت انجام عملیات ECAP بر روی ورق‌های ضخیم [۱۱].

۲-۱۲-۱ تاثیر زاویه کانال

زاویه کانال مهمترین فاکتور عملی است، چون کرنش کل اعمال شده در هر مرحله را مشخص می‌کند. لذا بر طبیعت ریز ساختار نمونه پرس شده تاثیر مستقیم دارد. با این حال اکثر آزمایشات در زاویه 90° تا 120° انجام شده است و تلاش کمی برای مقایسه بین نتایج حاصل از قالب‌هایی با زوایای مختلف انجام شده است. آزمایشات نشان داده است که میزان کرنش مجموعه‌ای که در مرحله‌های ECAP اعمال می‌شود در ریز ساختار ECAP تعیین کننده نیست بلکه مهم این است که کرنش خیلی زیادی در هر مرحله اعمال شود. لذا در عمل، قالب ECAP ایده آل، قالبی با زاویه کانال 90° است. همچنین در فرآیندهای دیگر مانند چند مرحله اکستروژن نمی‌توان به ریز ساختار مشابه رسید، چون در هر مرحله کرنش کمی اعمال می‌شود. علی‌رغم بازدهی خوب قالب ECAP با زاویه کانال 90° ، در عمل هم، آسانتر از زمانی که زاویه قالب

¹ Plate

بیش از 90° است پرس می‌شود. برای برخی مواد خیلی سخت یا مواد با نرمی خیلی پایین نیاز به استفاده از زوایای بیشتر است. هرچند زاویه کانال کمتر از 90° کرنش بیشتری در هر مرحله اعمال می‌کند، اما آزمایشات نشان داده که اختلاف ریز ساختار کمی بین نمونه ECAP شده با قالب 90° و نمونه ECAP شده با قالب 60° است، ضمن اینکه نیرو بیشتری برای پرس نمونه در قالب با زوایای کمتر لازم است [۲۳ و ۲۴ و ۲۵].

۱-۱۲-۳ تاثیر زاویه مربوط به شعاع انحنای قالب

این زاویه نقش کمتری را در تعیین کرنش اعمال شده به نمونه ایفا می‌کند اما باعث کاهش منطقه مرده و همچنین هدایت نمونه به کانال خروجی می‌شود [۲۵].

۱-۱۲-۴ تاثیر سرعت پرس

معمولا فرآیند ECAP در پرسهای هیدرولیک که با سرعتهای بالا عمل می‌کنند انجام می‌شود، به طور معمول سرعت پرس در محدوده 1-10 mm/s است اما می‌توان قالب هایی ساخت که با دستگاه های آزمایش کشش و نیرو معمولی کار کند و در نتیجه محدوده سرعت پرس افزایش یابد. نتایج آزمایشات نشان داده است که سرعت پرس اثر چشمگیری بر روی اندازه تعادلی دانه ها که با ECAP شکل گرفته اند ندارد، ولی چون وقتی سرعت پرس کمتر باشد بازیابی ساده تر رخ می‌دهد ریز ساختار تعادلی تری تشکیل می‌شود. درکل سرعت پرس تاثیر زیادی ندارد [۲۶].

۱-۱۲-۵ تاثیر دمای پرس

دمای پرس یک فاکتور کلیدی در ECAP است، چون نسبتا به آسانی قابل کنترل است. با افزایش دمای پرس امکان تشکیل دانه های بزرگتر بیشتر است، همچنین در دمای پایین نسبت بیشتری از مرزهای بزرگ زاویه تشکیل می‌شود. به طور کلی هرچند در عمل فشردن در دمای بالا آسانتر است اما ریز ساختار ریز دانه مناسب زمانی به دست می‌آید که پرس در کمترین دمای ممکن انجام شود و از سوی دیگر ترک در نمونه ایجاد نشود [۱۱ و ۲۷ و ۲۸].

۱-۱۲-۶ تاثیر گرم شدن درونی حین ECAP

حین پرس امکان افزایش دما در نمونه وجود دارد، این افزایش دما در نقطه ای که نمونه از صفحه برشی عبور می کند رخ می دهد بسته به مقدار حد نهایت استحکام کششی^۱ (UTS) ماده ، میزان افزایش دما می تواند تا ۷۱ °C باشد همچنین با کاهش سرعت پرس می توان افزایش دما را کاهش داد [۲۹ و ۳۰].

۱-۱۲-۷ تاثیر نیروی پشتی

مزیت عمده در اعمال نیرو پشتی این است که منجر به بهبود زیادی در کارپذیری ماده می شود به عنوان مثال حین ECAP مس بدون نیرو پشتی پس از ۱۲ مرحله ترک هایی روی سطح قطعه به وجود می آید اما با اعمال نیرو پشتی تعداد مرحله ها تا ۱۶ یا حتی بیشتر قابل افزایش است بدون آنکه ترکی ایجاد شود. به طور مشابه نمونه قابل پیرسختی ۶۰۶۱ آلومینیوم در صورتیکه ECAP در دمای محیط و بدون اعمال نیرو پشتی انجام شود ترک می خورد، اما با اعمال نیرو پشتی نمونه تا ۴ مرحله بدون ترک خوردن ECAP می شود. مزیت دیگر نیرو پشتی، بهبود یکنواختی شار فاز حین عملیات ECAP در گوشه خارجی محل برخورد کانال ورودی و خروجی ناحیه مرده تشکیل می شود که باعث تغییر شکل ناحیه تغییر شکل از خط برش به پنکه ای شکل شده و تصفیه ریزساختار کمتر یکنواخت می شود خصوصاً در انتهای نمونه اعمال نیرو پشتی سبب پرشدن این گوشه شده و ناحیه تغییر شکل به باند برشی متمرکز نزدیکتر می شود [۳۱ و ۳۲].

۱-۱۲-۸ تاثیر تعداد مرحله

تعداد مرحله یکی از عوامل اصلی در کرنش موثر در ECAP می باشد که می تواند نقش مهمی را در تحقیق وارد نماید چرا که در هر مرحله میزان مشخصی از کرنش به ماده اعمال شده و با تکرار آن می توان به حداکثر کرنش ممکن و در نتیجه حداکثر میزان ریزدانه شدن و افزایش مرز دانه ها دست یافت [۱۱ و ۲۲].

۱-۱۳-۱ مشخصات آلومینیوم گروه ۷۰۰۰

آلیاژهای آلومینیوم -روی-منیزیم-مس در میان کلیه آلیاژهای آلومینیوم بیشترین پتانسیل پیرسختی (رسوب سختی)^۲ را دارند. در آلیاژهای پر استحکام این گروه از مس به مقدار کمتر از ۰/۳٪ ، برای افزایش مقاومت به خوردگی تنشی استفاده می شود. آلیاژهایی که فاقد مس یا دارای مقادیر اندکی مس هستند، به آسانی

¹ Ultimate Tensile Strength

¹ Precipitation hardening

جوشکاری می‌شوند. این آلیاژها در دمای محیط به طور قابل ملاحظه ای پیرسخت شده و محدوده وسیع دمایی برای عملیات محلول سازی آن‌ها وجود دارد. بنابراین در هنگام جوشکاری، استحکام آلیاژ بازیابی می‌شود و نیاز به عملیات حرارتی دیگری نیست. آلیاژهای آلومینیم-روی-منیزیم-مس در ابتدا برای ساخت پل های نظامی سبک مورد استفاده قرار گرفتند. امروزه برای کنترل ساختار این آلیاژها از عناصر کروم، منگنز و زیرکونیوم استفاده می‌شود. آلیاژهای آلومینیم-روی-منیزیم-مس بیشترین میزان پیرسختی را از خود نشان می‌دهند. نیاز صنایع نظامی به استفاده از آلیاژهای هواپیمایی که نسبت استحکام به وزن آن‌ها بالا باشد، در نهایت منجر به تولید آلیاژهای گروه Al-Zn-Mg-Cu شد. آلیاژ ۷۰۷۵ شناخته شده ترین آلیاژ این گروه است که دارای هدایت الکتریکی و حرارتی و استحکام بالا، ماشین کاری خوب همراه با مقاومت به خوردگی می‌باشد.

در این تحقیق از میلگردهای آماده آلیاژ ۷۰۷۵ آلومینیوم با قطر ۱۲ میلیمتر استفاده شده است. در جدول ۱-۱ برخی از خواص این آلیاژ پر کاربرد در صنایع نظامی و هوایی نشان شده است.

جدول ۱-۱- خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ [۴۶].

چگالی (g/cm ³)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/g. °c)	مدول کشسان (MPa)	نسبت پواسون	دمای بازپخت (آنیلینگ)
2.80	0.96	75000	0.33	413 °c

۱-۱۳-۱ مفهوم پیر سختی در آلومینیوم

پیرسختی شامل افزایش دما و دادن زمان به منظور نفوذ عناصر آلیاژی و تشکیل رسوبات می‌باشد. بنابراین همان گونه که استنباط می‌شود، مکانیزم اصلی پدیده رسوب سختی برپایه نفوذ عناصر آلیاژی و جوانه زنی و رشد رسوبات استوار می‌باشد که وجود نابجایی‌ها و جای خالی‌ها به عنوان فاکتورهای موثر در افزایش سرعت نفوذ و کاهش سد انرژی جوانه زنی و رشد، می‌توانند عواملی موثر و تاثیر گذار در فرایند رسوب سختی باشند. مهم ترین فرآیند عملیات حرارتی برای آلیاژهای آلومینیوم پیر سختی یا رسوب سختی است. برای استفاده از این روش، باید دیاگرام تعادلی آلیاژ دارای حلالیت جزئی در حالت جامد باشد و شیب خط انحلال بصورتی باشد که قابلیت انحلال در درجه حرارت های بالاتر بیشتر از قابلیت انحلال در درجه حرارت های پایین تر باشد. پیر سختی یکی از روش های استحکام بخشی به مواد فلزی با اضافه کردن ذره های سخت و

کاملاً پراکنده به آن است. با انتخاب مناسب عناصر آلیاژی اضافه شونده و عملیات گرمایی، می‌توان توزیع مناسبی از رسوب حالت جامد فاز دوم را در زمینه‌ای که آن رسوبات را در خود حل کرده است پدید آورد. اگر با این عمل فلز استحکام یافت آن را رسوب سختی می‌نامند، که روشی قابل استفاده در سطحی وسیع برای استحکام بخشی آلیاژهای عملیات حرارتی شونده آلومینیوم است.

۱-۱۴- پیشینه تحقیق

رعنایی و همکاران [۳۳]، تاثیر تغییر شکل مومسان بر ریز ساختار، خواص مکانیکی و هدایت الکتریکی مس خالص، طی فرآیند پرس در کانال‌های همسان زاویه دار طی هشت پاس بررسی نموده اند، که نتایج نشان می‌دهد از پاس چهارم به بعد با شکل‌گیری دانه‌های فوق‌العاده ریز در حد نانو نقش نابجایی‌ها در افزایش استحکام و سختی کاهش می‌یابد و مس ECAP شده دارای مقاومت زیاد در برابر سایش الکتریکی می‌باشد.

ناصری و همکاران [۳۴]، اثر سطح مقطع قطعه کار بر خواص مکانیکی تیتانیوم خالص تجاری طی فرآیند پرس در کانال‌های همسان زاویه دار بررسی نموده اند. نتایج نشان دهنده آن است که، سطح مقطع دایروی در مقایسه با سطح مقطع مربع نه تنها نیروی پرس کمتری نیاز دارد بلکه خواص مکانیکی ماده نظیر سختی و استحکام نسبتاً بهبود می‌یابد. که این خود به علت سیلان فلزی بیلت با مقطع دایروی و پرکردن گوشه‌های کانال مربعی و تحمل کرنشی اضافی در اثر این سیلان در کانال می‌باشد.

رعنایی و همکاران [۳۵]، عملکرد، ریز ساختار، هدایت الکتریکی و موارد دیگر مس ریز دانه شده طی فرآیند ECAP به عنوان الکتروود ابزار فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی بررسی نموده اند، که نتایج نشان می‌دهند پس از اعمال فرآیند ECAP، اندازه ساختار کریستالی مس به شدت کاهش یافته، سایش الکتریکی کمتر شده اما نرخ برداشت مواد تقریباً ثابت بوده و تغییر زیادی نکرده است.

ترنتف و همکاران [۳۶]، تاثیر ECAP بر استحکام خستگی تیتانیوم و آلیاژ زیرکونیم مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان دهنده این موضوع است که استفاده از پرسکاری در کانال‌های همسان زاویه دار باعث سخت شدن قابل توجه، افزایش استحکام خستگی، تنش بالا، افزایش استحکام کششی و تسلیم قطعه مورد نظر می‌شود. همچنین آلیاژ زیرکونیم خواص مکانیکی بهتری را در مقابل تیتانیوم نشان می‌دهد، خواص زیست

سازگاری بالاتری دارد و می‌تواند در امور پزشکی که نیاز به استحکام بالا و سازگاری با بدن دارد استفاده شود، همانند دندانپزشکی.

غلامی و همکاران [۳۷]، تاثیر زاویه کانال قالب و ضریب اصطکاک طی فرآیند ECAP بر روی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با استفاده از نرم افزار شبیه ساز Abaqus بررسی نموده اند، که نتایج نشان از این دارد که با افزایش زاویه کانال خروجی از 90° به 110° ، کرنش مومسان کاهش یافته و مقدار نیرو و گشتاور مورد نیاز نیز تقریباً به اندازه ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش ضریب اصطکاک مقدار کرنش مومسان در سیم افزایش یافته و مقدار نیرو و گشتاور مورد نیاز به اندازه ۱۲ درصد بیشتر می‌شود.

شبان و همکاران [۳۸]، تاثیر پارامترهای طراحی قالب ECAP بر نحوه سیلان و توزیع کرنش در حین تغییر شکل آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ بررسی شده است، نتایج نشان می‌دهد که در حین سیلان فلز از داخل قالب ECAP در محل تقاطع دو کانال بین نمونه و دیواره قالب، به دلیل خاصیت کارسختی ماده، فاصله هوایی ایجاد می‌شود که ایجاد شدن این فاصله هوایی باعث انحراف از حالت تغییر شکل برشی خالص و غیر یکنواختی کرنش اعمالی می‌شود. با افزایش زاویه قالب تغییر چندانی در یکنواختی توزیع کرنش ایجاد نمی‌شود. افزایش ضریب اصطکاک تا حدی باعث یکنواخت شدن توزیع کرنش می‌شود و افزایش بیش از حد اصطکاک منجر به غیر یکنواخت تر شدن توزیع کرنش خواهد شد.

کلانتری و همکاران [۳۹]، طی پژوهش صورت گرفته، روی فاکتورهای موثر بر پرسکاری درون کانال‌های همسان زاویه دار آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۳ طی چهار پاس، نتایج حاصله نشان از افزایش چشمگیر سختی به همراه ریز شدن دانه‌ها دارد و همچنین ترکیب فرآیند ECAP با عملیات پیرسازی همانند آلیاژهای دیگر موجب افزایش مضاعف در مقدار سختی نمونه‌ها می‌شود.

جایا کومر و همکاران [۴۰] بر روی رفتار مس فوق العاده ریز دانه و آلیاژ مس، کروم، زیرکونیم در فرآیند پرس در کانال‌های همسان زاویه دار تحقیق کردند و پس از مطالعه ساختمان میکروسکوپی ماده مشخص شد که اندازه دانه بندی آلیاژ پس از ۸ مرحله ECAP از $150 \mu\text{m}$ به 200nm کاهش می‌یابد. به این نتیجه رسیدند که مس فوق العاده ریز دانه و آلیاژ مس، کروم، زیرکونیم در دمای بالای 1000°C کاهش سختی در آن به وجود می‌آید، هر چند نشان دادند که این آلیاژ استحکام اندازه دانه بالایی در دمای 500°C را دارد.

گرادو و همکاران [۴۱]، رفتار مکانیکی آلیاژ مس، کروم توسط فرآیند اعمال فشار در کانال‌های همسان زاویه‌دار از نظر شکل دانه، ابعاد و موقعیت کریستالوگرافی و توزیع دانه مورد بررسی قرار دادند و تفاوت‌های قابل توجهی در ریز ساختار دانه و خواص مکانیکی آلیاژ مشاهده کردند.

ابراهیمی و همکاران [۲۶]، فرآیند اکستروژن در کانال‌های همسان زاویه‌دار، شبیه‌سازی فرآیند و بررسی تاثیر نوع مسیر در کرنش و یکنواختی آن را بررسی نمودند. که به کمک شبیه‌سازی المان محدود اثر کرنش و چگونگی کرنش در قطعه کار را بررسی شده است. و برای بررسی صحت بهترین توزیع نتایج آنها با نتایج آزمایشات عملی مقایسه شده‌اند. که در نهایت قالب با زاویه کانال 90° و مسیر کرنش BC را ارائه نمود.

بهلگردی و همکاران [۴۴]، اثر وقوع تبلور مجدد بر خواص مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار Cu-Zn-Al-Sn در طی فرآیند تغییر شکل مومسان شدید (ECAP) را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد مراحل عبور نمونه از کانال‌های همسان زاویه‌دار، میانگین قطر معادل دانه‌ها از میلی‌متر به میکرومتر کاهش یافته و تبلور مجدد دانه‌های جدید فاز α در زمینه فاز β مشاهده شده است. کاهش دمای استحاله مارتنزیتی در این آلیاژ حافظه‌دار از دیگر نتایج این بررسی بود. همچنین با افزایش تعداد مراحل عبور نمونه از کانال‌های مشابه زاویه‌دار سختی و فشار افزایش یافت.

مرادی و همکاران [۴۵]، مکانیزم تبلور مجدد و تشکیل مرزهای بزرگ زاویه‌دار در ساختار تغییر شکل داده توسط فرآیند (ECAP) آلیاژ آلومینیوم $A356$ حین گرمایش مجدد تا نفوذ فاز مذاب بررسی نمودند. تغییرات ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری (OM) و میکروسکوپ الکترونی با آشکارساز الکترون‌های برگشتی (EBSD) انجام شد. با افزایش دما پدیده‌های مختلفی در ساختار مانند رشد ریزدانه‌ها، تشکیل مرزهای بزرگ زاویه‌دار و انحلال ذرات سیلیسیم مشاهده می‌شود. نتایج EBSD نشان می‌دهد که مکانیزم غالب حین تحولات ساختار، رشد زیردانه‌ها توسط مکانیزم‌های یکپارچگی و مهاجرت مرزهای کم زاویه بوده و مکانیزم تبلور مجدد به صورت درجا (In-situ Recrystallization) می‌باشد.

شارعی و همکاران [۴۶]، ریز ساختار و خواص مکانیکی به همراه درمان پیرسختی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ طی فرآیند ECAP را بررسی نمودند. این آزمون در مسیر BC انجام گرفت، تصاویر TEM بدست آمده از میکروساختار نشان می‌دهد که مواد بسیار ریز دانه با اندازه کمتر از ۵۰۰ نانومتر طی سه الی چهار پاس می‌تواند بدست آید. همچنین میکروسختی و آزمون کشش نشان از بهبود خواص مکانیکی دارد.

رامش کومار و همکاران [۴۷]، ریز ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ طی فرآیند ECAP را بررسی نمودند. این آزمون در قالب با زاویه کانال 120° انجام شده است. نتایج نشان دهنده افزایش استحکام تسلیم، استحکام کشش نهایی و سختی به ترتیب و به میزان ۱۶۸، ۷۳ و ۹۳ درصد می‌باشد. میزان افزایش طول کاهش یافته است و تصاویر SEM نشان از کاهش اندازه دانه‌ها با افزایش تعداد پاس دارد.

ژائو و همکاران [۴۸]، ریز ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ طی فرآیند ECAP و تحولات آن حین پیرسازی طبیعی و بازپخت را بررسی نمودند. نتایج نشان دهنده افزایش استحکام تسلیم، استحکام کشش نهایی و سختی نمونه پیرسازی شده به ترتیب و به میزان ۱۰۳، ۳۵ و ۴۸ درصد می‌باشد. پس از بازپخت سختی نمونه به تدریج کاهش می‌یابد. این تحقیق نشان می‌دهد که تغییر شکل شدید مومسان باعث بهبود خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم پیرسختی شده می‌شود.

۱-۱۵- اهداف پژوهشی و مروری بر فصل‌های پایان نامه

یکی از روش‌های جدید تولید مواد با اندازه دانه نانومتری، روش تغییر شکل به کمک عبور در کانال همسان زاویه دار است. در این روش با اعمال کرنش‌های شدید به نمونه، اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری کاهش یافته و در مقابل خواص مکانیکی فلز بهبود چشم‌گیری می‌یابد. از آنجایی که تغییرات ابعادی ماده می‌تواند مانعی در مقابل میزان کرنش اعمالی باشد، اکثر روش‌های تغییر شکل شدید مومسان به نحوی طراحی شده‌اند که ابعاد نمونه حین فرآیند تغییر نکند. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که این فرآیندها، روش‌های مناسبی برای تولید مستقیم مواد فلزی با ابعاد بزرگ و اندازه دانه‌های نانومتری هستند. با توجه به کاهش اندازه دانه‌ها و افزایش چشم‌گیر استحکام نمونه‌های تولید شده با روش‌های مذکور، به نظر می‌رسد روش تغییر شکل شدید مومسان یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای تولید مواد فلزی با اندازه دانه نانومتری در مقیاس صنعتی می‌باشد.

در این تحقیق با ایجاد تغییر شکل مومسان شدید به واسطه عبور از کانال‌های همسان زاویه‌دار تلاش بر این داریم که یک ساختار ریز دانه با استحکام بالاتر از آلیاژ ۷۰۷۵ آلومینیوم که کاربرد بسیار زیادی در صنایع نظامی، هوایی و حتی پزشکی دارد داشته باشیم و با انجام آزمون‌های سختی و کشش بر روی نمونه‌های

ECAP شده میزان تغییرات در استحکام کششی و سختی ماده مورد نظر را بررسی می‌کنیم، تا در ادامه با تحلیل این داده‌ها به یک نتیجه دلخواه در ارتباط با تاثیر تعداد پاس‌های انجام شده در این فرآیند برسیم.

پایان نامه‌ی حاضر شامل چهار فصل می‌باشد. در فصل اول، مقدمه‌ای راجع به فرایندهای تغییر شکل شدید مومسان از جمله ECAP و ویژگی‌ها و پارامترهای موثر در آن، پژوهش‌های پیشین در این زمینه و اهداف پژوهش اشاره شد. فصل دوم، به آزمایش‌های تجربی اختصاص دارد، در فصل سوم نتایج و بحث در ارتباط با آزمون‌های صورت گرفته است و در نهایت فصل چهارم، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای ادامه فعالیت در این زمینه تحقیق شده ارائه شده است.

فصل ۲ آزمایش های تجربی

در این فصل به ارایه روش انجام آزمایش های ECAP ، مواد و ابزار مورد استفاده و نیز آزمایش های شناسایی انجام شده پرداخته می شود.

۲-۱- مواد و روش آزمایش

۲-۱-۱ ماده اولیه

در این تحقیق آزمایش ها با استفاده از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ انجام شد. ترکیب شیمیایی این ماده که با استفاده از روش اسپکترومتری نشری با همکاری بنیاد علوم کاربردی رازی به دست آمد، در جدول ۲-۱ نشان داده شده است.

جدول ۲-۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ مورد استفاده .

عنصر	SI	Fe	Cu	Mn	Zn	Mg	Ni	Ti	B
درصد وزنی	0.87	1.44	0.64	0.15	1.21	1.20	0.01	0.021	0.0014
عنصر	Ca	Cr	Pb	Sn	V	Ga	Bi	Zr	Al
درصد وزنی	Trace	0.02	0.13	0.003	0.01	0.01	<0.003	0.007	Base

از این آلیاژ به دلیل دارا بودن استحکام بالا در مقایسه با وزن پایین، مقاومت به خوردگی مناسب، در صنایع نظامی، هوایی و پزشکی استفاده می شود.

۲-۱-۲ اجزا و ساخت قالب ECAP

برای ایجاد تغییر شکل مومسان شدید بر روی ماده اولیه مورد نظر نیاز به طراحی و ساخت قالب ECAP می باشد، که با طراحی های انجام شده در نرم افزار سالیدورکز^۱ و مطالعه بروی خواص ماده اولیه قالب، اقدام به ساخت قالب شد، با توجه به این که جنس قطعه کار مورد نظر از استحکام بالایی برخوردار است و نیاز به نیروی بالای پرس برای انجام عملیات ECAP می باشد در انتخاب ماده اولیه قالب از مواد با استحکام مکانیکی بالا و قابلیت سخت کاری مناسب استفاده شد. با توجه به ویژگی های مورد نظر از فولاد VNC 4 جهت قسمت های داخلی و فولاد Mo 40 در بخش های خارجی، همچنین در ساخت قالب مورد استفاده از زاویه شیار 90° و زاویه گوشه 36° استفاده شد. در شکل ۱-۲ قالب ECAP مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۱-۲- قالب ECAP ساخته شده.

قالب مورد استفاده در این پژوهش دارای اجزای اصلی ذیل می باشد.

۱- سنبه ۲- سنبه گیر ۳- ماتریس کپه بالایی ۴- ماتریس کپه پایینی

¹ Solid works

اجزای فوق جزء اصلی ترین اجزای یک قالب ECAP می باشند . علت دو تکه شدن ماتریس ، امکان ساخت و اجرای زاویه انحنای 90° انتهایی کانال در این قالب می باشد . قسمت های مرکزی ماتریس که محل عبور نمونه می باشد، نیاز به سختی بسیار بالا و عملیات حرارتی دارد که آن از جنس VNC 4 ساخته شده است و پس از اتمام عملیات تراشکاری به کمک عملیات حرارتی سختی ماتریس را تا حد قابل ملاحظه ای بالا برده شده و به صورت پرسی داخل بدنه ماتریس قرار داده شده است. در این قالب از میل پران هایی که با اندازه های استاندارد در بازار موجود می باشد به عنوان سنبه استفاده شده است. مزیت استفاده از میل پران ها در این است که اندازه های اسمی دقیق و سختی های قابل ملاحظه ای داشته که قابل استفاده در این قالب به عنوان سنبه می باشد. یکی از معایب میل پران ها ترد بودن و شکنندگی بالای آن ها می باشد که در این آزمایش با استفاده از تعدادی میل پران با طول های متفاوت از شکنندگی در هنگام اعمال بار توسط دستگاه پرس جلوگیری شده است و به ترتیب از کوچکترین سنبه تا بلند ترین سنبه برای اعمال بار در قالب ECAP استفاده شده است. شکل ۲-۲ سنبه (میل پران) با طول های مختلف مورد استفاده در قالب را نمایش می دهد.

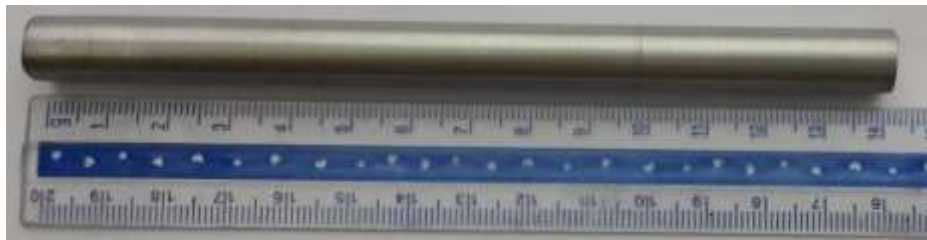


شکل ۲-۲- میل پران های مورد استفاده به عنوان سنبه.

۳-۱-۲ انجام فرآیند ECAP

برای انجام فرآیند ECAP به تعدادی ماده خام اولیه با ابعاد و سایز مشخص نیاز است. ماده خام اولیه که خصوصیات آن توضیح داده شد به طول $1/5$ m شاخه ای با قطر 12 mm تهیه شد. با توجه به ابعاد قالب و اندازه های داده شده برای آزمایش ماده خام اولیه به طول های 140 mm و به تعداد ۷ قطعه برشکاری شده است. نکته دیگر راجع به قطر ماده خام اولیه این است که با توجه به برابر بودن قطر ماتریس قالب و قطر ماده خام اولیه نیاز بود که جهت سهولت انجام آزمایش و کاهش نیروی پرس از قطر ماده خام اولیه به اندازه

۰/۰۵ تا ۰/۱ میلیمتر به وسیله سنباده کاسته شود. شکل ۲-۳ قطعات ماده خام اولیه که آماده سازی شده است را نمایش می دهد.



شکل ۲-۳- نمونه قطعه خام برش خورده و سنباده زده شده.

جهت ادامه فرایند ECAP نیاز به ماده روانکار قالب و دستگاه پرس هیدرولیک که سرعت حرکت آن قابل کنترل بوده می باشد. پرس مورد استفاده در این آزمایش یک دستگاه پرس هیدرولیکی با ظرفیت اعمال بار تا ۱۰۰ تن ، از شرکت JAV ARIA می باشد که در شکل ۲-۴ دستگاه پرس هیدرولیکی مورد استفاده در آزمایش، نمایش داده شده است.



شکل ۲-۴- دستگاه پرس هیدرولیکی ۱۰۰ تن مورد استفاده.

انجام فرایند ECAP به این گونه می باشد که ابتدا قسمت پایینی قالب را که ماتریس نام دارد به کمک روبنده ها به قسمت پایینی دستگاه پرس بسته شده و از ثابت شدن ماتریس در روی میز دستگاه پرس اطمینان پیدا می شود و سپس کوتاه ترین سنبه ای را که از قبل تهیه شده است را به همراه سنبه گیر داخل ماتریس قرار می دهیم تا از هم محور بودن سنبه و ماتریس و امکان جایجایی سنبه در هنگام سفت کردن مطمئن شده و وقتی که دو میز دستگاه را به یکدیگر نزدیک شوند به نحوی که میزان درگیری سنبه داخل ماتریس حفظ شده باشد، به محکم کردن قسمت سنبه گیر قالب به کمک رو بنده ها در میز بالایی دستگاه

پرس اقدام می‌کنیم. پس از اطمینان از محکم بسته شدن دو طرف قالب به میز های دستگاه پرس اقدام به فاصله دادن بین سنبه و ماتریس به کمک جابجایی میز دستگاه پرس می‌شود. این جابجایی باید به مقداری باشد که امکان قراردهی ماده خام اولیه داخل ماتریس را فراهم کند. لازم به ذکر است قبل از قرار دادن ماده خام اولیه داخل قالب نیاز به مقداری روانکار است. این روانکار قابلیت این را دارد که اصطکاک بین قطعه و بدنه داخلی ماتریس و میزان نیروی لازم برای پرس را به همین نسبت کاهش می‌دهد و از پوسته شدن قطعه کار جلوگیری می‌کند. روانکار استفاده شده در این آزمایش به نام Moly Slip EHT یکی از بهترین گریس های استفاده شده در فرآیند ECAP به دلیل داشتن ویژگی های خاص از قبیل کار در دمای بالای 250°C می‌باشد، این ماده روانکار حاوی دی سولفید مولیبدن و گرافیت است. شکل ۲-۵ ماده روانکار مورد استفاده را نشان داده است.



شکل ۲-۵- ماده روانکار EHT.

پس از آغشته کردن ماده خام اولیه به ماده روانکار Moly Slip EHT آن را داخل ماتریس قرار داده و توسط جابجایی میز دستگاه پرس اقدام به اعمال بار توسط سنبه روی ماده خام اولیه می‌شود. در طی مراحل انجام شده پرس میزان بار اعمالی متغیر می‌باشد و به نحوی که اعمال بار در فرآیند از 1 Ton به 12 Ton می‌رسید و متغیر بودن این میزان نیرو هم وابسته به سرعت پیشروی در نظر گرفته شده برای اعمال بار قالب بود. سرعت پیشروی بین $0.1 - 0.5 \text{ mm/s}$ انتخاب شد. با انجام آزمایش در دمای محیط طی ۳ پاس مشاهده شد که نمونه دچار ترک های زیادی شده است که می‌تواند به علت سختی و تردی همزمان قطعه

کار و یا افزایش چگالی مرز دانه ها باشد. در شکل ۲-۶ این عیب ایجاد شده در قطعه مشاهده می شود. جهت رفع این مشکل از المنت های حرارتی برای گرم نمودن قالب تا دمای 130°C استفاده شد. در طراحی قالب سوراخ هایی جهت نصب المنت ها تعبیه شده بود. در شکل ۲-۷ نحوه گرم کردن قالب توسط المنت های حرارتی مشاهده می شود.



شکل ۲-۶- بریده بریده شدن قطعه طی فرآیند در دمای محیط .



شکل ۲-۷- نحوه گرم کردن قالب توسط المنت های حرارتی.

در شکل ۲-۸ نمونه هایی از قطعات ECAP شده در دمای 130°C نمایش داده است.



شکل ۲-۸-نمونه ای از قطعات ECAP شده در پاس های ۲ و ۶ و ۱۰.

فرآیند ECAP به صورت گرم که به کمک قرار دادن المنت گرمایی داخل حفره هایی از قالب که از قبل طراحی شده انجام گرفت باعث شد که با افزایش دمای قالب و قطعه کار با نیروی پرس کمتری فرآیند را انجام داد. این فرآیند طی ۱۰ پاس صورت گرفت.

۲-۲- آماده سازی نمونه ها جهت آزمون شناسایی

به منظور انجام برخی آزمایش ها از قبیل آزمون سختی سنجی ، کشش و متالوگرافی نیاز است که نمونه به صورت کامل آماده سازی شود تا شرایط لازم را برای انجام آزمایش بدست آورد. در این تحقیق آزمون سختی

سنجی بر روی نمونه خام و پاس های ۰، ۱، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ تست کشش بر روی نمونه خام و پاس های ۱، ۲، ۴، ۶ و ۸ انجام شده است. که در ادامه به نحوه آماده سازی این نمونه ها جهت انجام این آزمایش ها پرداخته شده است. جهت متالوگرافی از نمونه خام، پاس ۱، ۲ و ۴ استفاده شد.

۲-۲-۱ نمونه برداری^۱

انتخاب نمونه های متالوگرافی که بایستی زیر میکروسکوپ آزمایش شوند، از اهمیت زیادی برخوردار است. نمونه بایستی نماینده تمامی یک قطعه باشد، به هنگام بررسی یک عیب از طریق متالوگرافی بایستی نمونه از محل آن عیب تهیه شود تا اطلاعات کاملی بدست آید. همچنین در بعضی موارد، بخصوص در مورد قطعات نورد شده، بدلیل ناهمسو بودن خواص در جهت نورد و در جهت عمود بر آن، لازمست تا نمونه برداری در هر دو جهت صورت گیرد. قطعات و نمونه های کوچک، پس از انجام عملیات سطحی مناسب بر روی آنها، مستقیماً جهت مطالعه، زیر میکروسکوپ قرار می گیرند. در صورتیکه اندازه و وزن یک قطعه زیاد باشد و یا اینکه قطعه دارای شکل پیچیده ای بوده و فاقد یک قسمت مسطح باشد، در اینصورت، لازم است که نمونه ای کوچک از قطعه بریده شده و تحت عملیات سطحی قرار گیرد.

نمونه برداری ممکن است به روشهای مختلفی انجام شود که معمولترین آنها عبارتند از:

الف) نمونه برداری از طریق بریدن

ب) نمونه برداری از طریق شکستن

در مواد نرم، نمونه برداری را می توان از طریق بریدن بوسیله اره و یا سایر ابزار برنده انجام داد. در موادی که دارای سختی بالایی هستند، عمل برش، با استفاده از دیسکهای کربوراندوم، الماس و غیره انجام می شود. نکته قابل توجه آن است که باید در حین برش از گرم شدن بیش از حد قطعه اجتناب شود، زیرا این امر می تواند به تغییر ساختار فلز منتهی شود.

همانگونه که اشاره شد، از عوامل مهمی که نتایج مطالعه به آنها بستگی دارد، انتخاب محل نمونه برداری و سطح مورد مطالعه می باشد. این انتخاب در حقیقت به موضوع مورد مطالعه و شکل یک قطعه بستگی دارد و به همین دلیل، در اینجا تنها می توان توصیه های عمومی را مطرح نمود. در فلزات و آلیاژهای ریختگی،

¹ Specimen Selection

مطالعه ریزساختارها بایستی در مقاطع (ضخامت‌های) مختلف انجام شود، زیرا با تغییر مقاطع، سرعت سرد شدن نیز در هر مقطع تغییر پیدا می‌کند و در نتیجه ساختارهای متفاوتی حاصل می‌شود.

۲-۲-۲ آماده سازی نمونه های سختی سنجی و متالوگرافی

به منظور انجام بعضی از آزمون‌ها از جمله سختی سنجی و متالوگرافی، نمونه‌ها باید دارای سطوحی صاف و صیقلی بوده و ثابت نگه‌داشته شوند. یکی از راه‌های ثابت نگه‌داشتن نمونه‌ها مانت کردن آنها است. این کار از طریق ثابت کردن نمونه در ماده‌های پلیمری انجام می‌شود. عملیات مانت را می‌توان به دو صورت سرد و گرم انجام داد. مانت سرد در مواردی که ماده‌ی مانت شونده دمای ذوب پایین داشته یا برای مانت پرسی گرم، شکننده باشد استفاده می‌شود. پلیمر مانت سرد از مخلوط یک نوع رزین و یک نوع هاردنر تشکیل می‌شود. این دو جزء با نسبت وزنی رزین به هاردنر ۱ به ۰/۴۵، توزیع شده و در ظرف‌های جداگانه و روی گرمکن به مدت ۲۰ دقیقه و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شوند. حرارت دادن باعث می‌شود که در هنگام مخلوط کردن، این دو ماده با هم واکنش داده و سفت شده و باعث محکم نگه‌داشتن نمونه‌ها شود. سپس مخلوط را در قالب‌هایی که از قبل با گریس چرب شده و نمونه‌ها درون آنها قرار داده شده، می‌ریزیم. بسته به حرارت مخلوط و مدت هم‌زدن، بین ۱ تا ۱۰ ساعت طول می‌کشد تا رزین کاملاً سفت شود. سپس نمونه‌ها از قالب مانت خارج شده و آماده‌ی استفاده در آزمون‌های بعدی می‌شود. یکی دیگر از روش‌های آماده‌سازی نمونه‌ها جهت سختی سنجی و متالوگرافی قرار دادن نمونه‌های برش خورده به صورت پرسی در داخل مقطعی از تفلون برش خورده می‌باشد. به کمک این روش می‌توان نمونه را ثابت نگه‌داشته و قابلیت پولیش کاری نمونه را افزایش داد. پس از مانت کردن، نمونه‌ها با کمک دستگاه پولیش مطابق شکل ۲-۹ سنباده زنی و پولیش می‌شوند. سنباده زنی از کاغذهای سنباده به ترتیب با شماره‌های ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰ یعنی از دانه درشت به دانه ریز استفاده می‌شود. پس از سنباده زنی نمونه‌ها پولیش می‌شوند. در مرحله‌ی اول، پولیش با خمیر ۳-۴ میکرون و در مرحله بعدی با خمیر ۰.۵ - ۱ میکرون انجام می‌شود تا سطح نمونه‌ها کاملاً صیقلی و آینه‌ای شود. و پس از این مراحل نمونه، آماده‌ی آزمون‌های بعدی می‌شود. شکل ۲-۱۰ نمونه‌های مانت و پولیش شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۹- دستگاه پولیش نیمه اتوماتیک مورد استفاده.



شکل ۲-۱۰- نمونه های پولیش خورده جهت آزمون های سختی سنجی و متالوگرافی.

۲-۳- سختی سنجی

معمولاً اصطلاح سختی به خاصیت اجسام در مقابل نفوذ جسم دیگری به سطح آنها و میزان مقاومت و نفوذپذیری آنها اطلاق می شود. رایج ترین آزمایش سختی، مشتمل بر حرکت یک جسم نفوذ کننده و یا فرو رونده بدخل جسم مورد آزمایش و ثبت نیروی لازم برای این کار و یا اندازه گیری مقدار فرو رفتگی در برابر یک نیروی معین می باشد، که این آزمایش، آزمایش سختی فرو روندگی نامیده می شود. چنانچه جرم معینی از یک ارتفاع مشخص بر روی سطح قطعه (که خاصیت الاستیک زیادی دارد) مورد آزمایش انداخته شود و مقدار واجهش آن جرم معین اندازه گرفته شود، به این آزمایش، آزمون سختی واجهشی گفته می شود. ساده ترین نوع سختی سنجی، خراشیدن سطح جسم نمونه به وسیله یک سوهان می باشد. مقدار خراشهای ایجاد شده از نظر کمی و کیفی نشان دهنده میزان سختی نسبی جسم خواهد بود. مقدار ساییدگی سطح جسم تحت شرایط تعیین شده، به عنوان سختی سایشی و مقاومت در مقابل سایش نامیده می شود. اصول سختی سنجی بر پایه اندازه گیری مقاومت جسم در مقابل فرو رفتگی است که اساس و مبنای دستگاههای اندازه گیری مختلف می باشد. ابزار فرو رنده، در جسم، در آزمون سخت سنجی ممکن است به صورت ساچمه، مخروط ناقص، یک سطح و یا هرم باشد که معمولاً از فولاد سخت یا الماس ساخته شده و تحت یک نیروی ایستا (استاتیک) بکار برده می شود. در سختی سنجی فرو روندگی، به دو طریق ممکن است سختی را اندازه گیری نمود. یا باری که بایستی تا عمق معینی فرو رفتگی را ایجاد نماید، اندازه گیری می شود و یا مقدار

گودی ایجاد شده توسط یک بار مشخص اندازه گرفته خواهد شد. در آزمایش واجهش، یک بار متحرک و یا ضربه ای بر روی سطح قطعه مورد آزمایش انداخته می شود. مقدار واجهش اندازه گرفته شده، سختی قطعه مورد آزمایش را نشان می دهد. شاید متداول ترین آزمایش های سختی سنجی بر روی فلزات، آزمونهای برینل و راکول باشد، هر چند انواع آزمایشات سختی سنجی دیگری نیز امروزه با توجه به زیاد شدن فولادهای سخت و سخت تر شدن سطوح فولادها مورد استفاده قرار گرفته اند. این آزمایشات شامل سختی سنج شور، ویکرز، مونوترون (آزمایش با گلوله الماس)، راکول سوپرفیشیال (سختی سطحی راکول) و سختی سنج هربرت می باشد. همچنین لزوم تعیین سختی قطعات بسیار نازک، قطعات بسیار ریز و تعیین گرادیان سختی (افت نسبی سختی) در فواصل بسیار کم و در لایه های نازک، سبب ابداع دستگاههای ریز سختی سنج ها مثل ریز سختی سنج ویکرز شده است.

۲-۳-۱ اندازه گیری سختی

برای اندازه گیری سختی نمونه ها، از دستگاه میکرو سختی سنج ویکرز متعلق به شرکت Bareiss استفاده شده است. این دستگاه شامل اسکوپ نوری و یک فرورونده ویکرز می باشد که به یک رایانه متصل بوده و خروجی را نمایش می دهد. فرورونده ویکرز، به شکل یک هرم با قاعده ی مربعی و با زاویه ی رأس 136° است. این فرورونده بسته به نیاز از 0.02 kg تا 10 kg به جسم نیرو وارد کرده و در آن نفوذ می کند. فرورونده به مدت ۱۰ ثانیه نیرو به جسم وارد کرده و سپس به حالت اولیه باز می گردد. با وارد شدن بار، اثری به شکل لوزی روی جسم باقی می ماند که با قرار دادن خطوط اندازه بر روی نقاط گوشه این لوزی به کمک رایانه و نرم افزار مخصوص آن، به صورت خودکار سختی را اندازه گیری می کند. شکل ۲-۱۱ این دستگاه را نمایش داده است.



شکل ۲-۱۱-دستگاه اندازه گیری میکرو سختی ویکرز.

۲-۴- متالوگرافی و کاربرد آن

متالوگرافی، شاخه‌ای از علم متالورژی است که به مطالعه میکروسکوپی ویژگی‌های ساختاری یک فلز یا آلیاژ به منظور مشاهده اندازه دانه، شکل و توزیع فازهای مختلف و ناخالصی‌هایی را که روی خواص مکانیکی یک فلز تأثیر عمیقی دارد می‌پردازد. ساختمان میکروسکوپی عبارت است از مطالعه ساختمان داخلی فلزات از نظر توزیع دانه بندی و فازهای تشکیل دهنده در زیر میکروسکوپ که با بزرگنمایی‌های بالا صورت می‌گیرد.

مطالعات ساختاری فلزات و آلیاژها، در زیر میکروسکوپ در دو مقیاس به شرح زیر انجام می‌شود:

(۱) بررسی و مطالعه ماکروسکوپی^۱

(۲) بررسی و مطالعه میکروسکوپی^۲

مطالعه میکروسکوپی ساختار فلز و آلیاژها

¹ Macroscopic Examination

² Microscopic Examination

مطالعه ساختار درونی مواد در زیر میکروسکوپ را، تحت بزرگنمایی های بالا مطالعه میکروسکوپی و ساختار مشاهده شده در چنین حالتی، ساختار میکروسکوپی می نامند. بر حسب بزرگنمایی مورد نیاز می توان فازهای یک ساختار، تعداد، شکل و توزیع آنها را با استفاده از میکروسکوپ های نوری و الکترونی، مورد بررسی و مطالعه قرار داد. لازم به ذکر می باشد که نمونه ها در این نوع بررسی ها، بایستی بعد از انجام عملیات سطحی، مورد مطالعه قرار گیرند. برخی از کاربردهای متالوگرافی در بررسی میکروسکوپی ساختار مواد فلزی به شرح زیر می باشد:

الف: تعیین و تشخیص فازهای تعادلی و غیر تعادلی

ب: تعیین روش تولید و عملیات انجام شده بر روی قطعه

ج: متالوگرافی کمی (تعیین اندازه دانه ها و آخالها، به ویژه تعیین اندازه دانه های فاز زمینه و یا تعداد آخالهای موجود در یک آلیاژ.

۲-۴-۱ وسایل و تجهیزات مورد استفاده در متالوگرافی

مشاهده ساختار میکروسکوپی مواد اغلب با دو وسیله میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی صورت می گیرد. حوزه بزرگنمایی این دو میکروسکوپ با هم متفاوت است، میکروسکوپ نوری بزرگنمایی در حد بین ۲۰ تا ۲۰۰۰ مرتبه دارد و برای مطالعه مواردی نظیر ساختار میکروسکوپی (دانه های جسم) مورد استفاده قرار می گیرد. در حالی که در تحقیقات عالی که نیاز به بزرگنمایی های بسیار بالا می باشد از میکروسکوپ الکترونی استفاده می شود. میکروسکوپ الکترونی امروزه از مدرنترین دستگاه های تحقیقاتی است که بزرگنمایی آن حدود ۳۰۰۰۰۰ مرتبه است و البته هر روزه میکروسکوپ های قویتر و گرانتر ساخته شده و در اختیار مراکز تحقیقاتی جهان قرار می گیرد. میکروسکوپ نوری دستگاه آشنایی است که با طرح های گوناگون به بازار عرضه شده است. این میکروسکوپ ها بر حسب یکی از دو حالت عبور نور از داخل نمونه و یا بازتاب (انعکاس) آن از سطح نمونه به دو دسته عبوری (شفاف) و انعکاسی طبقه بندی می شوند. در متالوگرافی و شناخت ساختار میکروسکوپی مواد و فلزات چون بیشتر مواد کدر هستند لذا نور از آنها عبور نمی کند، در نتیجه در متالوگرافی بیشتر از میکروسکوپ انعکاسی استفاده می شود. اولین مرحله آماده کردن نمونه برای مشاهده زیر میکروسکوپ، ساییدن و پرداخت کردن آن تا مرحله آینه ای است که در بخش ۲-۲ توضیح داده شد، در این وضعیت تمام قسمت های سطح نمونه، نور را به داخل عدسی منعکس می کنند، در نتیجه هیچگونه ساختار میکروسکوپی مشاهده نمی شود. با عمل اچ کردن (حک کردن) مرز بین دانه ها مرئی می شوند.

معمولا برای انجام این کار، سطح پرداخت شده را در معرض تاثیر نوعی ماده شیمیایی قرار می دهند. تاثیر ماده شیمیایی روی نمونه، با خوردن مرز بین دانه ها شروع می شود. مرز بین دانه ها در اثر خورده شدن بصورت شیارهایی ظاهر می شود. نورهای منعکس شده از شیارها تغییر مسیر داده و به عدسی چشمی نمی رسد، در نتیجه مرز بین دانه به صورت خطوط تیره ظاهر می شوند. ادامه عمل اچ کردن با خورده شدن سطح دانه ها همراه است. سرعت خورده شدن سطح دانه به جهت استقرار صفحات بلورین آن بستگی دارد. سرعت واکنش شیمیایی در همه جهات یکسان نیست، لذا سطح برخی از دانه ها سریعتر از سطح دانه های دیگر خورده می شوند. آن دانه هایی که طوری جهت گیری شده اند که نور منعکس شده از آنها به داخل میکروسکوپ بر نمی گردد، تیره دیده می شود.

۲-۴-۲ میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی

میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۱ (FE-SEM) یکی از بهترین روش های آنالیزی است که امروزه در حوزه های مختلف از جمله فناوری نانوکاربردهای فراوانی دارد. این میکروسکوپ، امکان بررسی و آنالیز شیمیایی، ترکیب، خصوصیات سطح و ریزساختار داخلی را در ابعاد میکرونی و نانومتری فراهم آورده است. در میکروسکوپ الکترونی معمولی از فیلامنت تنگستنی به عنوان منبع تولید پرتوی الکترونی استفاده می شود که قدرت کمی در متمرکز کردن پرتوی الکترونی بر روی هدف دارد که این امر موجب کاهش وضوح تصویر می شود، در میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از تک کریستال برای تولید پرتوی الکترونها استفاده می شود که فوکوس بسیار بالایی بر روی ناحیه هدف داشته و تا بزرگنمایی های بسیار بالا در حدود ۷۵۰۰۰۰ برابر نیز همچنان کیفیت تصویر حفظ می شود. امروزه همراه با میکروسکوپ الکترونی، دستگاه آنالیز اشعه X نیز وجود دارد که می تواند آنالیز کمی ترکیب شیمیایی را نیز در یک حجم کوچک ارائه دهد. اصول کلی دستگاه میکروسکوپ الکترونی بدین صورت است که یک دسته پرتو الکترونی توسط ایجاد ولتاژ بسیار بالا (حدود 50KV) از یک فیلمان حرارت دیده شتاب داده می شوند، این الکترونها از میان عدسی های مغناطیسی عبور کرده و بصورت متمرکز شده بر روی سطح نمونه (آلیاژ) تابیده می شود و موجب می شود که الکترون هایی از سطح نمونه خارج شوند، این الکترونها توسط یک کلکتور جمع آوری شده و توسط آمپلی فایر تقویت شده و بر روی صفحه تلویزیونی رویت می شود و اطلاعات دقیقی از سطح نمونه بدست می دهد

¹ Field Emission Scanning Electron Microscope

که می توان آن را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. شکل ۲-۱۲ دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (TESCAN-MIRA3) مورد استفاده در این پژوهش را نمایش می دهد.



شکل ۲-۱۲- دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد استفاده .

۵-۲- عملیات آماده سازی و تهیه یک مقطع متالوگرافی

تحقیق بر روی ساختار فلزات به وسیله یک میکروسکوپ، تنها وقتی امکان پذیر است که پرتوهای نوری تابیده شده به سطح فلز، با شدت نسبتاً زیادی از این سطح منعکس شود. به همین دلیل، سطح نمونه بایستی تحت عملیات سطحی خاصی، آماده شود. نمونه‌ای که سطح آن جهت بررسی میکروسکوپی آماده شده است مقطع نامیده می‌شود. برای تهیه یک مقطع بایستی نمونه‌ای از فلز مورد مطالعه، بریده شده و سطحی صاف و صیقلی تهیه شود. مراحل آماده سازی یک مقطع جهت بررسی و مطالعه میکروسکوپی به چهار قسمت نمونه برداری، قالبگیری و سنباده زنی نمونه که در بخش ۲-۲ توضیح داده شد و ظاهر سازی ساختمان ماده (اچ کردن) تقسیم می‌شود.

۵-۲-۱- ظاهر سازی ساختمان - اچ کردن^۱

اچ کردن عبارتست از استفاده از محلولی که با ایجاد خوردگی در نقاط پر انرژی سطح نمونه مثل مرز دانه‌ها و فازها باعث آشکار شدن دانه‌بندی، فازها و اجزای ریزساختار، همگنی ریز ساختار، پوشش، فصل مشترک ها، HAZ، الگوی دندریتی، جدایش، تغییر فرم و دسته ای شدن^۲ می‌شود. اچ به سه صورت غوطه وری، مالشی و الکترولیتی (الکترواچ) قابل انجام است. برای اچ کردن، نمونه تمیز و صیقلی شده را در محلول اچ کننده مناسب فرو می‌برند. محلول های اچ کننده، از حل کردن اسیدهای آلی و غیر آلی، قلیائی ها یا سایر

¹ Etching

² Banding

مواد آمپلکس، در حلال هایی از قبیل آب، گلیسرین، یا گلیکول تشکیل می شوند. این مواد اثری بسیار قوی دارند و بایستی با احتیاط بکار برده شوند. چون هر محلول برای هدف خاصی ساخته شده، لذا هنگام ظاهر کردن ساختاری که مورد نظر است، در انتخاب محلول بایستی نهایت دقت را بکار برد. جدول ۲-۲ محلول اچ مناسب جهت آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده شده در این تحقیق را نمایش می دهد.

جدول ۲-۲- محلول اچ مناسب جهت آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده.

نام محلول اچ کننده	ترکیب بندی	مقدار (ml)	زمان نگهداری (s)
	آب مقطر	۱۹۰	
کِلِر Keller	نیتریک اسید	۵	۱۰ تا ۳۰
	هیدروکلریک اسید	۳	
	هیدرو فلئوریک اسید	۲	

معمولا برای اچ کردن نمونه، آن را با انبری نگه داشته و از طرف سطح صیقلی شده درون ظرف کوچکی که قسمتی از آن توسط محلول مورد نظر پر شده، غوطه ور می کنند. از طرفی می توان بوسیله پارچه کتانی که از محلول اچ اشباع شده است، نمونه را اچ کرد. پیشرفت اچ شدن را می توان با چشم دید ولی بایستی زمان نیز کافی باشد. زمان اچ کردن مناسب را بایستی بطور تجربی یافت و ممکن است از چند ثانیه تا یک دقیقه یا بیشتر متغیر باشد. هرگاه نمونه ای به اندازه کافی اچ نشده باشد، بعد از نخستین غوطه وری، این فرآیند ممکن است تکرار شود. هرگاه نمونه زیاد اچ شده باشد، بایستی آنرا صیقلی نموده و مجددا اچ کرد. بلافاصله بعد از اچ کردن، نمونه را بایستی با آب گرم شست تا عمل اچ شدن آن متوقف شود، سپس در الکل فرو برده و سرانجام در معرض وزش هوای گرم، خشک کرد. بنابراین به منظور جلوگیری از لکه آب، خشک کردن سریع، مهم است. بطور کلی اجزا ساختاری، در اثر اچ شدن ترجیحی ظاهر می شوند، بدین معنا که بعضی از سطوح، مانند مرز دانه ها، خیلی بیشتر از سطوح دیگر دارای تنش بوده و در نتیجه در معرض خورده شدن بیشتر توسط ماده اچ کننده قرار می گیرند. سرعت اچ شدن نیز برای صفحات کریستالوگرافی مختلف، فرق می کند و درجات متغیری از نور منعکس شده با سایه حاصل از دانه های مختلف، ایجاد می کند.

۲-۵-۲ روش اندازه گیری دانه

مطالعه ساختار درونی مواد در زیر میکروسکوپ، تحت بزرگنمایی های بالا مطالعه میکروسکوپی و ساختار مشاهده شده در چنین حالتی را ساختار میکروسکوپی می نامند. بر حسب بزرگنمایی مورد نیاز می توان

فازهای یک ساختار، تعداد، شکل و توزیع آنها را با استفاده از میکروسکوپ های نوری و الکترونی، مورد بررسی و مطالعه قرار داد. لازم به ذکر می باشد که نمونه ها در این نوع بررسی ها، بایستی بعد از انجام عملیات سطحی، مورد مطالعه قرار گیرند. از کاربردهای متالوگرافی در بررسی میکروسکوپی تعیین اندازه دانه ها و آخالها در ساختار مواد فلزی می باشد، که ما در این پژوهش به دنبال مقایسه اندازه دانه ها طی مراحل انجام گرفته از فرآیند ECAP می باشیم. سه روش اساسی برای تخمین اندازه ی دانه ها به وسیله ی ASTM توصیه شده است که عبارتند از: ۱- روش مقایسه ای ۲ - روش هین^۱ یا روش تقاطع ۳- روش جفری^۲ یا روش مساحت سنجی

- روش مقایسه ای (روش مورد استفاده در این پژوهش):

نمونه با روش های متالوگرافی آماده و اچ می شود و سپس تصویر آن را زیر میکروسکوپ با بزرگنمایی X ۱۰۰ تهیه می کنند و دانه بندی تصویر را با یک سری از شکل هایی که دانه بندی آن ها به عنوان استاندارد ASTM E112-12 انتخاب و از ۱ تا ۱۱ شماره گذاری شده مقایسه می کنند. با روش آزمایش و خطا بالاخره دانه بندی مشابه نمونه را از شکل های استاندارد تعیین می کنند. اندازه ی دانه بندی نمونه مطابق استاندارد ASTM مطابق رابطه ۲-۱ تعیین می شود:

$$N = 2^{n-1} \quad (1-2)$$

که در آن N تعداد دانه های موجود با بزرگنمایی X ۱۰۰ در یک اینچ مربع بوده، n شماره استاندارد و مقدار آن از ۱ الی ۱۰ است. معمولا اندازه ی دانه ها را با شماره استاندارد مشخص می کنند. اگر فلزی از نظر اندازه، دانه های متفاوتی داشته باشد (کوچک و بزرگ) دانه بندی آن را با دو شماره استاندارد و با تعیین درصد تقریبی هر کدام مشخص می کنند. روش مقایسه متداول ترین روش ها برای تعیین اندازه ی دانه بندی فلزات است و برای فلزاتی که دارای دانه هایی با ابعاد یکنواخت هستند از دقت کافی برخوردار است.

¹ Heyn

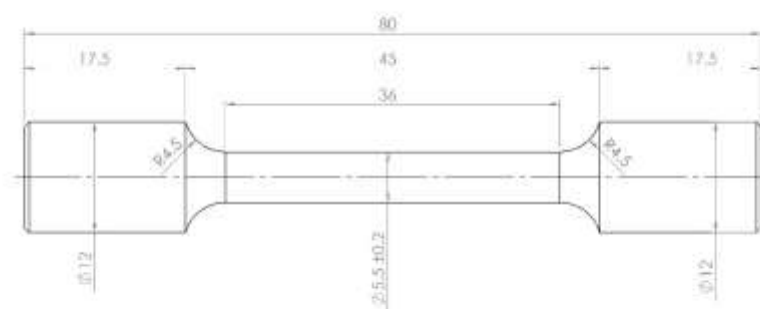
² Jeffries

۲-۶-۲- آزمون کشش^۱

آزمون کشش یکی از آزمون های مخرب علم مواد است که در آن یک نمونه تحت اثر کشش تک محوری تا حد شکست مورد مطالعه قرار می گیرد. نتایج حاصل از آزمون به طور معمول برای انتخاب یک ماده به منظور کنترل کیفیت و پیش بینی اینکه چگونه یک ماده تحت انواع دیگری از نیروها واکنش نشان می دهد به کار می رود. خواصی که به طور مستقیم از طریق آزمون کشش اندازه گیری می شوند عبارتند از: مقاومت کششی نهایی، بیشترین افزایش طول و کمترین کاهش در مساحت نمونه. همچنین از این اندازه گیری ها خواص زیر نیز می تواند تعیین شود: مدول یانگ، نسبت پواسون، استحکام تسلیم و کرنش سختی ماده. آزمون کشش تک محوری برای تعیین خواص مواد همسانگرد به کار می رود و برای مواد ناهمسانگرد مانند کامپوزیت ها از آزمون دو محوری استفاده می شود.

۲-۶-۱ آماده سازی نمونه آزمون کشش

نمونه کششی، یک نمونه با سطح مقطع استاندارد است که دو بازو و یک گیج (مقطع) در میانه دارد. بازو ها بزرگ بوده تا بتوانند به راحتی و به صورت محکم توسط گیره ها گرفته شوند، در حالیکه که بخش گیج سطح مقطع کمتری دارد به طوریکه تغییر شکل و شکست در این ناحیه رخ می دهد. جهت بررسی استحکام کششی^۲ نیاز به تراشکاری نمونه های ECAP شده مطابق با استاندارد کشش ASTM^۳ E8 می باشد. در شکل ۲-۱۳ نقشه تهیه شده جهت تراشکاری نمونه ها مطابق استاندارد کشش مشاهده می شود.



شکل ۲-۱۳- نقشه تراشکاری نمونه ها جهت آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM E8

¹ Tensile Test

¹ Tensile Strength

² American Society for Testing and Materials

جهت تراشکاری نمونه‌های کشش باید از مرغک استفاده نمود به نحوی که پس از پیشانی تراشی اولیه به کمک مته مرغک بر پیشانی قطعه سوراخ ایجاد کرده و قطعه مته مرغک خورده را به طور مطمئن بین مرغک و سه نظام دستگاه تراش بسته می‌شود و شروع به رو تراشی و ایجاد پله مورد نظر طبق نقشه استاندارد در آزمون کشش انجام شده است. نمونه های فلزی مورد استفاده در آزمون استاندارد کشش طوری شکل دهی می‌شوند که شکست، در قسمت مورد نظر طول آن‌ها یعنی در طول گیج، صورت پذیرد و استانداردهای کاملاً مشخصی برای ابعاد آنها تعیین شده است. در بعضی موارد، ممکن است نمونه های بسیار کوچک به کار روند، ولی این اندازه های کوچک در استانداردهای آزمایش گزارش نمی‌شوند و نتیجه آزمایش‌های این نمونه های کوچک ممکن است واقعا بیانگر خواص توده ماده نباشد. برای رسیدن به نتایجی که کاملاً بیانگر خواص ماده باشد، باید کوشش کرد که بارگذاری روی نمونه از نوع محوری خالص باشد. نیرو از طریق گیره نمونه آزمایش، از ماشین آزمایش به ماده منتقل می‌شود. گیره های نمونه آزمایش انواع متفاوت دارند؛ ساده ترین آن ها گیره گوه ای شکل است. نمونه ای از قطعات آماده شده جهت آزمایش کشش در تصویر ۲-۱۴ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱۴-نمونه ای از قطعات آماده شده جهت آزمون کشش.

۲-۶-۲ دستگاه آزمون کشش

ماشین‌های آزمون کشش در انواع مختلف عرضه می‌شوند. بعضی از آنها تنها برای انجام آزمون کشش طراحی شده‌اند، در حالی که بعضی دیگر از نوع یونیورسال هستند و برای آزمون کشش و فشار تک محوری و هم چنین خمش سه نقطه ای مناسب هستند. بعضی از این ماشین ها، کوچک و رومیزی هستند که نیروی حداکثر آن ها بین ۵۰۰ N تا ۲۰ KN تغییر می‌کند، در صورتی که در انتهای دیگر طیف این گونه ماشین‌ها، ماشین‌های بزرگ تا ظرفیت یک مگا نیوتن و حتی بیشتر وجود دارند. علی‌رغم اندازه و نوع کاربرد ماشین،

یعنی ماشین های کوچک یا بزرگ و ماشین های مورد استفاده برای آزمون کشش، فشار یا خمش، لازم است تعدادی ویژگی مشخص در ماشین وجود داشته باشد. این ویژگی ها عبارتند از:

الف- سیستمی برای تنظیم محل و نگهداری نمونه آزمایش در وضعیت مطلوب

ب- مکانیزمی برای اعمال نیرو به نمونه آزمایش و تغییر نیرو با آهنگ کنترل شده

پ- سیستمی برای اندازه گیری دقیق نیروی وارد شده

علاوه بر این، در بعضی از ماشین های آزمایش، سیستم هایی برای اندازه گیری و ثبت دقیق تغییرات ابعاد نمونه آزمایش گنجانده شده اند، ولی عموماً این گونه اندازه گیری ها با استفاده از دستگاه های مجزا مانند ازدیاد طول سنج و پیچش سنج، که به نمونه آزمایش وصل می شوند، صورت می گیرد. سیستم درونی ماشین آزمایش به منظور اعمال نیرو، ممکن است مکانیکی یا هیدرولیکی باشد. معمولاً سیستم مکانیکی شامل یک یا چند پیچ متصل به سر نیرو دهنده است و پیچ توسط مهره ای چرخان حرکت می کند. در سیستم های هیدرولیکی نیرو توسط یک پیستون هیدرولیکی که درون سیلندری مملو از روغن حرکت می کند، اعمال می شود. در بسیاری از موارد ثابت نگه داشتن آهنگ کرنش اهمیت دارد. بیشتر ماشین ها مجهز به وسایلی برای کار در چند آهنگ کرنش معین هستند، ولی بعضی از آن ها می توانند آهنگ کرنش را به طور پیوسته بین دو حد بالا و پایین تغییر دهند. نتایج آزمایش های نمونه های فلزی تابع آهنگ کرنش آزمایش نیست ولی مواد پلیمری معمولاً به آهنگ کرنش حساس اند. برای این مواد آهنگ های کرنش در استانداردهای مربوطه تعیین شده اند.

در شکل ۲-۱۲ دستگاه کشش مورد استفاده شده در این آزمایش که از نوع INSTRON-8802 می باشد نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۵- دستگاه اندازه گیری آزمون کشش مورد استفاده.

این دستگاه دارای ظرفیت نامی استاتیکی و دینامیکی ۲۵ Ton و دامنه جابجایی ۱۵۰ mm می باشد.

فصل ۳ نتایج و بحث

در این فصل تلاش داریم با نمایش نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌های آماده سازی شده، بحث و مقایسه تجربی این داده‌ها به اهداف مورد نظر در این پژوهش نزدیک شویم.

۳-۱- نتایج بدست آمده از پرسکاری نمونه‌ها در قالب

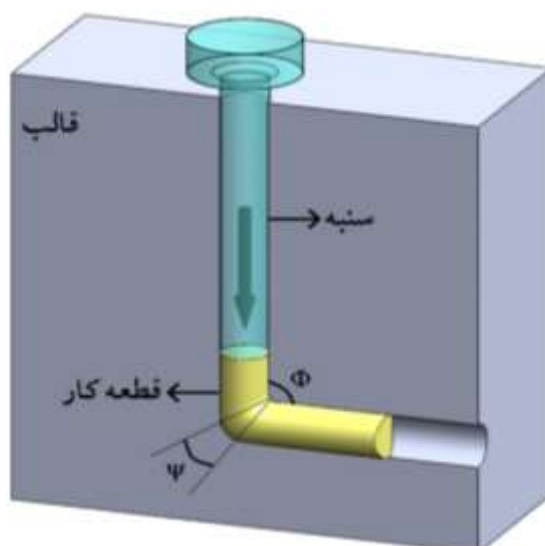
با توجه به معادله ۳-۱ و اینکه قالب ساخته شده دارای زاویه شیار $\Phi = 90^\circ$ و زاویه گوشه $\Psi = 36^\circ$ است، کرنش مومسان معادل ایجاد شده در پاس‌های مختلف محاسبه و در جدول ۳-۱ نشان داده شده است.

جدول ۳-۱- میزان کرنش مومسان ایجاد شده در پاس‌های مختلف از فرآیند ECAP.

پاس	۱	۲	۴	۶	۸	۱۰
کرنش مومسان معادل (ϵ_N)	۰/۹۹	۱/۹۹	۳/۹۸	۵/۹۸	۷/۹۷	۹/۹۷

با توجه به جدول ۳-۱ مشخص می‌شود که کرنش مومسان معادل با افزایش تعداد پاس‌ها افزایش می‌یابد، که با مقایسه مقادیر بین پاس‌های ۱ و ۱۰ می‌توان مشاهده کرد که این مقدار به میزان ۹۰٪ درصد افزایش پیدا کرده است.

شکل ۳-۱ روند تغییر شکل در حین فرآیند ECAP را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۱ - روند تغییر شکل در حین فرایند ECAP.

روند انجام فرآیند ECAP با اعمال نیرو ادامه یافته، به صورتی که تمام قطعه خام اولیه پس از شکست مرزخانه‌ها در جهت افقی ایجاد صفحه کرده و قطعه ECAP شده در پاس اول از داخل قالب که تا دمای 130°C گرم شده است خارج می‌شود. در شکل ۳-۲ نمونه پاس اول نمایش داده شده است.



شکل ۳-۲ - نمونه قطعه پاس اول ECAP شده.

۳-۲- بررسی نتایج آزمون سختی سنجی

پس از اندازه گیری سختی نمونه‌های آماده سازی شده توسط دستگاه سختی سنج میکرو ویکرز نتایج به شرح ذیل نمایش داده می‌شود. انجام آزمون سختی سنجی در این تحقیق با میزان بار HV 1kg در نظر گرفته شده است. جهت بالا بردن دقت در اندازه گیری سختی نمونه‌ها و همچنین بررسی محل‌هایی که در جهت ECAP قرار گرفته‌اند از هر نمونه در قسمت‌های مختلف به تعداد ۵ نقطه جهت آزمون انتخاب شد و آزمون سختی انجام پذیرفت. با توجه به انجام آزمون سختی سنجی به روی قطعه خام اولیه که عملیات ECAP بر روی آن انجام نگرفته است. میانگین عدد سختی بدست آمده طی آزمون برای نمونه اولیه HV1

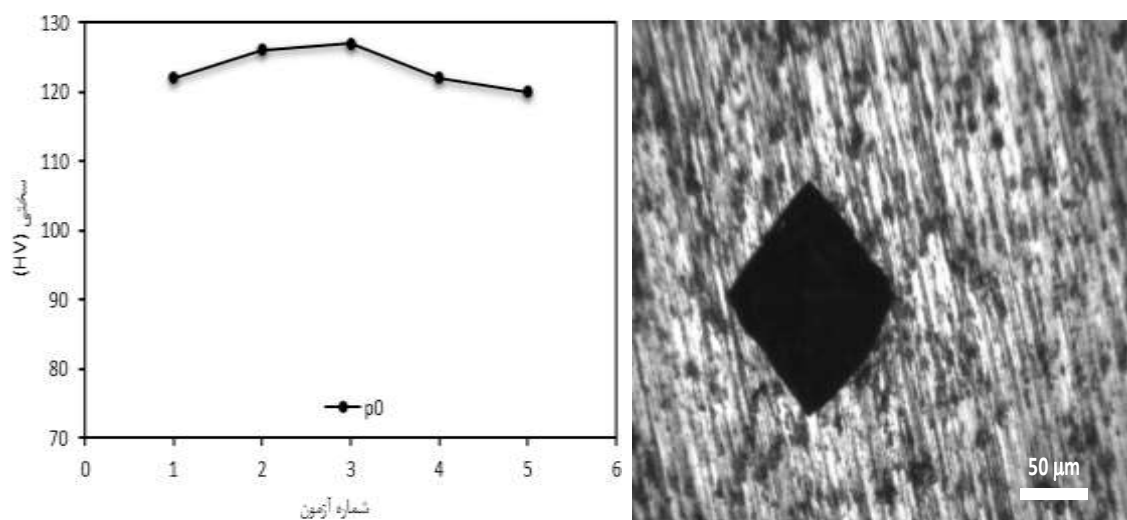
۱۲۳/۴ گزارش شد. جدول ۲-۳ اعداد سختی مربوط به نمونه خام و نمونه‌های ECAP شده در پاس های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۳- اعداد سختی بدست آمده

سختی (HV1) / شماره آزمون	۱	۲	۳	۴	۵	میانگین
سختی نمونه خام	۱۲۲	۱۲۶	۱۲۷	۱۲۲	۱۲۰	۱۲۳/۴
سختی نمونه پاس ۱	۱۲۴	۱۲۹	۱۲۸	۱۲۰	۱۲۲	۱۲۴/۶
سختی نمونه پاس ۲	۹۷/۵	۹۸/۵	۹۶/۵	۹۹/۴	۹۸/۹	۹۸/۱۶
سختی نمونه پاس ۴	۹۱/۹	۹۳/۲	۹۴/۱	۹۳/۲	۹۶	۹۳/۶۸
سختی نمونه پاس ۶	۹۳/۲	۹۱	۹۱/۴	۹۳/۷	۹۰/۶	۹۱/۹۸
سختی نمونه پاس ۸	۸۸/۴	۸۵/۵	۸۷/۲	۸۲/۴	۸۵/۱	۸۵/۷۲
سختی نمونه پاس ۱۰	۸۶/۳	۸۱/۳	۸۳/۲	۸۴/۷	۸۳/۶	۸۳/۸۲

سختی سنجی نمونه قطعه خام اولیه

شکل ۳-۳ به نمایش اثر ایجاد فرورونده و ویکرز بر روی نمونه قطعه خام و نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف آن تعلق دارد.



شکل ۳-۳- اثر فرورونده و ویکرز و نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف از نمونه قطعه خام.

سختی سنجی نمونه پاس اول ECAP

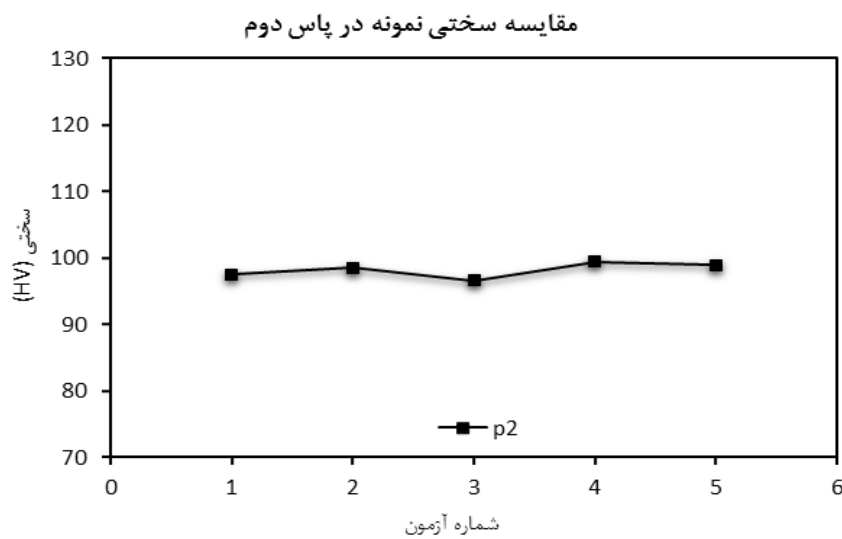
شکل ۳-۴ به نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف نمونه پاس اول متعلق می‌باشد .



شکل ۳-۴ - نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف از نمونه پاس اول ECAP.

سختی سنجی نمونه پاس دوم ECAP

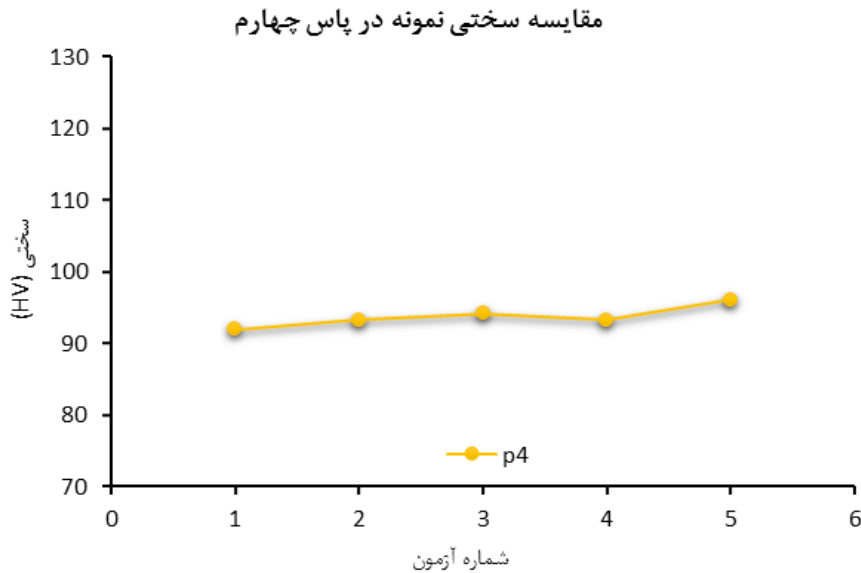
شکل ۳-۵ به نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف نمونه پاس دوم متعلق می‌باشد .



شکل ۳-۵ - نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف از نمونه پاس دوم ECAP.

سختی سنجی نمونه پاس چهارم ECAP

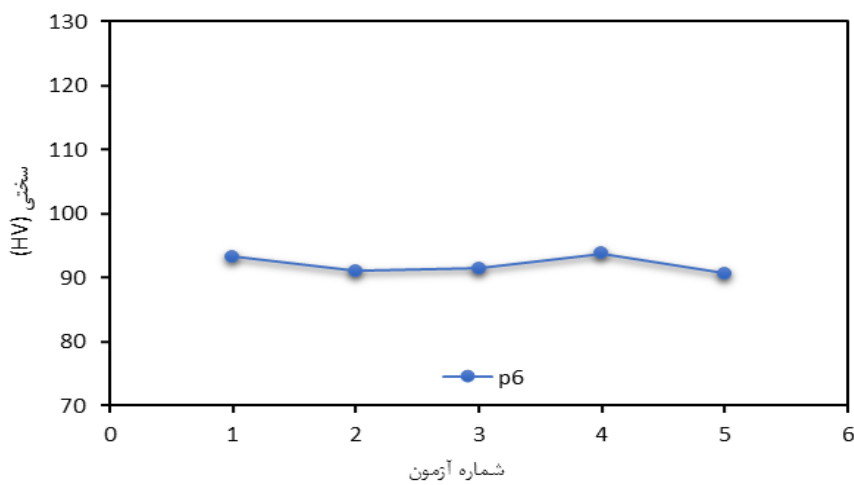
شکل ۳-۶ به نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف نمونه پاس چهارم متعلق می‌باشد.



شکل ۳-۶- نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف از نمونه پاس چهارم ECAP.

سختی سنجی نمونه پاس ششم ECAP

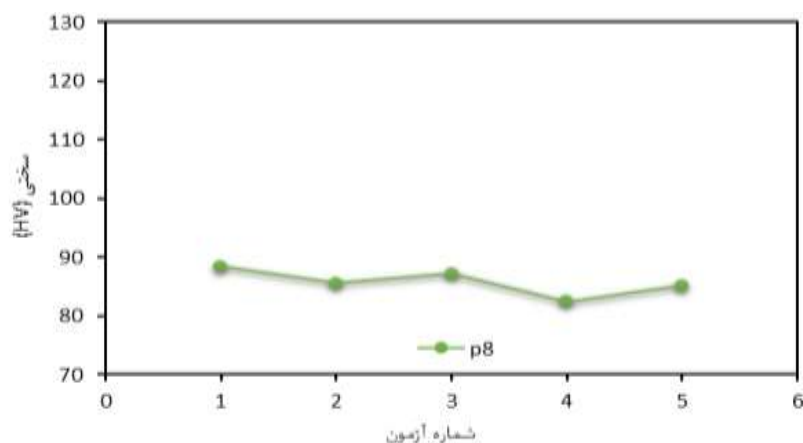
شکل ۳-۷ به نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف نمونه پاس ششم متعلق می‌باشد.



شکل ۳-۷- نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف از نمونه پاس ششم ECAP.

سختی سنجی نمونه پاس هشتم ECAP

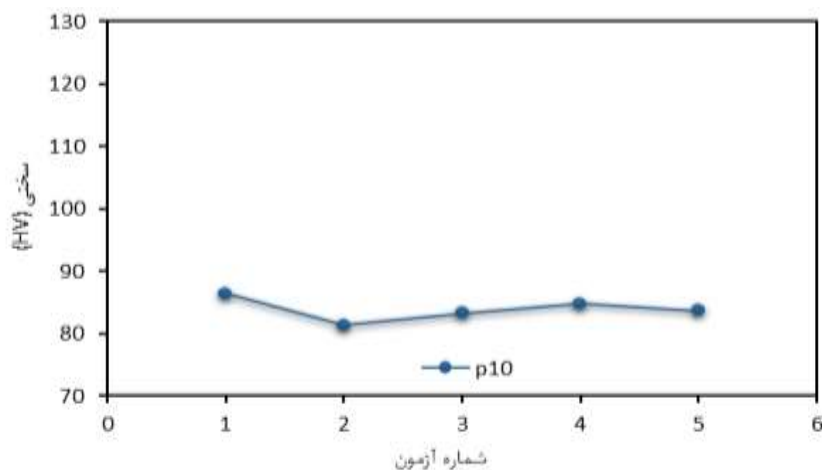
شکل ۳-۸ به نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف نمونه پاس هشتم متعلق می‌باشد.



شکل ۳-۸- نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف از نمونه پاس هشتم ECAP.

سختی سنجی نمونه پاس دهم ECAP

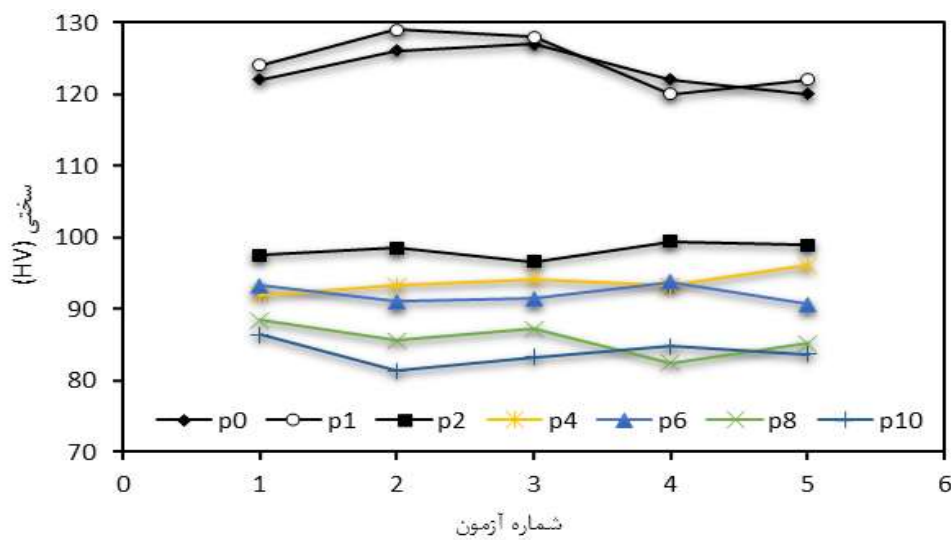
جدول ۳-۹ اعداد سختی به دست آمده از نمونه شماره ده که در پاس دهم از عملیات ECAP به دست آمده را نمایش می‌دهد. می‌توان با یک میانگین گیری ساده مقدار واقعی عدد سختی را برای این نمونه گزارش کرد و به کمک نمودار به بحث بر روی نتایج این عملیات پرداخت. شکل ۳-۹ به نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف نمونه پاس دهم متعلق می‌باشد.



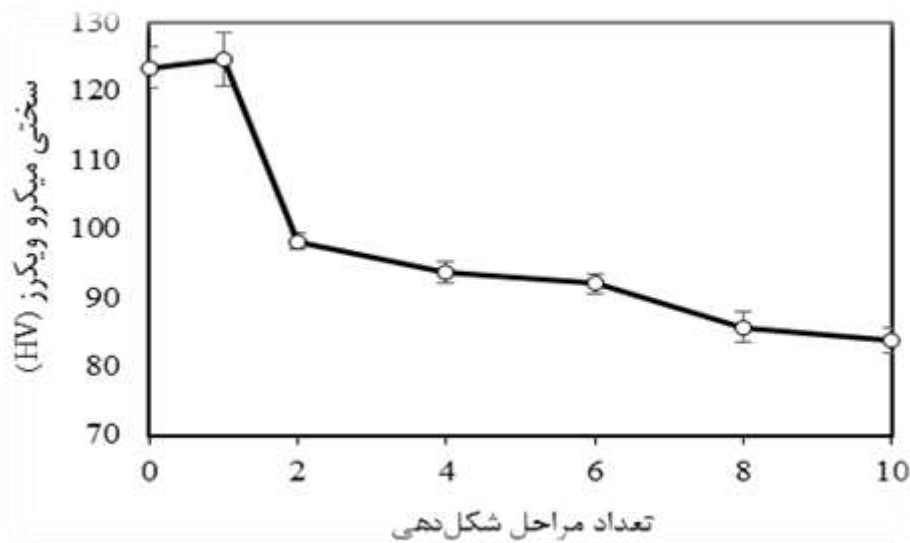
شکل ۳-۹- نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف از نمونه پاس دهم ECAP.

۳-۲-۱ مقایسه نمودارهای بدست آمده از سختی نمونه و تاثیر تعداد پاس های ECAP بر آن

در این آزمون توانستیم که با موفقیت تا ۱۰ مرحله عملیات ECAP را بر روی نمونه قطعه خام انجام دهیم. در ادامه، شکل ۳-۱۰ نمودار مقایسه تغییرات سختی نمونه طی مراحل ۰، ۱، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ را نمایش می‌دهد، همچنین شکل ۳-۱۱ نمودار مقایسه میانگین سختی نمونه طی مراحل مختلف ECAP را نمایش می‌دهد. مقایسه نمودارها نشان دهنده آن است که سختی در پاس اول افزایش و از پاس دوم به بعد کاهش داشته است.



شکل ۳-۱۰- نمودار مقایسه تغییرات سختی نمونه طی مراحل مختلف فرآیند ECAP.



شکل ۳-۱۱- نمودار مقایسه ای اثر تعداد پاس های فرآیند ECAP بر روی سختی ماده.

با توجه به نمودارهای ۱۰-۳ و ۱۱-۳ مشاهده می‌شود که سختی نمونه خام نسبت به نمونه پاس ۱۰ به میزان ۳۶٪ درصد کاهش داشته است، این موضوع نشان دهنده افزایش نرمی نمونه ها پس از انجام فرآیند ECAP حین کارگرم می‌باشد. همانطور که کواک و همکاران تحقیقی مشابه را بر روی منیزیوم انجام و نشان دادند که افزایش دما حین انجام فرآیند ECAP، احتمال بروز پدیده تبلور مجدد دینامیک^۱ را افزایش می‌دهد و این پدیده باعث کاهش سختی نمونه می‌شود [۴۹]. همچنین هوریتا و همکاران در تحقیقاتی مشابه که بر روی آلومینیوم ECAP شده صورت دادند، این کاهش سختی را ناشی از ناخالصی‌ها و پدیده تبلور مجدد دینامیک بیان کردند [۵۱ و ۵۰]. با توجه به نتایج تحقیقات موجود در مقالات، احتمالاً پدیده تبلور مجدد دینامیکی عامل افزایش نرمی نمونه های ECAP شده در پژوهش انجام گرفته می‌باشد.

۳-۲-۲ تصاویر بدست آمده از متالوگرافی ماده

با توجه محدودیت های موجود در آزمایشگاه دانشگاه و نبود میکروسکوپ های نوری با وضوح بالا (تصاویر مناسبی را با میکروسکوپ های موجود در دانشگاه ثبت نکردیم) و همچنین عدم وجود میکروسکوپ الکترونی مجبور به ارسال نمونه ها به بنیاد علوم کاربردی رازی جهت همکاری و تهیه عکس های متالوگرافی از نمونه‌های آماده شده گشتیم. جهت انجام این مهم نمونه خام یا همان ECAP نشده جهت تصویر برداری با میکروسکوپ نوری و نمونه های ۱ و ۲ و ۴ پاس ECAP شده جهت تصویر برداری با میکروسکوپ الکترونی آماده سازی و ارسال شد. در ادامه تصاویر بدست آمده را مشاهده می‌کنیم. در شکل ۳-۱۲ تصاویر بدست آمده مطابق استاندارد ASTM E883-11 توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی X500 نشان داده شده است، که ترکیبات بین فلزی سیاه رنگ Mg2Si و رنگ روشن CuMgAl2 و Cu2FeAl7 در زمینه می‌باشد.



شکل ۳-۱۲- تصویر متالوگرافی از نمونه خام توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی x500.

¹ Dynamic Recrystallisation

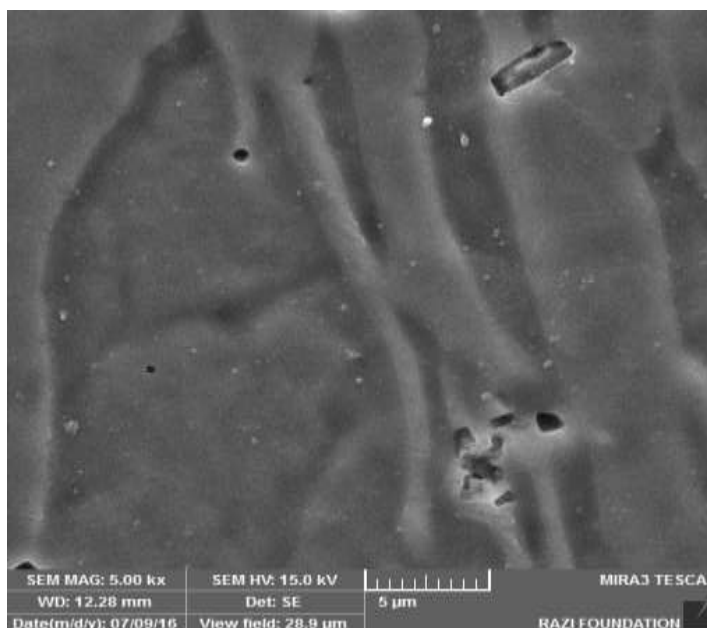
در تصویر ۳-۱۳ که با بزرگنمایی X500 و مطابق استاندارد ASTM 883-11 از نمونه خام گرفته شده است، اندازه دانه مطابق با استاندارد ASTM E112-12 برابر است با ۹-۰.۶ NO یعنی عددی بین $15.9 - 44.9 \mu\text{m}$



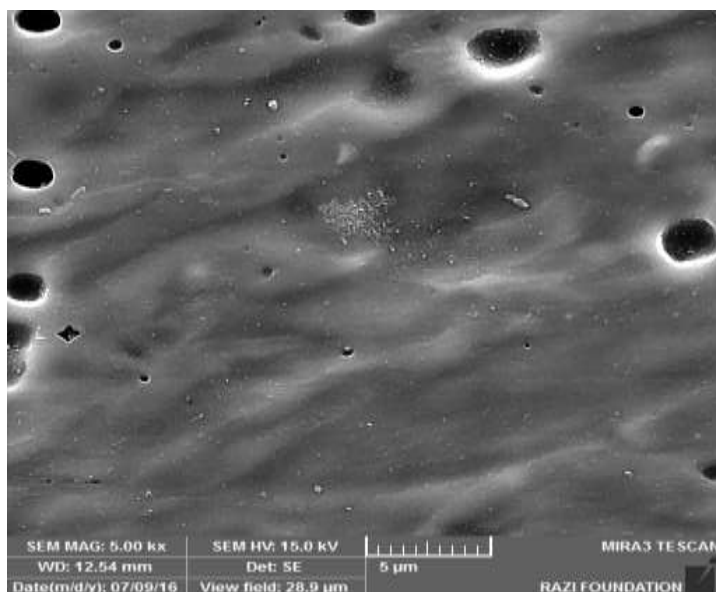
شکل ۳-۱۳- تصویر متالوگرافی از نمونه خام با بزرگنمایی X500 و اندازه دانه مطابق با استاندارد ASTM E112-12.

۳-۲-۳ تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM)

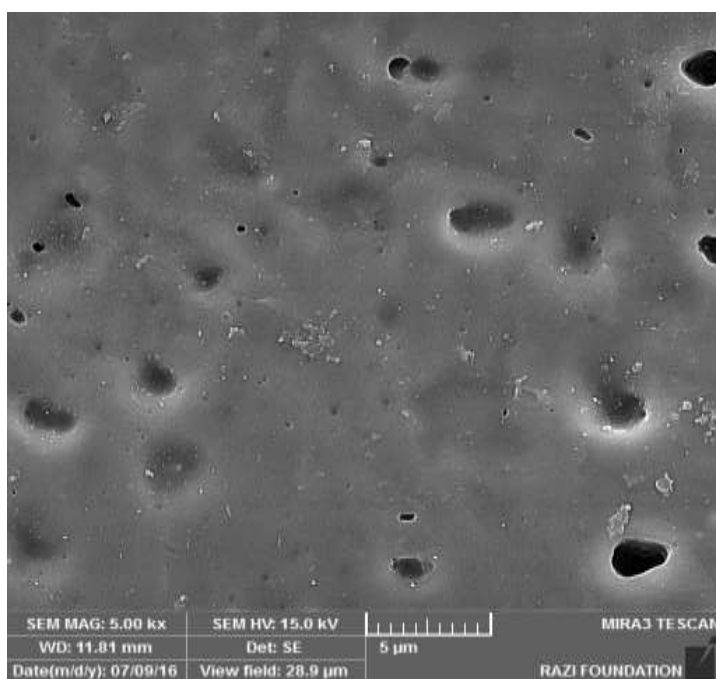
در این پژوهش جهت بررسی اندازه دانه های نمونه ECAP شده با همکاری بنیاد علوم کاربردی رازی در بخش میکروسکوپ های الکترونی از دستگاه، TESCANA -MIRA3 استفاده شده است. جهت انجام کار و با توجه به سختی بدست آمده از نمونه های ECAP شده مقرر شد نمونه های ۱، ۲ و ۴ پاس ECAP شده جهت تصویر برداری آماده و ارسال شود. در شکل های ۳-۱۴، ۳-۱۵ و ۳-۱۶ تصاویر بدست آمده از FE-SEM را می توان مشاهده نمود.



شکل ۳-۱۴- تصویر FE-SEM نمونه پاس اول از فرآیند ECAP با بزرگنمایی X5000.



شکل ۳-۱۵- تصویر FE-SEM نمونه پاس دوم از فرآیند ECAP با بزرگنمایی X5000.

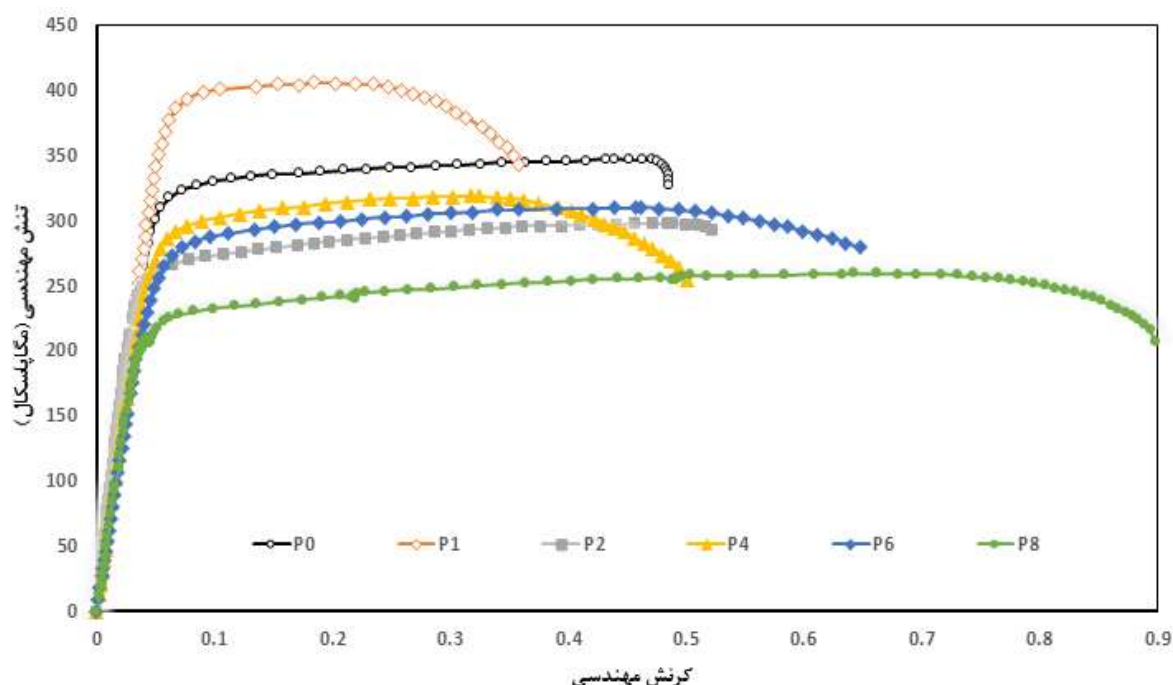


شکل ۳-۱۶- تصویر FE-SEM نمونه پاس چهارم از فرآیند ECAP با بزرگنمایی X5000.

متاسفانه در تصاویر گرفته شده توسط FE-SEM از پاس های ۱ ، ۲ و ۴ هیچگونه مشخصات و نشانه‌ای از اندازه دانه ها مشاهده نمی‌شود.

۳-۳- نتایج آزمون کشش

نتایج حاصل از تست کشش برای طراحان و مهندسان از اهمیت فراوانی برخوردار است. در بسیاری از موارد لازم نیست یک قطعه فلزی بشکند تا از کار افتاده تلقی شود؛ چرا که تغییر شکل مومسان و کمانش هم نوعی از کار افتادگی هستند و در نتیجه، اطلاع از سطح تنشی که در آن تسلیم مومسان آغاز می‌شود، بسیار مهم است. بعضی فلزات و مخصوصاً فولاد، نقطه تسلیم مشخصی دارند، ولی در بیشتر فلزات تبدیل رفتار از حالت کشسان به مومسان به آرامی صورت می‌گیرد. در این پژوهش نمونه‌های آماده شده جهت آزمون کشش عبارتند از نمونه خام و نمونه‌های پاس ۰، ۱، ۲، ۴، ۶ و ۸ از نمونه پاس ۱۰ به علت کوچک بودن صرف نظر شد. شکل ۳-۱۷ نتایج آزمون کشش بر روی نمونه‌ها در پاس‌های مختلف را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۱۷- منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده در پاس‌های مختلف از فرآیند.

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون کشش بر روی نمونه‌های ECAP شده در دمای گرم می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش مراحل ECAP در این آلیاژ مورد استفاده میزان استحکام کششی کاهش یافته و نرمی افزایش یافته است، که به علت پدیده تبلور مجدد دینامیکی^۱ می‌باشد [۴۵ و ۴۹].

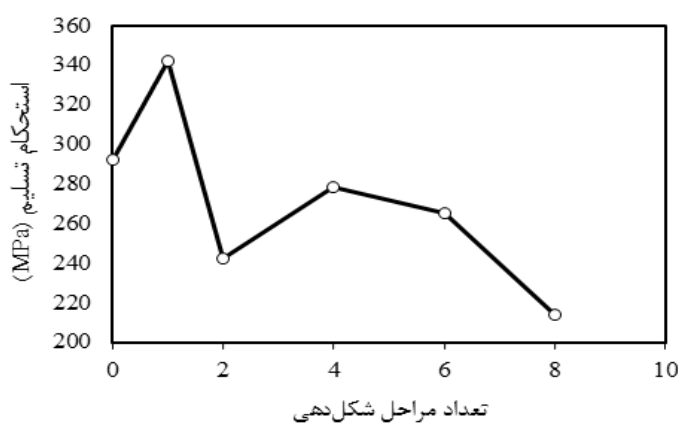
جدول ۳-۳ میزان استحکام تسلیم و استحکام نهایی طی آزمون انجام گرفته بر روی نمونه‌های ECAP شده در پاس‌های مختلف را نشان می‌دهد.

¹ Dynamic Recrystallisation

جدول ۳-۳- استحکام تسلیم و استحکام نهایی نمونه ها طی آزمون کشش.

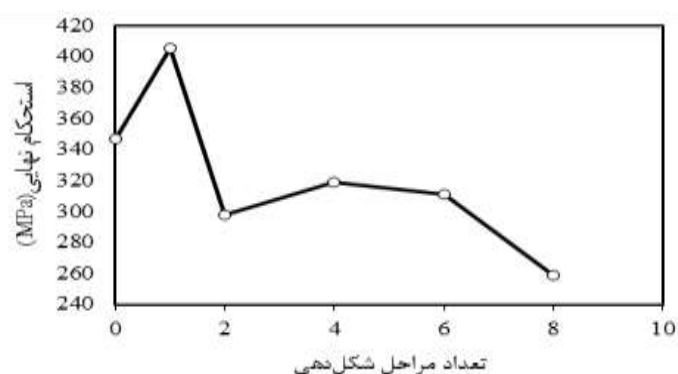
پاس	۰	۱	۲	۴	۶	۸
استحکام تسلیم (MPa)	۲۹۲	۳۴۲	۲۴۲	۲۷۸	۲۶۵	۲۱۴
استحکام نهایی (MPa)	۳۴۷	۴۰۵	۲۹۸	۳۱۹	۳۱۱	۲۵۹
درصد حد نهایی افزایش طول	۴۷	۲۳	۴۹	۳۲	۴۶	۷۱

شکل ۳-۱۸ نمودار مربوط به استحکام تسلیم نمونه‌های ECAP شده طی پاس‌های مختلف را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۱۸- استحکام تسلیم آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده در پاس‌های مختلف از فرآیند.

شکل ۳-۱۹ نمودار مربوط به حد نهایی استحکام کششی (UTS^۱) نمونه‌های ECAP شده طی پاس‌های مختلف را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۱۹- استحکام نهایی آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده در پاس‌های مختلف از فرآیند.

¹ Ultimate Tensile Strength

با توجه به نتایج بدست آمده از انجام آزمون کشش بر روی نمونه‌های آماده سازی شده مشاهده می‌شود که میزان استحکام در پاس هشتم از فرآیند ECAP نسبت به نمونه خام در حدود ۲۶٪ در آلیاژ آلومینیوم مورد پژوهش کاهش یافته و در مقابل نرمی به میزان ۳۴٪ افزایش یافته است. همانطور که در نمودار شکل ۳-۱۸ و جدول ۳-۳ مشاهده می‌شود در پاس اول از این فرآیند افزایش استحکام کششی و کاهش نرمی ماده مورد پژوهش را مشاهده می‌کنیم، ولی از پاس دوم به بعد میزان استحکام کششی، کاهش و در مقابل نرمی افزایش داشته است. با توجه به مقادیر سختی مشاهده شده در نمودارهای ۳-۱۰ و ۳-۱۱ انتظار این رفتار از ماده در تست کشش که نشان دهنده نرم شدن نمونه ECAP شده می‌باشد می‌رود، همانطور که اشاره شد کواک و همکاران [۴۹] ونیز، هوریتا و همکاران [۵۱ و ۵۰] نشان دادند که این افزایش نرمی در ماده ECAP شده در دمای بالا به علت بروز پدیده تبلور مجدد دینامیکی می‌باشد. هدف از این آزمون‌ها و ترسیم نمودارها دستیابی به خواص مکانیکی آلیاژ مورد نظر و بررسی شرایط آزمون طی پاس‌های مختلف از فرآیند می‌باشد، تا زمینه را برای بهینه تر کردن فرآیند تغییر شکل مومسان شدید برای این آلیاژ از آلومینیوم فراهم آوریم.

۳-۴- درصد کاهش سطح مقطع

با استفاده از اندازه گیری قطر نمونه‌ها قبل و بعد از انجام آزمون کشش میزان درصد کاهش سطح مقطع محاسبه شد، این مقادیر در جدول ۳-۴ طی پاس‌های مختلف نشان داده شده است.

جدول ۳-۴- میزان درصد کاهش سطح مقطع طی آزمون کشش در پاس‌های مختلف از فرآیند ECAP.

پاس	۰	۱	۲	۴	۶	۸
درصد کاهش سطح مقطع(%)	۲۲/۷۰	۱۶/۸۰	۱۹/۹۰	۱۸/۵۹	۲۰	۲۴

با توجه به جدول ۳-۴ مشاهده می‌شود که در پاس هشتم درصد کاهش سطح مقطع به میزان ۵٪ درصد نسبت به نمونه خام افزایش یافته و این به معنی افزایش میزان نرمی ماده است. مقادیر درصد کاهش سطح مقطع نیز در راستای سختی و استحکام کششی نشان دهنده افزایش نرمی با افزایش تعداد پاس‌ها در فرآیند ECAP در دمای بالا می‌باشد.

فصل ۴ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش به منظور « بررسی اثر تعداد پاس‌های شکل‌دهی بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ طی فرایند پرس‌کاری در کانال‌های همسان زاویه‌دار» انجام گرفت، که با استفاده از آزمون‌ها و یافته‌های فصل سوم نیاز دانسته شد که به صورت مختصر به بررسی نتایج بدست آمده از این یافته‌ها بپردازیم و در ادامه با ارائه پیشنهادهایی به بهتر شدن و سو گرفتن تحقیقات در این زمینه پرکاربرد کمکی بنماییم.

۴-۱- نتیجه‌گیری

همانطور که مشاهده می‌شود، یکی از نکات قابل توجه در تمامی روش‌های تغییر شکل مومسان شدید، عدم تغییر ابعاد اولیه قطعه می‌باشد که این موضوع علاوه بر نانساختار کردن و بهبود خواص ماده، از ویژگی‌های منحصر به فرد روش تغییر شکل مومسان شدید است. میله‌ای فلزی را تصور کنید که پس از انجام فرآیند SPD، استحکام آن به شدت افزایش یافته، نرمی آن تقریباً حفظ شده و در عین حال، تغییر ابعادی ندارد. حال از این موضوع می‌توان به اهمیت بسیار بالای این روش در کاربردهای مهندسی پی‌برد. گاهی اوقات جهت کنترل خواص متالورژیکی نمونه و یا سایر خواص ماده، تغییر شکل مومسان شدید را در حالت گرم انجام می‌دهند. برخی اوقات نیز بین پاس‌های مختلف فرآیند و یا پاس از پاس نهایی، نمونه‌های SPD شده را در کوره قرار داده و آنیل (بازپخت) می‌کنند تا به خواص مورد نظر دست پیدا کنند. در برخی از موارد هم انجام بازپخت باعث می‌شود که بتوان تعداد پاس‌های بیشتری را بدون ترک خوردن نمونه و در نیروهای

پایین پرس انجام داد. البته باید توجه شود که انجام فرآیند در دمای بالا و یا انجام آنیل های میانی و پایانی، نیاز به دقت های متالورژیکی بسیار بالایی دارد و باید طراحی بسیار دقیقی انجام بگیرد. استفاده از روش های تغییر شکل مومسان شدید مواد به منظور افزایش استحکام و حفظ چقرمگی مواد، در صنعت و به خصوص صنایع هوایی، نظامی و پزشکی در حال افزایش است. در این میان روش ECAP به علت امکان کرنش دهی زیاد به مواد و هزینه های ارزان تر نسبت به سایر فرایندهای SPD از اهمیت خاصی برخوردار است. در این پایان نامه با مطالعه عددی و انجام آزمایش‌های تجربی بر روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ جهت انجام عملیات پرسکاری در کانال‌های همسان زاویه‌دار (ECAP) در دمای 130°C به منظور ریزدانه کردن آلیاژ و افزایش استحکام آن پرداخته شد. همچنین تاثیر پاس های فرآیند بر استحکام تسلیم و اندازه‌دانه نشان داده شد و مشخص شد که از پاس های معینی به بعد این عملیات دیگر تاثیر چندانی بر خواص مکانیکی و ریز ساختار ماده نخواهد داشت، نتایج بدست آمده حاکی از این است که:

۱- توزیع دانه ها در پاس اول غیر یکنواخت و دارای ساختاری دو گانه به صورت ترکیبی از جریان های دانه های ریز و درشت است.

۲- افزایش تعداد پاس ها موجب یکنواختی بیشتر ساختار می‌شود.

۳- نتایج آزمون سختی نشان می‌دهد میزان سختی از HV ۱۲۳/۴ در نمونه ماده خام اولیه به HV ۸۳/۸۲ در پاس دهم کاهش یافته است، که می‌تواند به علت بازیابی و تبلور مجدد به وجود آمده بر روی نمونه باشد. البته سختی در پاس اول افزایش را نشان داد. توزیع سختی در مقطع نمونه در پاس های اولیه به صورت غیر یکنواخت است، که علت آن را می‌توان توزیع غیر یکنواخت کرنش دانست.

۴- با توجه به نتایج بدست آماده از انجام آزمون کشش بر روی نمونه‌های آماده سازی شده و محاسبه میزان استحکام کششی برای هر یک از نمونه ها مشاهده شد که انجام عملیات ECAP در پاس هشتم از فرآیند انجام گرفته به کمترین میزان استحکام و بیشترین میزان نرمی خود در آلیاژ مورد پژوهش رسیده است که این می‌تواند به علت بروز پدیده تبلور مجدد باشد.

۵- از نتایج محاسبه درصد کاهش سطح مقطع، همانند میزان استحکام کششی مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد پاس نرمی قطعه افزایش می‌یابد.

۶- با مقایسه مقدار کرنش مومسان بدست آمده برای قالب ساخته شده مشخص شد، با افزایش تعداد پاس‌ها میزان کرنش مومسان نیز افزایش می‌یابد.

۴-۲- پیشنهادها

در این پایان نامه، مطالعه‌های مقدماتی روی فرایند ECAP انجام گرفت و نتایج فقط روی میله ای با قطر و طول مشخص و با شکل ساده به دست آمد. مطالعات آینده می‌تواند روی قطعات با ابعاد بزرگتر، اشکال پیچیده‌تر، قطعات دارای استحکام بالاتر و آلیاژهای دیگر آلومینیوم که به صورت کاربردی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند متمرکز شود. و همچنین با توجه به این که فرآیند ECAP نه تنها دارای مسیرهای بار گذاری متفاوتی می‌باشد بلکه امکان افزایش تعداد کانالهای عبوری و تغییر زاویه ورودی در فرایند وجود دارد که در این پایان نامه از فرایند ECAP با زاویه کانال 90° و مسیر بارگذاری Bc استفاده نمودیم و تمام داده های آزمون های تجربی بر اساس این نوع مسیر از فرآیند ECAP می‌باشد بنابراین توصیه می‌شود که در آینده بر روی انواع مسیرهای گذار بر روی این آلیاژ پر کاربرد مطالعات و آزمایشات تجربی صورت گیرد. در بحث آزمایشگاهی، با توجه به محدودیت امکانات، اندازه گیری میزان رسانایی گرمایی آلیاژ آلومینیوم اندازه گیری نشد که توصیه می‌شود در آینده این خصوصیات از ماده مورد نظر نیز مورد توجه قرار بگیرد. مطلب دیگری که نیاز به مطرح کردن می‌باشد دمای پرس کاری در فرایند ECAP است. در این پایان نامه ابتدا پرسکاری در دمای محیط انجام گرفت که نتیجه بخش نبود و نمونه مورد آزمون دچار ترک شد، سپس تمامی مراحل پرس کاری در دمای 130°C صورت گرفت و خوشبختانه این آزمون نتیجه بخش بود، در نتیجه پیشنهاد می‌شود این عملیات پس از آنیل کردن نمونه مجددا در دمای محیط پرسکاری و نتایج این اقدام گزارش شود و مورد دیگر اینکه می‌توان این عملیات را در دماهای دیگر مثلا کمتر از دمای انجام گرفته در این پژوهش صورت داد.

منبعها

1. Chang, T.C., Wang, J.Y., Chia-Ming, O. and Lee, S., 2003. Grain refining of magnesium alloy AZ31 by rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1), pp.588-591.
2. Pérez-Prado, M.T., Del Valle, J.A. and Ruano, O.A., 2005. Achieving high strength in commercial Mg cast alloys through large strain rolling. *Materials letters*, 59(26), pp.3299-3303.
3. Zhang, Q.L., Lu, C., Zhu, Y.P., Ding, W.J. and He, J.H., 2004. Effect of rolling method on microstructure and properties of AZ 31 magnesium alloy thin sheet. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 14(3), pp.391-397.
4. Shin, D.H., Park, J.J., Kim, Y.S. and Park, K.T., 2002. Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum. *materials Science and Engineering: A*, 328(1), pp.98-103.
5. Rosochowski, A., 2005. Processing metals by severe plastic deformation. In *Solid State Phenomena* (Vol. 101, pp. 13-22). Trans Tech Publications.
6. Qiu, J., Murata, T., Wu, X., Kitagawa, M. and Kudo, M., 2012. Plastic deformation mechanism of crystalline polymer materials in the equal channel angular extrusion process. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(7), pp.1528-1536.
7. Ma, J., Simon, G.P. and Edward, G.H., 2008. The effect of shear deformation on nylon-6 and two types of nylon-6/clay nanocomposite. *Macromolecules*, 41(2), pp.409-420.
8. Abu-Zurayk, R., Harkin-Jones, E., McNally, T., Menary, G., Martin, P. and Armstrong, C., 2009. Biaxial deformation behavior and mechanical properties of a polypropylene/clay nanocomposite. *Composites Science and Technology*, 69(10), pp.1644-1652.
9. Thompson, A., Bianchi, O., Amorim, C.L., Lemos, C., Teixeira, S.R., Samios, D., Giacomelli, C., Crespo, J.S. and Machado, G., 2011. Uniaxial compression and stretching deformation of an i-PP/EPDM/organoclay nanocomposite. *Polymer*, 52(4), pp.1037-1044.
10. Flandin, L., Brechet, Y. and Cavaille, J.Y., 2001. Electrically conductive polymer nanocomposites as deformation sensors. *Composites Science and Technology*, 61(6), pp.895-901.
11. Valiev, R.Z. and Langdon, T.G., 2006. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in Materials Science*, 51(7), pp.881-981.
12. Rosochowski, A., 2005. Processing metals by severe plastic deformation. In *Solid State Phenomena* (Vol. 101, pp. 13-22). Trans Tech Publications.
13. Lowe, T.C. and Valiev, R.Z., 2004. The use of severe plastic deformation techniques in grain refinement. *Jom*, 56(10), pp.64-68.
14. Saito, Y., Tsuji, N., Utsunomiya, H., Sakai, T. and Hong, R.G., 1998. Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process. *Scripta materialia*, 39(9), pp.1221-1227.
15. Kazeminezhad, M. and Hosseini, E., 2010. Optimum groove pressing die design to achieve desirable severely plastic deformed sheets. *Materials & Design*, 31(1), pp.94-103.

16. Shin, D.H., Park, J.J., Kim, Y.S. and Park, K.T., 2002. Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum. *materials Science and Engineering: A*, 328(1), pp.98-103.
 17. L. Toth, M. Arzaghi, J. Fundenberger, B. Beausir, O. Bouaziz, R. Arruffatmassion, "Severe plastic deformation of metals by high-pressure tube twisting," *Scripta Materialia*, vol. 60, pp. 175-177, (2009).
 18. Mohebbi, M.S. and Akbarzadeh, A., 2010. Accumulative spin-bonding (ASB) as a novel SPD process for fabrication of nanostructured tubes. *Materials Science and Engineering: A*, 528(1), pp.180-188.
 19. Faraji, G., Babaei, A., Mashhadi, M.M. and Abrinia, K., 2012. Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new severe plastic deformation method for cylindrical tubes. *Materials Letters*, 77, pp.82-85.
 20. Zangiabadi, A. and Kazeminezhad, M., 2011. Development of a novel severe plastic deformation method for tubular materials: Tube Channel Pressing (TCP). *Materials Science and Engineering: A*, 528(15), pp.5066-5072.
 21. Segal, V.M., Reznikov, V.I., Drobyshevskii, A.E. and Kopylov, V.I., 1981. Plastic working of metals by simple shear. *Russ. Met.*, (1), pp.99-105.
 22. Kim, I., Jeong, W.S., Kim, J., Park, K.T. and Shin, D.H., 2001. Deformation structures of pure Ti produced by equal channel angular pressing. *Scripta materialia*, 45(5), pp.575-580.
 23. Zhao, X., Yang, X., Liu, X., Wang, C.T., Huang, Y. and Langdon, T.G., 2014. Processing of commercial purity titanium by ECAP using a 90 degrees die at room temperature. *Materials Science and Engineering: A*, 607, pp.482-489.
 24. Sordi, V.L., Ferrante, M., Kawasaki, M. and Langdon, T.G., 2012. Microstructure and tensile strength of grade 2 titanium processed by equal-channel angular pressing and by rolling. *Journal of Materials Science*, 47(22), pp.7870-7876.
 25. Figueiredo, R.B., Cetlin, P.R. and Langdon, T.G., 2007. The processing of difficult-to-work alloys by ECAP with an emphasis on magnesium alloys. *Acta Materialia*, 55(14), pp.4769-4779.
۲۶. ابراهیمی ، فرآیند اکستروژن در کانالهای همسان زاویه دار، شبیه سازی فرآیند و بررسی تاثیر نوع مسیر در کرنش و یکنواختی آن ،کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد۱۳۸۶، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
27. Yamashita, A., Yamaguchi, D., Horita, Z. and Langdon, T.G., 2000. Influence of pressing temperature on microstructural development in equal-channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 287(1), pp.100-106.
 28. Stolyarov, V.V., Zhu, Y.T., Lowe, T.C., Islamgaliev, R.K. and Valiev, R.Z., 1999. A two step SPD processing of ultrafine-grained titanium. *Nanostructured Materials*, 11(7), pp.947-954.
 29. Fan, G.D., Zheng, M.Y., Hu, X.S., Xu, C., Wu, K. and Golovin, I.S., 2013. Effect of heat treatment on internal friction in ECAP processed commercial pure Mg. *Journal of Alloys and Compounds*, 549, pp.38-45.
 30. Chuvil'Deev, V.N., Nieh, T.G., Gryaznov, M.Y., Sysoev, A.N. and Kopylov, V.I., 2004. Low-temperature superplasticity and internal friction in microcrystalline Mg alloys processed by ECAP. *Scripta Materialia*, 50(6), pp.861-865.
 31. Kang, F., Wang, J.T., Su, Y.L. and Xia, K.N., 2007. Finite element analysis of the effect of back pressure during equal channel angular pressing. *Journal of materials science*, 42(5), pp.1491-1500.

32. Ribbe, J., Schmitz, G., Rösner, H., Lapovok, R., Estrin, Y., Wilde, G. and Divinski, S.V., 2013. Effect of back pressure during equal-channel angular pressing on deformation-induced porosity in copper. *Scripta Materialia*, 68(12), pp.925-928.
33. Ranaei, M.A., Afsari, A., Ahmadi, B.S.Y. and Moshksar, M.M., 2015. Microstructure, Mechanical And Electrical Properties of Commercially Pure Copper Deformed Severely by Equal Channel Angular Pressing.
34. Naseri, R., Shariati, M., Kadkhodayan, M., Effect of work-piece cross section on the mechanical properties of commercially pure titanium produced by Equal Channel Angular Pressing, *Modares Mechanical Engineering* Vol. 15, No.6, pp.157-166, 2015 (In Persian).
35. Ranaei, M.A., Afsari, A., Ahmadi, B.S.Y. And Moshksar, M.M., 2015. Investigation on Performance of Ultra-Fine Grained Pure Copper as Electrode During Electrical Discharge Machining.
36. Terent'ev, V.F., Dobatkin, S.V., Nikulin, S.A., Kopylov, V.I., Prosvirin, D.V., Rogachev, S.O. and Bannykh, I.O., 2011. Effect of equal-channel angular pressing on the fatigue strength of titanium and a zirconium alloy. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2011(10), pp.981-988.
37. Gholami, J., Sedighi, M., Pourbashiri, M., Effect of die channel angle and friction coefficient in ECAP-Conform process for Al-6061 alloy, *Proceedings of Iran International Aluminum Conference*, May 2014, Tehran, I.R. Iran.
۳۸. شبان، اقبالی. "تاثیر پارامترهای طراحی قالب ECAP بر نحوه سیلان و توزیع کرنش در حین تغییر شکل آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴" دومین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، اردیبهشت ماه ۸۸، نجف آباد - دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.
۳۹. کلانتری، حسینی پور، نوروزی، گرجی. "بررسی تجربی فاکتورهای موثر بر پرسکاری درون کانال های همسان زاویه دار (ECAP) آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳" نهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، اسفند ماه ۸۷، بیرجند - دانشگاه بیرجند.
40. Jayakumar, P.K., Balasubramanian, K. and Tagore, G.R., 2012. Recrystallisation and bonding behaviour of ultra fine grained copper and Cu-Cr-Zr alloy using ECAP. *Materials Science and Engineering: A*, 538, pp.7-13.
41. Vinogradov, A., Ishida, T., Kitagawa, K. and Kopylov, V.I., 2005. Effect of strain path on structure and mechanical behavior of ultra-fine grain Cu-Cr alloy produced by equal-channel angular pressing. *Acta materialia*, 53(8), pp.2181-2192.
42. Ghadiri, M., Mashhadi, M.M. and Ghamami, M., 2015. Study of effective parameters of Parallel Tubular Channel Angular Pressing (PTCAP). *Modares Mechanical Engineering*, 14(16), pp.27-33, 2015 (In Persian).
۴۳. نویسگرانی، ح: اصول علم مواد. چاپ پانزدهم. مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ۱۳۸۸.
۴۴. بهلگردی، شکوه فر، ذوالریاستین و مجید رحیمی. "تاثیر وقوع تبلور مجدد بر خواص مکانیکی آلیاژ حافظه دار Cu-Zn-Al-Sn در طی فرآیند تغییر شکل مومسان شدید (ECAP)"، اولین همایش بین المللی و ششمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران، انجمن علمی ریخته گری ایران، ۱۳۹۱.
۴۵. مرادی، نیلی احمدآبادی، پورگنجی و حیدریان. "بررسی مکانیزم تبلور مجدد در آلیاژ A۳۵۶ پس از تغییر شکل مومسان شدید توسط فرایند ECAP حین گرمایش مجدد تا دمای نیمه جامد"، دومین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی و انجمن ریخته گری ایران، ۱۳۸۷، کرج، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج.
46. Shaeri, M.H., Salehi, M.T., Seyyedain, S.H., Abutalebi, M.R. and Park, J.K., 2014. Microstructure and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing combined with aging treatment. *Materials & Design*, 57, pp.250-257.

47. Kumar, S.R., Gudimetla, K., Venkatachalam, P., Ravisankar, B. and Jayasankar, K., 2012. Microstructural and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by Equal Channel Angular Pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 533, pp.50-54.
48. Zhao, Y.H., Liao, X.Z., Jin, Z., Valiev, R.Z. and Zhu, Y.T., 2004. Microstructures and mechanical properties of ultrafine grained 7075 Al alloy processed by ECAP and their evolutions during annealing. *Acta Materialia*, 52(15), pp.4589-4599.
49. Kwak, E.J., Bok, C.H., Seo, M.H., Kim, T.S. and Kim, H.S., 2008. Processing and mechanical properties of fine grained magnesium by equal channel angular pressing. *Materials transactions*, 49(5), pp.1006-1010.
50. Dvorak, J., Sklenicka, V. and Horita, Z., 2008. Microstructural evolution and mechanical properties of high purity aluminium processed by equal-channel angular pressing. *Materials transactions*, 49(1), pp.15-19.
51. Horita, Z., Kishikawa, K., Kimura, K., Tatsumi, K. and Langdon, T.G., 2007. Grain refinement of high-purity FCC metals using equal-channel angular pressing. In *Materials Science Forum* (Vol. 558, pp. 1273-1278). Trans Tech Publications.

Abstract

Equal Channel Angular Pressing (ECAP) is one of the most effective methods for inducing severe plastic deformation in order to produce ultrafine grained and even nanostructured materials. Among the metals, aluminum alloys, due to high strength to weight ratio, are used extensively in the aerospace industry, military and medical sectors. By refining the grain size of such materials, this ratio can be increased. In this study, the number of ECAP passes on microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum is studied. Samples with circular cross section with a diameter of 12 mm and a length of 140 mm were pressed in a die having circular channels oriented at 90 degrees with respect to each other. Route B_c was used for all experiments. Samples ECAPed at room temperature were failed by cracking oblique to the axial direction. Therefore, by heating the die, the operation was performed at 130 °C. Samples were successfully warm ECAPed up to 10 passes. The microstructure, microhardness and strength of the recovered samples were studied. The results show that aluminum alloy 7075 has a high potential for grain refinement and thus increase in strength and microhardness in first pass of process. After second pass, the strength was reduced and ductility enhances.

Keywords: Severe plastic deformation (SPD), Equal channel angular Pressing (ECAP), Ultrafine grained materials (UFG), Aluminium alloy, Strength.



**Shahrood University of Technology
Kharazmi International Campus**

**Investigation of the effect of number of forming passes on the
mechanical properties of 7075 aluminum alloy in equal channel
angular pressing**

Presented for Master of Science in Mechanical Engineering

Hamed Khodabakhshian

Supervisor:

Dr. S.Hadi Ghaderi

September 2016