





دانشکده‌ی مهندسی مکانیک

رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

بررسی اثر تعداد پاس‌های شکل‌دهی بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ مس
کروم زیرکونیم، طی فرایند پرس‌کاری در کانال‌های همسان زاویه‌دار

نگارنده: رضا سلمانی

استاد راهنما:

دکتر سید هادی قادری

استاد مشاور:

دکتر مجتبی قطعی

بهمن ۱۳۹۴

دانشکده: مهندسی مکانیک

گروه: ساخت و تولید

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای رضا سلمانی به شماره دانشجویی ۹۲۳۶۹۲۴ تحت عنوان بررسی اثر تعداد پاس‌های شکل‌دهی بر ریز ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ مس کروم زیرکونیم ، طی فرایند پرس‌کاری در کانال‌های همسان زاویه‌دار در تاریخ ۱۳۹۴/۱۱/۲۷ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد در مهندسی مکانیک-ساخت و تولید مورد ارزیابی و با درجه‌ی عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	دکتر مجتبی قطعی		دکتر سید هادی قادری

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

تقدیم‌نامه

تقدیم به ساحت مقدس حضرت ولی عصر (عج)، باشد که از سربازان راستین آن حضرت در این مسیر باشیم.

اگر چه این تلاش کوچک خود را لایق محبت‌های بی دریغ و دلسوزانه شما پدر و مادر عزیزم نمی‌دانم اما تلاشم به امید خوشحالی و رضایت شما بوده، امیدوارم که قدری از خستگی‌های پدر و زحمات مادر عزیز تر از جانم را التیام بخشد.

سپاس‌گزاری

خداوند بزرگ و متعال را شاکر و سپاسگذارم که سلامتی و توفیق تحصیل علم و دانش را به من عنایت فرمود.

از زحمات و کمک‌های بی دریغ و دلسوزانه‌ی استاد گرانقدر و بزرگوارم جناب آقای دکتر سید هادی قادری کمال تشکر و قدردانی را دارم. از استاد مشاور گرانقدرم جناب آقای دکتر مجتبی قطعی سپاس‌گزاری می‌کنم. شاگردی این اساتید را مایه افتخار خود دانسته و از خداوند متعال برای این عزیزان، سلامتی و موفقیت روز افزون در تمام مراحل زندگی را خواستارم از خانواده عزیزم که وجودشان همیشه مایه دلگرمی من است قدردانی می‌کنم

تعهد نامه

اینجانب رضا سلمانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان‌نامه ((بررسی اثر تعداد پاس‌های شکل‌دهی بر ریز ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ مس کروم زیرکونیم ، طی فرایند پرس‌کاری در کانال‌های همسان زاویه‌دار)) تحت راهنمایی دکتر سید هادی قادری متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه 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 پایان نامه 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 می باشد 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، 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، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

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

چکیده

در سال‌های اخیر، بررسی روش‌های تولید و خواص مکانیکی مواد با اندازه دانه نانومتری یا بسیار ریزدانه موضوع بسیاری از تحقیق‌های انجام شده در زمینه علم مواد و علوم مرتبط با آن بوده است. یکی از بهترین روش‌ها برای دستیابی به خواص مکانیکی مواد با اندازه دانه نانومتری در فلزات روش پرس در کانال‌های همسان زاویه‌دار (ECAP) است. این روش به گونه‌ای عمل می‌کند که از ایجاد ترک و شکست در حین فرایند جلوگیری کرده و ابعاد نمونه خام اولیه بعد از انجام فرایند تغییر نمی‌کند. در این پایان نامه به مطالعه تجربی فرایند پرس در کانال‌های همسان زاویه‌دار پرداخته شده است و جهت انجام آزمایش‌های تجربی از آلیاژ مس، کروم، زیرکونیم به صورت میلگرد به قطر mm ۱۲ و طول mm ۱۲۰ برای هر نمونه استفاده شده است. یکی از ویژگی‌های قابل ملاحظه و مورد بحث فرایند پرس در کانال‌های همسان زاویه دار امکان دست یابی به ویژگی‌هایی با درجه کیفیت بالاتر با تکرار انجام این فرایند بر روی نمونه آزمایش شده می‌باشد. در این تحقیق، این فرایند تا ۵ مرحله بر روی آلیاژ مورد نظر انجام شد و توسط انجام آزمایش‌های تجربی ویژگی‌های نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که آلیاژ مس، کروم، زیرکونیم قابلیت بالایی در ریزدانه شدن و افزایش استحکام را توسط این فرایند دارد. با دریافت تصاویر متالوگرافی توسط میکروسکوپ نوری از نمونه‌های آماده سازی شده توسط پولیش کاری و اچ کردن سطح نمونه به صورت واضح قابل مشاهده است که در پاس اول به میزان قابل ملاحظه‌ای اندازه دانه‌ها کاهش یافته و تعداد دانه‌های بیشتری با شکست دانه‌های بزرگتر تشکیل شده است. در نمونه‌های پاس اول به بعد که مقدار این کاهش اندازه دانه بیشتر بود از میکروسکوپ الکترونی جهت مشاهده دانه‌بندی‌ها استفاده شد. این آلیاژ در پاس سوم از فرایند ECAP به بالاترین سختی در حد ۱۸۵HV1 رسیده است در صورتی که سختی نمونه خام اولیه قبل از انجام فرایند ۱۵۵HV1 بوده است فرایند ECAP تاثیر خوبی بر روی میزان استحکام کششی این آلیاژ داشته و استحکام کششی ماده را به ۶۱۵ MPa رسانده است.

واژگان کلیدی: پرس در کانال‌های همسان زاویه دار؛ آلیاژ مس-کروم-زیرکونیم؛ خواص مکانیکی؛ مواد بسیار ریز دانه؛ سختی.

فهرست عنوان‌ها

فهرست شکل‌ها.....ک

فهرست جدول‌ها.....ل

فهرست نشانه‌ها.....م

فصل ۱ مقدمه

فصل ۱ مقدمه.....۲

۱-۱- تغییر شکل شدید مومسان ۴

۱-۱-۱ تغییر شکل در کانال‌های همسان زاویه‌دار (ECAP) ۵

۱-۱-۲ پیچش با فشار بالا (HPT) ۷

۱-۱-۳ فرآیند آهنگری چند جهته (MDF) ۸

۱-۱-۴ فرآیند پیوند نوردی انباشتی (ARB) ۸

۱-۱-۵ فرآیند اکستروژن- فشردن تناوبی (CEC) ۹

۱-۱-۶ روش کنگره دار کردن و صاف کردن متوالی (RCS) ۱۰

۱-۱-۷ فرآیندهای تغییر شکل مومسان شدید برای لوله‌ها ۱۱

۱-۲- بررسی عوامل موثر در فرایند ECAP ۱۳

۱-۲-۱ تاثیر زاویه قالب بر فرایند ECAP ۱۶

۱-۲-۲ تاثیر زاویه انحنای بیرونی کانال بر فرایند ECAP ۱۶

۱-۲-۳ تاثیر ضریب اصطکاک بر فرایند ECAP ۱۶

۱-۳- معرفی ماده ی مورد تحقیق و خواص آن ۱۷

۱-۳-۱ آلیاژ مس، کروم، زیرکونیم ۱۷

۱-۳-۲ هدایت الکتریکی / گرمایی ۱۸

۱-۳-۳ مقاومت به خوردگی ۱۸

۱-۳-۴ رنگ و ظاهر ۱۹

۱-۳-۵ سخت کاری/ استحکام بخشی ۱۹

۴-۱ پیشنهاد تحقیق ۱۹

۵-۱ اهداف پژوهشی و مروری بر فصل های پایان نامه ۲۲

فصل ۲ آزمایش های تجربی

فصل ۲ آزمایش های تجربی.....۲۴

۲۴	۱-۲- مواد و روش ها
۲۴	۱-۱-۲ مواد خام اولیه و قالب ECAP
۲۶	۲-۱-۲ اجزایی قالب ECAP
۲۷	۲-۲- انجام آزمایش ECAP
۳۰	۳-۲- آماده سازی نمونه های آزمایش
۳۰	۱-۳-۲ آماده سازی نمونه های سختی سنجی
۳۲	۲-۳-۲ آماده سازی نمونه تست کشش
۳۴	۴-۲- اندازه گیری سختی
۳۵	۵-۲- تست کشش
۳۷	۶-۲- متالوگرافی و کاربرد آن
۳۸	۱-۶-۲ مطالعات میکروسکوپی ساختار فلزات و آلیاژ ها
۳۹	۲-۶-۲ وسایل و تجهیزات مورد استفاده در متالوگرافی
۴۰	۳-۶-۲ میکروسکوپ الکترونی
۴۱	۷-۲- عملیات آماده سازی و تهیه یک مقطع متالوگرافی
۴۱	۱-۷-۲ نمونه برداری
۴۲	۲-۷-۲ قالبگیری (سوار کردن) نمونه ها
۴۳	۳-۷-۲ سنباده زنی نمونه ها
۴۴	۴-۷-۲ ظاهر سازی ساختمان - اچ کردن
	فصل ۳ نتایج و بحث

فصل ۳ نتایج و بحث..... ۴۸

۴۸	۱-۳- نتایج بدست آمده از ECAP
۵۱	۱-۱-۳ متالوگرافی ماده
۵۴	۲-۱-۳ روش تعیین اندازه متوسط دانه
۵۵	۳-۱-۳ اندازه متوسط دانه
۵۶	۲-۳- بررسی نتایج سختی سنجی
۵۷	۱-۲-۳ سختی سنجی نمونه پاس اول ECAP
۵۸	۲-۲-۳ سختی سنجی نمونه پاس دوم ECAP
۵۹	۳-۲-۳ سختی سنجی نمونه پاس سوم ECAP
۶۰	۴-۲-۳ سختی سنجی نمونه پاس چهارم ECAP
۶۲	۵-۲-۳ سختی سنجی نمونه پاس پنجم ECAP
۶۳	۳-۳- تاثیر تعداد پاس های ECAP بر سختی ماده
۶۳	۴-۳- نتایج بدست آمده از تصویر SEM

۳-۴-۱ اندازه گیری ریز دانه های نمونه ۶۵

۳-۵- نتایج تست کشش ۶۸

فصل ۴ نتیجه گیری و پیشنهادها

فصل ۴ نتیجه گیری و پیشنهادها ۷۲

۴-۱- نتیجه گیری ۷۲

۴-۲- پیشنهادها ۷۴

منبع ها ۷۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- نمایش پرامترهای مهم در ECAP [۱]..... ۶
- شکل ۲-۱- فرآیند پیچش با فشار بالا، (الف) با سنبه چرخان، (ب) با قالب چرخان و (ج) نمونه تحت فرآیند [۵]..... ۷
- شکل ۳-۱- شماتیک فرآیند آهنگری چند جهته [۶]..... ۸
- شکل ۴-۱- شماتیک مراحل فرآیند ARB [۷]..... ۹
- شکل ۵-۱- شماتیک فرآیند آهنگری چند جهته [۶]..... ۱۰
- شکل ۶-۱- شمای کلی از فرآیند RCS [۶]..... ۱۰
- شکل ۷-۱- (الف) مقایسه تفاوت دو روش CGP (بالا) و RCS (پایین) [۸]، (ب) فرآیند کنگره دار کردن دو مرحله‌ای [۹]..... ۱۱
- شکل ۸-۱- مراحل مختلف فرآیند PTCAP برای ایجاد تغییر شکل مومسان شدید بر روی لوله‌ها [۱۱]..... ۱۲
- شکل ۹-۱- شمای کلی و مراحل فرآیند TCP [۱۲]..... ۱۳
- شکل ۱۰-۱- شمای کلی و مراحل فرآیند ECAP [۱۲]..... ۱۴
- شکل ۱۱-۱- مسیرهای مختلف اصلی برای روش ECAP [۱۳]..... ۱۵
- شکل ۱۲-۱- قابلیت انجام عملیات ECAP بر روی ورق‌های ضخیم..... ۱۵

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- مشخصات مواد به کار رفته در آزمایش..... ۱۸
- جدول ۱-۲- محلول اچ آلیاژ مورد تحقیق..... ۴۵
- جدول ۱-۳- متوسط اندازه دانه..... ۵۶
- جدول ۲-۳- نتایج بدست آمده در آزمون کشش نمونه های ECAP ۶۸

فهرست نشانه‌ها

σ_y	تنش تسلیم
σ_0	مقاومت شبکه
d	اندازه دانه
K_y	ضریب هال-پچ
ε_N	کرنش معادل
$\emptyset$	زاوایی برخورد کانال‌ها
T	ضخامت ورق
Z	تعداد دانه های قرار گرفته در دایره
N	تعداد دانه‌هایی که محیط دایره را قطع می‌کنند
F	مساحت
F_m	اندازه متوسط هر دانه
Ψ	انحنایی خارج قالب

فصل اول: مقدمه

در سال‌های اخیر، بررسی روش‌های تولید و خواص مکانیکی مواد 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 آبر فلز^۲ شناخته می‌شوند، خواص بی‌نظیری 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 می‌دهند. تغییر الگوهای لغزش متداول در مواد با اندازه دانه نانومتری و فعال شدن مکانیزم‌های لغزش مرزدانه‌ای از ویژگی‌های این مواد است که منجر به خواص مکانیکی منحصر به فرد آنها می‌شود. تاکنون روش‌های مختلفی برای تولید مواد نانومتری ارائه شده و تحقیقات گسترده‌ای روی آنها انجام شده است. روش‌های تولید مواد نانومتری را می‌توان به دو گروه کلی تقسیم بندی کرد. روش اول که تحت عنوان روش پایین به بالا^۳ معرفی شده است، شامل فرآیندهایی نظیر آلیاژ سازی مکانیکی^۴، رسوب شیمیایی بخار^۵ و انجماد سریع^۶ است، که قابلیت تولید دانه‌هایی با اندازه‌ای در حدود ۱۰ تا ۵۰ نانومتر را دارند. این فرآیندها به طور گسترده‌ای برای تولید مقادیر زیاد پودرهای نانوبلور 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 روش‌های مکانیکی، پرس سرد آنها تقریباً غیر ممکن است. از طرف دیگر استفاده از پرس داغ برای زینتر 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. روش دوم برای تولید مواد با اندازه دانه نانومتری که با نام روش بالا به پایین^۷ شناخته می‌شود، شامل فرآیندهای متعددی است که با اعمال کرنش‌های شدید پلاستیک در مواد فلزی باعث

¹ Ultrafine Grained

² Super Metals

³ Bottom-up Procedure

⁴ Mechanical Alloying

⁵ Chemical Vapor Deposition

⁶ Rapid Solidification

⁷ Top-down procedure

کاهش اندازه دانه ها تا مقیاس نانومتری می شوند. علت انتخاب این نام برای روش مذکور این است که اساس آن کاهش مستقیم اندازه دانه ها در نمونه ای با ابعاد بزرگ است. این فرآیندها به عنوان روش هایی جدید برای تولید مواد نانو کریستالی یا بسیار ریزدانه در مقیاس صنعتی مطرح شده و در بسیاری موارد با موفقیت هایی نیز همراه بوده اند.

در دو دهه ی اخیر مواد پلی کریستال با دانه بندی بسیار ریز در حد نانومتر و یا چند صد نانومتر (کمتر از میکرومتر) به دلیل برخورداری از خواص مکانیکی و فیزیکی ویژه [۲] شدیداً مورد توجه محققان قرار گرفته اند. خواص مکانیکی و فیزیکی مواد کریستالی تحت تاثیر فاکتور های متعددی می باشند که اندازه متوسط دانه در تعیین این خواص تاثیر بسزایی دارد. به طور کلی مطابق رابطه ی ۱-۱ (رابطه هال-پچ^۸) استحکام ماده با عکس مجذور اندازه دانه ی آن متناسب است. به عبارت دیگر با کوچک شدن اندازه دانه استحکام ماده افزایش می یابد.

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

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).

یکی از رویکردهای جدید برای تولید مواد نانو کریستال^۹ (NC) و مواد با دانه های بسیار ریز UFG اعمال تغییر شکل شدید مومسان بر روی نمونه اولیه با دانه های درشت می باشد. در این روش با اعمال کرنش های شدید به نمونه، طی چندین مرحله اندازه های دانه آن تا مقیاس نانومتری کاهش می یابد و این امر باعث بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی ماده می شود. [۱-۲]. از آن جایی که تغییرات ابعادی ماده می تواند مانعی در مقابل میزان کرنش اعمالی باشد، لذا اکثر روشهای SPD به نحوی طراحی شده اند که ابعاد نمونه در حین فرایند ثابت مانده و تغییر نمی کند [۱-۲].

⁸ Hall-Petch equation

⁹ Nano crystalline

۱-۱- تغییر شکل شدید مومسان

روش تغییر شکل شدید مومسان^{۱۰} (SPD) به عنوان یکی از روش‌های تولید مواد با اندازه دانه نانومتری مطرح می‌باشد. 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 دانه‌ها تا 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 پلاستیکی بدون تغییر ابعاد نمونه‌ها؛ عدم وجود محدودیت در اعمال کرنش، زیرا از لحاظ نظری تعداد دفعات انجام فرآیندها نامحدود است؛ امکان تهیه نمونه‌های بسیار ریزدانه 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.

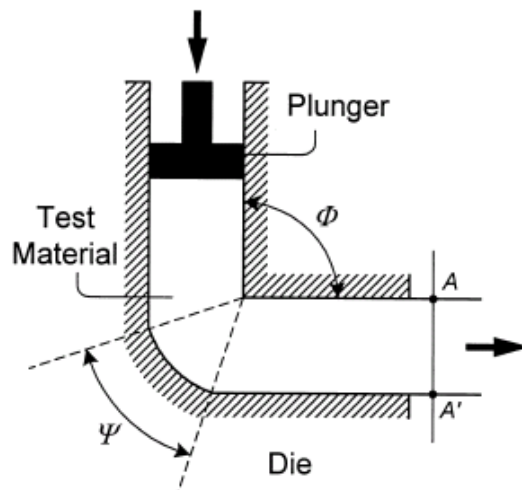
¹⁰ Sevar Plastic Deformation

۱-۱-۱ تغییر شکل در کانال‌های همسان زاویه‌دار^{۱۱} (ECAP)

یکی از مهم‌ترین روشهای SPD، اکستروژن در کانال‌های همسان زاویه دار (ECAP) است. فرآیند تغییر شکل در کانال‌های همسان زاویه‌دار توسط سگال و همکارانش معرفی شده است [۱]. در این فرآیند نمونه فلزی به داخل قالبی با کانال مشابه که نسبت به هم زاویه‌دار 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 ۹۰ درجه تقریباً برابر با یک است. در این فرآیند مسیر کرنش اهمیت زیادی دارد و گزارش شده که چرخش نمونه بین سیکل‌های ECAP می‌تواند باعث تغییر در شکل‌گیری ریزساختار ماده بشود.

فرایند ECAP روشی موثر جهت تولید مواد با ساختار UFG بوده تا از این طریق خواص مکانیکی و فیزیکی آنها را بطور چشم‌گیری بهبود بخشد [۲-۳]. از دیگر مزایای این فرایند می‌توان به دستیابی حجم بسیار قابل توجه از دانه‌های بسیار ریز درون مواد پلی کریستال برای مصارف صنعتی با قیمت مناسب اشاره نمود [۳-۴]. طی فرایند 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.

¹¹ Equal channel angular pressin



شکل ۱-۱- نمایش پرامترهای مهم در ECAP [۱].

با عبور ماده از تقاطع دو کانال تغییر شکل برشی ساده درون آن ایجاد می شود. با ثابت بودن سطح مقطع ماده در هر عبور (پاس) مقدار قابل ملاحظه‌ای کرنش مومسان مطابق رابطه‌ی ۱-۲ درون آن ایجاد می‌شود [۳].

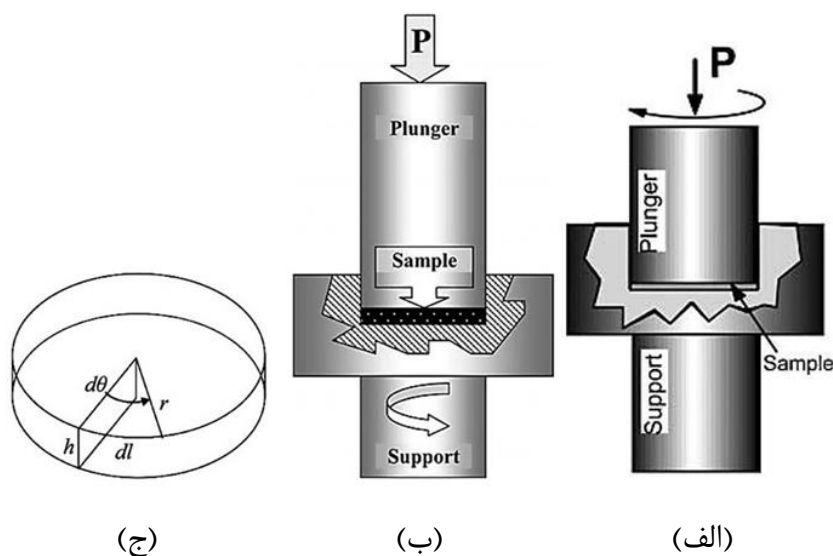
$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \cos \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (۱-۲)$$

در این رابطه Φ و Ψ به ترتیب زوایای برخورد کانال‌ها و انحنایی خارج قالب ECAP، N تعداد دفعات عبور ماده از کانال‌های قالب و ε_N کرنش معادل^{۱۲} به ازای هر مرحله انجام فرایند ECAP می‌باشند. رابطه ۱-۲ بدون در نظر گرفتن ضریب اصطحکاک 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 مومسان در حین سیلان ماده درون کانال‌های قالب بستگی دارد [۳]. از مهم ترین عواملی که بر این کمیت ها تاثیر گذارند می‌توان به زاویه برخورد کانال‌ها Φ و زاویه‌ی انحنای خارجی Ψ قالب اشاره نمود.

¹² Total strain

۲-۱-۱ پیچش با فشار بالا^{۱۳} (HPT)

در این روش که شماتیک آن در شکل ۲-۱ 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، به پس از اعمال فشار، سنبه ثابت بوده و در عوض، قالب می‌چرخد [۵].



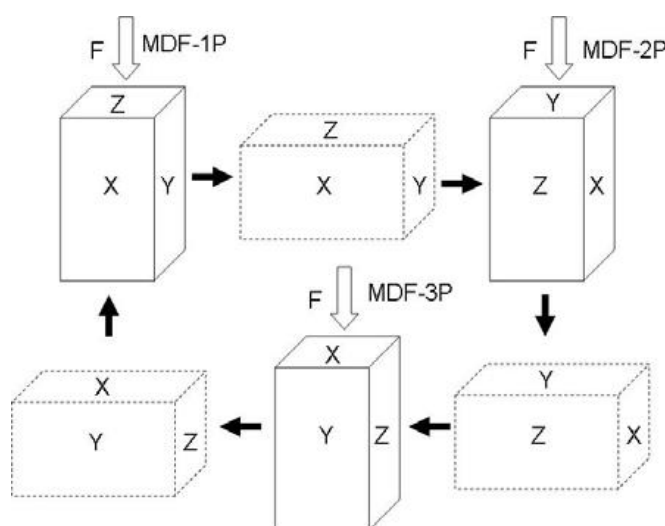
شکل ۲-۱- فرآیند پیچش با فشار بالا، (الف) با سنبه چرخان، (ب) با قالب چرخان و (ج) نمونه تحت فرآیند [۵].

این فرآیند نیاز به نیروهای نسبتاً بالایی دارد. پارامترهای کنترلی اصلی در اینجا، یکی مقدار فشار اعمالی است و دیگری مقدار زاویه دوران. در اینجا 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. بنابراین باعث می‌شود که از نظر توزیع کرنش، به جای یکنواختی، شیب کرنشی در راستای شعاعی وجود داشته باشد.

¹³ High Pressure Torsion

۳-۱-۱ فرآیند آهنگری چند جهته^{۱۴} (MDF)

در این فرآیند، یک قطعه مکعب مستطیل شکل در جهت محور Z فشرده می‌شود و باعث افزایش و تغییر طول و عرض آن در جهت‌های X و Y می‌شود. این فرآیند پس از نیرو در دو جهت دیگر به شکل اولیه می‌رسد. شکل ۳-۱ به طور شماتیک این فرآیند را نمایش می‌دهد [۶].



شکل ۳-۱-۳ شماتیک فرآیند آهنگری چند جهته [۶].

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.

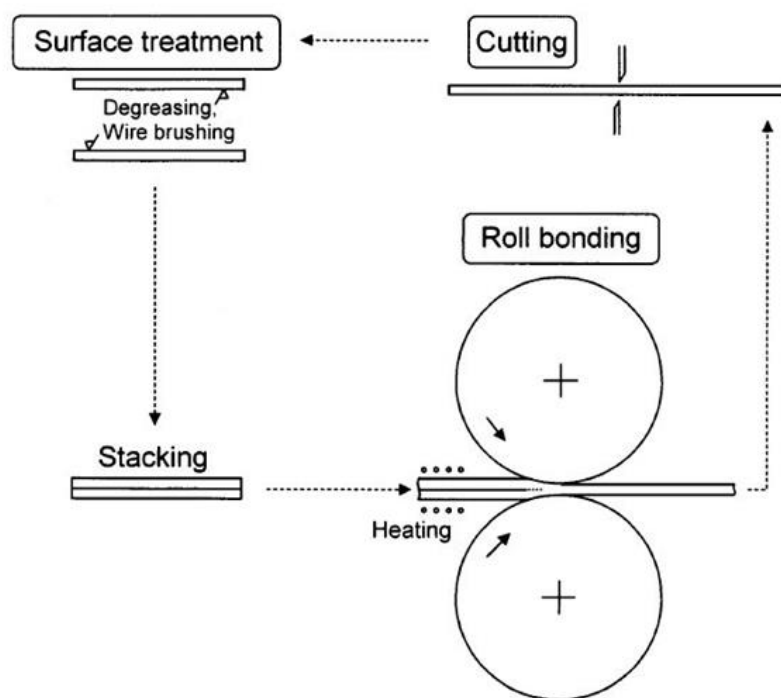
۴-۱-۱ فرآیند پیوند نوردی انباشتی^{۱۵} (ARB)

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 می‌گیرند. فرآیند نورد باید به گونه‌ای 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

¹⁴ Multi-directional forging

¹⁵ Accumulative roll bonding

هر کدام زیر شده و روی هم قرار می‌گیرد. سپس مجدداً تحت فرآیند نورد به صورت ذکر شده قرار خواهند گرفت. تکرار این فرآیند باعث می‌شود که در هر پاس تغییر شکل نسبتاً بالای به هر لایه اعمال گردد و تغییر شکل مومسان شدیدی را در کل ورق سبب شود. این فرآیند به صورت شماتیک در شکل ۴-۱ آورده شده است [۷].



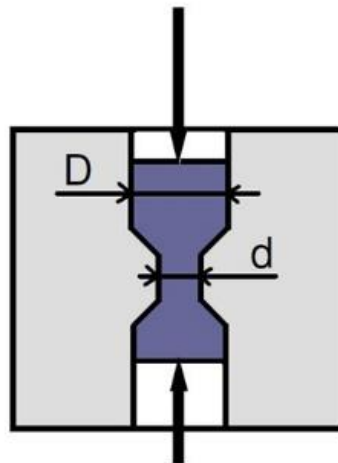
شکل ۴-۱- شماتیک مراحل فرآیند ARB [۷].

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 لایه‌ها دچار تغییر شکل مومسان شدید شده‌اند.

۵-۱-۱ فرآیند اکستروژن- فشردن تناوبی^{۱۶} (CEC)

تصویر شماتیک فرآیند CEC در شکل ۵-۱ 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 اکستروژن 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 [۶].

¹⁶ Cyclic extrusion-compression

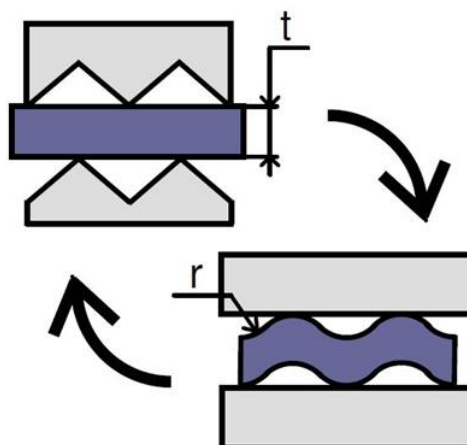


شکل ۱-۵- شماتیک فرآیند آهنگری چند جهته [۶].

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

۱-۱-۶ روش کنگره دار کردن و صاف کردن متوالی^{۱۷} (RCS)

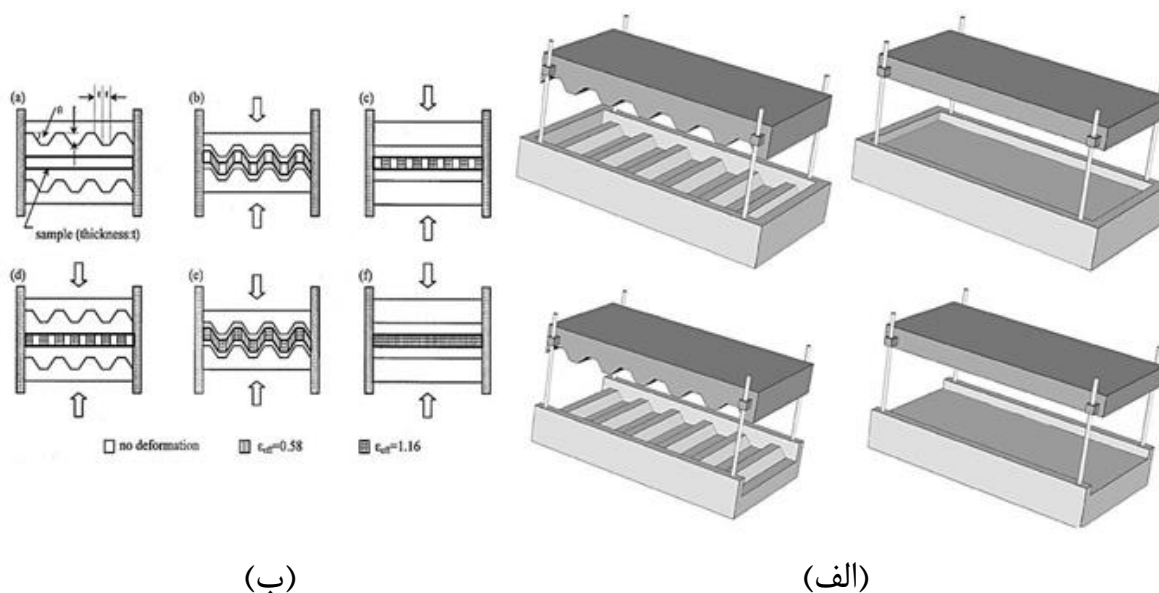
در این روش، ورق ابتدا در یک قالب قرار گرفته تا به صورت کنگره‌ای شکل در بیاید. سپس این ورق کنگره ای در قالب دیگری قرار داده شده و مجدداً صاف می‌شود. تکرار این فرآیند سبب کرنش‌های مومسان شدید در ورق می‌شود. شکل ۱-۶ این فرآیند را نشان می‌دهد [۶].



شکل ۱-۶- شمای کلی از فرآیند RCS [۶].

¹⁷ Repetitive corrugation and straightening

این روش، همانند برخی از روش‌های ذکر شده در بالا، خود دارای زیر مجموعه‌هایی است که به نوعی مدل‌های اصلاح شده این فرآیند است. به طور مثال، کنگره‌دار 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 (CGP) که به نوعی منتج شده از روش RCS است ابداع گردید. در این روش نیز همانند روش قبل، کنگره‌دار شدن ورق در دو مرحله اتفاق می‌افتد. شکل ۷-۱، مقایسه‌ای بین دو روش RCS و CGP را از نظر نوع قالب را نشان می‌دهد و همچنین نحوه فرآیند کنگره دار کردن در دو مرحله را نشان می‌دهد [۸-۹]



شکل ۷-۱- (الف) مقایسه تفاوت دو روش CGP (بالا) و RCS (پایین) [۸]، (ب) فرآیند کنگره دار کردن دو مرحله‌ای [۹]

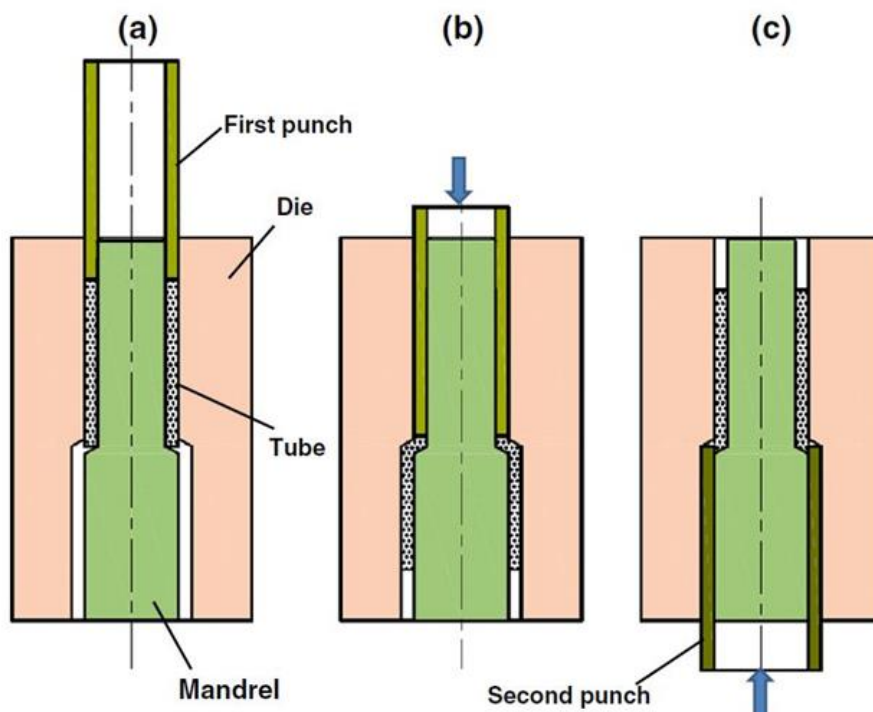
۷-۱-۱ فرآیندهای تغییر شکل مومسان شدید برای لوله‌ها

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^{۱۸} از [۳] و یا روش پیوند چرخشی تجمعی^{۱۹} [۱۰] اشاره نمود. ولی روش بهتری توسط فرجی

¹⁸ High-pressure tube twisting

¹⁹ Accumulative spin-bonding

و همکارانش [۱۱] با نام روش فشردن در کانال زاویه‌دار لوله‌ای موازی^{۲۰} (PTCAP) ارائه شده که به نوعی شبیه فرآیند ECAP است. تصویر این فرآیند در شکل ۸-۱ آورده شده است.



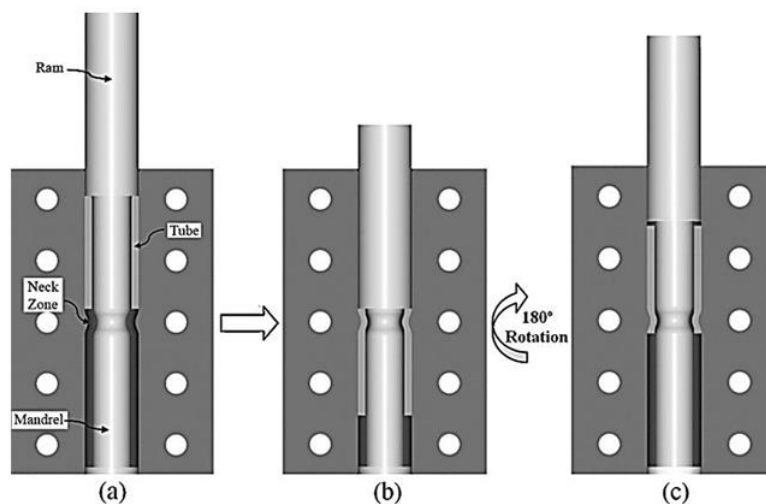
شکل ۸-۱- مراحل مختلف فرآیند PTAP برای ایجاد تغییر شکل مومسان شدید بر روی لوله‌ها [۱۱].

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

دو مرحله‌ای بودن و همچنین افزایش قطر لوله در اثر این فرآیند می‌تواند یکی از عیوب این فرآیند محسوب شود. شاید بهترین روشی که اخیراً برای لوله‌ها پیشنهاد شده است، روشی باشد که توسط زنگی آبادی و کاظمی نژاد [۱۲] با عنوان فشردن در کانال لوله‌ای^{۲۱} (TCP) ارائه شده است. تصویر شماتیک این فرآیند در شکل ۹-۱ آورده شده است.

²⁰ Parallel tubular channel angular pressing

²¹ Tube Channel Pressing



شکل ۱-۹- شمای کلی و مراحل فرآیند TCP [۱۲].

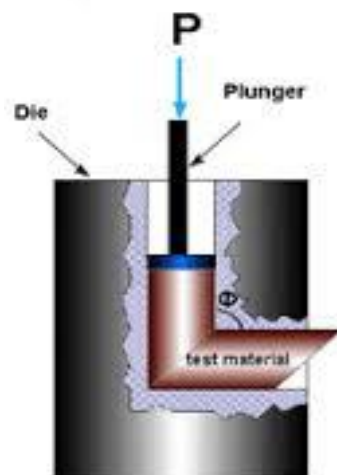
این فرآیند شامل یک قالب با کانال استوانه‌ای است که در وسط مسیر کانال، دارای یک گلوگاه با قطر کمتر از قطر اولیه می‌باشد. قطر داخلی لوله توسط ماندزل^{۲۲} کنترل می‌شود که در وسط میله ماندزل، جایی که به گلوگاه کانال می‌رسد، قطر آن مشابه با گلوگاه کاهش می‌یابد؛ به طوری که فاصله بین گلوگاه و ماندزل همواره برابر قطر اولیه لوله است. سپس با یک سنبه لوله‌ای شکل (هم قطر با لوله تحت فرآیند) از بالا، لوله به داخل کانال فشرده می‌شود.

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 می‌گردد. هنگامی که سنبه به گلوگاه قالب رسید (شکل ۱-۹، b)، برای انجام پاس بعدی، فرآیند را می‌توان از سمت دیگر تکرار نمود. با توجه به ابعاد قالب، می‌توان از دو لوله پشت سر هم استفاده کرد تا کل لوله SPD شده از سمت دیگر بتواند خارج شود.

۱-۲- بررسی عوامل موثر در فرآیند ECAP

قالب این روش، دارای یک کانال برای ورود قطعه مورد نظر است که در وسط مسیر کانال، دارای یک تغییر زاویه می‌باشد. شماتیک این روش در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است.

²² Mandrel

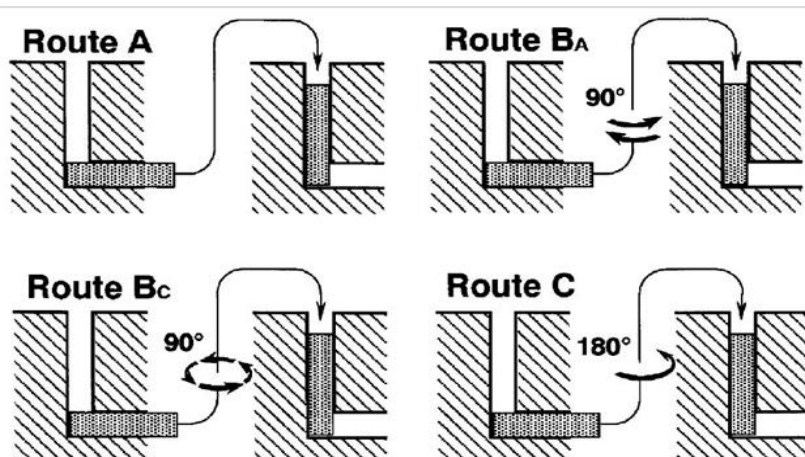


شکل ۱-۱- شمای کلی و مراحل فرآیند ECAP [۱۲].

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 رؤس 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 روش‌های مرسوم شکل دهی است.

با توجه به سطح مقطع نمونه‌ی تحت ECAP، می‌توان مسیرهای^{۲۳} مختلفی برای این فرآیند انتخاب نمود. این مسیرها می‌تواند شامل چرخاندن نمونه برای پاس بعدی به میزان ۱۸۰ درجه حول محور اصلی نمونه و یا ۹۰ درجه (در صورت وجود تقارن) و همچنین شامل سر و ته کردن نمونه باشد. برخی از این مسیرها تنها برای نمونه‌های با مقطع چند ضلعی قابل اعمال است. شکل ۱-۱۱ نمونه‌ای از این مسیرها را که به عنوان مسیرهای اصلی هستند، مشخص کرده است. هر کدام از این مسیرها، میدان‌های تنش‌های متفاوتی در نمونه‌ها ایجاد می‌کنند.

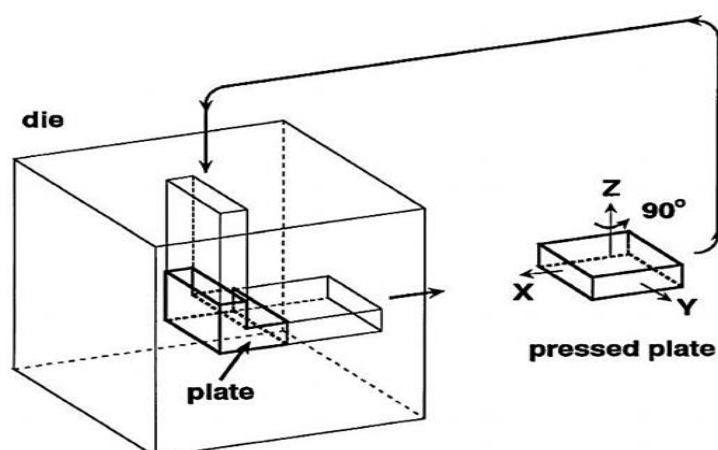
²³ Route



شکل ۱-۱۱- مسیرهای مختلف اصلی برای روش ECAP [۱۳].

در این تحقیق از مسیر بارگذاری A استفاده شده است. علت استفاده از این نوع مسیر تحقیقاتی بود این آزمایش می‌باشد و می‌توان تاثیرات این فرایند را بر روی آلیاژ مورد تحقیق طی مسیرهای مختلف دیگر مورد تحقیق 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^{۲۴} را هم دارد که در این حالت، مسئله مسیرهای مختلف، بیشتر خود را نشان می‌دهد. در شکل ۱-۱۲ این فرایند نمایش داده شده است.



شکل ۱-۱۲- قابلیت انجام عملیات ECAP بر روی ورق‌های ضخیم.

۱-۲-۱ تاثیر زاویه قالب بر فرایند ECAP

در بررسی نحوه توزیع کرنش مومسان در قالب‌هایی با زوایای مختلف مشاهده می‌شود که در قالب‌های با زاویه کانال مختلف، توزیع کرنش غیر یکنواخت می‌باشد. با افزایش زاویه قالب از میزان کرنش مومسان قابل اعمالی کاسته می‌شود. علاوه بر این با توجه به نحوه تغییرات کرنش مومسان در طول مسیر AB، آن را می‌توان به دو ناحیه مجزا تقسیم کرد: ناحیه I که تقریباً ۲.۵ میلیمتر قسمت پایینی نمونه را شامل می‌شود. توزیع کرنش مومسان در این ناحیه غیر یکنواخت است و از سطح پایینی به طرف داخل نمونه، کرنش مومسان افزایش می‌یابد. علت پایین بودن کرنش مومسان اعمالی در این ناحیه، تشکیل فاصله هوایی (منطقه پر نشده از فلز) بین جداره قالب و نمونه در قسمت محل تقاطع دو کانال قالب می‌باشد [۱۴]. ناحیه II که توزیع کرنش مومسان اعمالی نسبتاً یکنواخت می‌باشد.

۱-۲-۲ تاثیر زاویه انحنای بیرونی کانال بر فرایند ECAP

در بررسی نحوه توزیع کرنش مومسان در قالب‌هایی با زاویه کانال 90° و زوایای انحنای گوشه مختلف نشان داده شده است که با افزایش زاویه انحنای بیرونی محل تقاطع دو کانال (Ψ) فاصله هوایی ایجاد شده در گوشه کانال کاهش پیدا می‌کند به طوری که در زاویه گوشه 45° فاصله هوایی بین نمونه و کانال قالب مشاهده نمی‌شود. با افزایش زاویه انحنای بیرونی کانال از میزان کرنش مومسان اعمالی کاسته می‌شود. یکنواخت ترین توزیع کرنش در طول مسیر AB با انتخاب قالبی با زاویه $\Phi=90^\circ$ و زاویه انحنای بیرونی $\Psi=30^\circ$ درجه حاصل می‌شود [۱۴].

۱-۲-۳ تاثیر ضریب اصطکاک بر فرایند ECAP

با افزایش ضریب اصطکاک، فاصله هوایی بین قالب و نمونه کاهش یافته و بر میزان کرنش مومسان اعمالی افزوده می‌شود. و همچنین با افزایش ضریب اصطکاک تغییر چندانی در میزان کرنش ناحیه II ایجاد نمی‌شود. با افزایش ضریب اصطکاک بین نمونه و قالب بر میزان کرنش اعمالی ناحیه I افزوده می‌شود. با افزایش ضریب اصطکاک از ۰ تا ۰.۰۶ توزیع کرنش مومسان اعمالی در طول مسیر AB یکنواخت تر می‌شود که دلیل آن افزایش کرنش مومسان در ناحیه I در اثر از بین رفتن فاصله هوایی بین نمونه و دیواره قالب می‌باشد. با افزایش بیشتر ضریب اصطکاک توزیع کرنش دوباره غیر یکنواخت می‌شود [۱۴].

۱-۳- معرفی ماده ی مورد تحقیق و خواص آن

در میان مواد مهندسی، فقط مس است که دارای ترکیب خوبی از هدایت الکتریکی و حرارتی بالا و استحکام، انعطاف پذیری، ماشین کاری خوب همراه با مقاومت به خوردگی، اکسیداسیون، خزش و خستگی می باشد. سهولت جوشکاری و اتصال دهی یکی دیگر از خواصی است که مورد توجه قرار می گیرد. مهمترین علت استفاده از مس خالص، هدایت الکتریکی بالای آن است. برای دستیابی به بیشترین هدایت الکتریکی و حرارتی، مس باید عاری از هر گونه ناخالصی باشد. در مواردی که نیاز به استحکام و سختی بالا باشد، مس خالص به واسطه نرمی ذاتی کاربرد ندارد. برای مصارفی که هدایت الکتریکی خوب، استحکام بالا و خواص دمای بالا احتیاج است، آلیاژهای حاوی کروم یا بریلیم استفاده می گردند. اضافه کردن این عناصر به مس خالص باعث کاهش هدایت الکتریکی آن می شود؛ لذا آلیاژ برای رسیدن به حالت بهینه استحکام و هدایت الکتریکی باید تحت عملیات حرارتی قرار بگیرد. اضافه کردن نقره به مس خالص دمای نرم شوندگی مس را بالا برده ضمن اینکه اثر کمی بر هدایت الکتریکی دارد. نقره همچنین خواص مکانیکی مس به ویژه مقاومت خزشی آن را بهبود می دهد. آلیاژهای مس به خاطر چنین خصوصیات کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف دارند. اما به دلیل قیمت افزایشی مس و دستیابی به مواد مطلوب ارزانتر و با روش های ساخت بهتر، روند استفاده از آن نزولی شده است. حدود ۷۵ درصد مس استخراج شده در صنایع الکتریکی برای انتقال الکتریسیته و بقیه آن به دلیل هدایت حرارتی خوبی که دارند در تجهیزاتی که انتقال حرارت در آنها موردنظر است و در صنایع دستی و هنری به دلیل رنگ و شکل پذیری خوب به کار می روند. اگر چه استحکام تسلیم بعضی از آلیاژهای مس بالا است ولی استحکام آنها نوعاً کمتر از آلیاژهای آلومینیم و منیزیم است. در عوض مقاومت خستگی، خزشی و سایشی آلیاژهای مس از آلیاژهای آلومینیم و منیزیم بهتر است.

۱-۳-۱ آلیاژ مس، کروم، زیرکونیوم

آلیاژ مس، کروم، زیرکونیوم با نام اختصاری CuCr1Zr و کد استاندارد C18150 است. در این آلیاژ مقدار عنصر زیرکونیوم (Zr) در حدود ۰.۰۸٪، مقدار عنصر کروم (Cr) در حدود ۰.۶۵٪ و مابقی را عنصر مس (Cu) تشکیل می دهد. از این آلیاژ به دلیل دارا بودن هدایت الکتریکی بالا، در تهیه انواع

سره و الکترو، هولدر و چپقی در صنعت جوش مقاومتی استفاده می‌گردد. این آلیاژ به صورت میلگرد با قطر ۱۲mm از شرکت نوین پردازان واقع در شهرک صنعتی البرز استان قزوین تهیه شده و صحت ترکیب مواد اولیه توسط مهندسین این شرکت مورد آزمایش قرار گرفته است و جدول ۱-۱ مشخصات آلیاژ مس کروم زیرکونیوم را نمایش می‌دهد.

جدول ۱-۱- مشخصات مواد به کار رفته در آزمایش.

خواص ماده	
≥ 480	استحکام کششی ($\frac{N}{mm^2}$)
≥ 430	استحکام فشاری ($\frac{N}{mm^2}$)
≥ 15	میزان کشیدگی %A5
۱۴۰-۱۶۰	سختی بر حسب برینل
۱۵۵-۱۷۵	سختی بر حسب ویکرز
۷۷-۸۵	سختی بر حسب راکول
۴۴-۵۰	قابلیت هدایت ($\frac{Ms}{m}$)

۱-۳-۲ هدایت الکتریکی / گرمایی

مس در بین فلزات مهندسی بالاترین هدایت الکتریکی را دارد. نقره یا دیگر عناصر می‌تواند به مس اضافه شود تا استحکام افزایش یابد بدون آنکه در هادی الکتریسیته بودن آن خللی وارد شود. آلیاژهای مس می‌تواند برای این خاصیت به کار رود زمانی که مقاومت به خوردگی خوب جبران کاهش میزان هدایت الکتریکی را بکند.

۱-۳-۳ مقاومت به خوردگی

همه آلیاژهای مس در مقابل آب و بخار مقاومت به خوردگی دارند. در بسیاری از مناطق روستایی، محیط های دریایی و فضاها صنعتی، آلیاژهای مس به دلیل مقاومت به خوردگی بالا کاربرد دارند. مس و آلیاژهای مس همچنین در برابر محلول های نمکی، خاک ها، کانی های غیر اکسیدی، اسیدهای ارگانیک و سود سوزآور مقاوم است. مس و آلیاژهای آن در برابر بیشتر آمونیاک ها، هالوژن ها، سولفیدها، محلول های حاوی یون های آمونیوم و اسیدهای اکسید کننده مانند اسید نیتریک مقاومت

زیادی ندارد. آلیاژهای مس همچنین در برابر اسیدهای غیر ارگانیک مقاومت کمی دارد. مقاومت به خوردگی آلیاژهای مس از تشکیل لایه چسبنده‌ای بر روی سطح نشأت می‌گیرد. این لایه چسبنده حاصل خوردگی اولیه سطح است که سطح مس را از خوردگی بیشتر محافظت می‌کند.

۱-۳-۴ رنگ و ظاهر

بسیاری از آلیاژهای مس رنگ منحصر به فردی دارند که می‌تواند با تغییر آب و هوا تغییر یابد. برای بیشتر آلیاژهای مس، ایجاد و حفظ سطح استاندارد در شرایط خوردگی شدید آسان است. بسیاری از آلیاژهای مس هم به صورت خام و هم به صورت دارای پوشش روی سطح کاربرد های دکوری دارند. این آلیاژها رنگ منحصر به فردی دارند از صورتی پررنگ تا زرد طلایی و برنزی تیره در شرایط خاص آب و هوایی. قرار گرفتن در معرض هوا می‌تواند رنگ سبز یا برنزی ایجاد کند.

۱-۳-۵ سخت کاری / استحکام بخشی

چهار روش برای استحکام بخشی مس و آلیاژهای آن وجود دارد، کرنش سختی، استحکام بخشی به روش محلول جامد، رسوب سختی و استحکام بخشی به روش پخش فازهای سخت، راه‌های استحکام بخشی به مس هستند .

۱-۴- پیشینه تحقیق

جایا کومر و همکارانش [۱۵] بر روی رفتار مس فوق العاده ریز دانه و آلیاژ مس، کروم، زیرکونیم در فرآیند پرس در کانال‌های همسان زاویه‌دار تحقیق کردند و پس از مطالعه ساختمان میکروسکوپی ماده مشخص شد که اندازه دانه‌بندی آلیاژ پس از ۸ مرحله ECAP از $150\text{ }\mu\text{m}$ به 200 nm کاهش می‌یابد. و به این نتیجه رسیدند که مس فوق العاده ریز دانه و آلیاژ مس، کروم، زیرکونیم در دمای بالای 100°C کاهش سختی در آن به وجود می‌آید. و هر چند نشان دادند که این آلیاژ استحکام اندازه دانه بالایی در دمای 500°C را دارند.

وین‌گرادو و همکارانش [۱۶]، رفتار مکانیکی آلیاژ مس، کروم توسط فرایند اعمال فشار در کانال‌های همسان زاویه‌دار از نظر شکل دانه، ابعاد و موقعیت کریستالوگرافی و توزیع دانه مورد بررسی قرار دادند و تفاوت‌های قابل توجه‌ای در ریز ساختار دانه و خواص مکانیکی آلیاژ مشاهده کردند.

وانگژی کیانگ و همکارانش [۱۷]، بررسی خواص الکتریکی و مکانیکی آلیاژ مس، کروم و زیرکونیم در جریان مستقیم پیوسته را مورد بررسی قرار دادند. این آلیاژ را در دماهای مختلف، برای زمان‌های مختلف با تراکم‌های متفاوت مورد تحقیق قرار گرفت و به این نتیجه رسیدند که هدایت الکتریکی و سختی تا حد زیادی در یک درجه حرارت مناسب بهبود یافته است. و با مشاهده ساختار ماده مشخص شد که تراکم بسیار بالاتر از جابجایی‌ها و ابعاد نانو کروم پس از رسوب می‌باشد. سه دلیل زیر را به عنوان دلایلی جهت هدایت الکتریکی بالاتر و سختی نسبی بیشتر در آلیاژ بیان نموده‌اند. (۱) گرمایش ناشی از جابجایی. (۲) جابجایی الکترون‌ها. (۳) جای خالی و جابجایی‌های ترویج شده توسط نیروی الکترون.

الکسی وین‌گرادو و همکارانش [۱۸]، اثر ترکیب شیمیایی بر ساختار و خواص آلیاژ مس، کروم، زیرکونیم تولید شده توسط پرس در کانال‌های همسان زاویه‌دار را بررسی کردند و توجه ویژه به بهینه‌سازی خستگی و وابستگی غلظت عناصر آلیاژی داشتند و به این نتیجه رسیدند که بهبود قابل توجه در خستگی و افزایش خواص حرارتی و الکتریکی پس از فرایند ECAP می‌توان دست پیدا کرد. و به تازگی اثبات کرده‌اند که آلیاژ مس، کروم، زیرکونیم می‌تواند به صورت موثری در خطوط راه آهن پر سرعت مورد استفاده قرار گیرد و به همین دلیل نیاز به افزایش قابل توجه سختی در این آلیاژ می‌باشد که روش ECAP یکی بهترین روش‌ها برای بالا بردن سختی ماده مورد تحقیق می‌باشد.

رامین جهادی نائینی و همکارانش، تاثیر فرایند پرس با کانال‌های همسان زاویه‌دار بر ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ AM30 منیزیم مورد مطالعه قرار دادند. نتایج، تاثیر قابل توجه فرایند ECAP را در ایجاد ساختار ریز دانه نشان می‌دهد تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که اندازه دانه‌ها از $20\text{ }\mu\text{m}$ در حالت اکستروود شده به $7.2\text{ }\mu\text{m}$ در پاس اول و $3.9\text{ }\mu\text{m}$ در پاس چهارم کاهش یافت. نتایج پاس چهارم افزایش چکش خواری و کاهش استحکام تسلیم را در مقایسه با حالت اکستروود شده نشان داد. این رفتار می‌تواند بر اساس میزان بالای نرم شدن ناشی از تشکیل بافت در مقابل اثر ریز دانه شدن بر استحکام توضیح داده شود. نتایج آزمون سختی در مقطع عرضی نمونه‌ها افزایش سختی و توزیع یکنواخت کرنش در پاس‌های بالاتر فرایند ECAP را نشان داد.

محمد امین رعنائی و همکارانش، در طی تحقیقی، مس خالص تجاری به وسیله‌ی فرآیند اکستروژن در کانال‌های همسان زاویه‌دار (ECAP) طی هشت مرحله تحت تغییر شکل مومسان شدید قرار دادند. تاثیر تغییر شکل مومسان شدید بر ریز ساختار، خواص مکانیکی، هدایت الکتریکی و سایش الکتریکی مس خالص بررسی شد. به‌علاوه، تاثیر کرنش اعمالی بر خواص مکانیکی مس اکستروژن شده در هر مرحله نیز مطالعه گردید. نتایج حاصل از بررسی ریز ساختار ماده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دادند که ساختار کریستالی ماده به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر شکل یافته و پس از ۴ تا ۸ مرحله فرآیند ECAP طیف گسترده‌ای از دانه های بسیار ریز در محدوده‌ی نانو و چند صد نانومتر دیده می‌شوند. خواص مکانیکی پس از هر مرحله انجام فرآیند ECAP توسط آزمون سختی و فشار در دمای محیط اندازه‌گیری و تغییرات آنها گزارش شده است. با شکل‌گیری دانه‌های بسیار ریز (در حدود چند صد نانومتر) درون ساختار کریستالی مس خالص استحکام آن به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته در حالی که هدایت الکتریکی آن به واسطه ایجاد مرز دانه‌های بسیار زیاد اندکی کاهش می‌یابد. از این رو، با استفاده از فرآیند ECAP می‌توان به مس خالص بسیار ریز دانه با قابلیت استحکام و هدایت الکتریکی بالا دست یافت، علاوه بر این نیز با کاهش کرنش اعمالی به میزان ۲۵ درصد در هر مرحله از فرایند ECAP می‌توان به استحکام‌های بالاتر در مس خالص تجاری دست یافت مقاومت در برابر سایش الکتریکی مس خالص تجاری توسط فرایند الکتریکی - حرارتی تخلیه الکتریکی تعیین شد.

حسن خادمی زاده و همکارانش، بررسی پارامترهای موثر بر روش اکستروژن در کانال‌های همسان زاویه‌دار بر روی فلز تیتانیوم را مورد بررسی قرار داده‌اند. ابتدا با شناخت پارامترهای موثر بر این روش، پارامترهای اصلی و عملی انتخاب و پس از آن برای بدست آوردن سطح بهینه این روش برای فلز تیتانیوم اقدام به طراحی جداول آزمایش به روش طراحی آزمایش تاگوچی شد. پس از طراحی جدول آزمایش کلیه آزمایشات به روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار آباکوس اجرا و نتایج بدست آمد و نتایج به روش مذکور بهینه گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که بهینه ترین سطح آزمایش برای ECAP فلز تیتانیوم در بین آزمایشات انجام شده استفاده از قالب با زاویه کانال 120° ، دمای محیط، ۲ پاس و مسیر تکرار است.

امید ابراهیمی و همکارانش، فرآیند اکستروژن در کانال‌های همسان زاویه‌دار، شبیه سازی فرآیند و بررسی تاثیر نوع مسیر در کرنش و یکنواختی آن را بررسی نمودند. که به کمک شبیه سازی 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 ۹۰ درجه و مسیر کرنش Bc را ارائه نمود.

۱-۵- اهداف پژوهشی و مروری بر فصل های پایان نامه

یکی از روش‌های جدید تولید مواد با اندازه دانه نانومتری، روش تغییر شکل به کمک عبور در کانال‌های همسان زاویه‌دار 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 بالا از آلیاژ مس، کرم، زیرکونیم داشته باشیم و با انجام آزمایش‌های متعدد بر روی نمونه‌های ECAP میزان تغییرات در استحکام کششی و سختی ماده مورد نظر را بررسی می‌کنیم و با تحلیل این داده‌ها به یک نتیجه مطلوب دست پیدا خواهیم کرد.

پایان نامه‌ی حاضر شامل چهار فصل می‌باشد. در فصل اول، مقدمه‌های راجع به فرایند و ویژگی‌ها و پارامترهای دخیل در آن آورده شده است. همچنین اشارهای به پژوهش‌های پیشین در این زمینه و اهداف پژوهش شده است. فصل دوم، به آزمایش‌های تجربی اختصاص دارد و در فصل سوم نتایج پژوهش و در نهایت در فصل چهارم، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای ادامه‌ی کار ارائه شده است.

فصل دوم: آزمایش‌های تجربی

فصل ۲ آزمایش های تجربی

برای رسیدن به هدف مورد نظر در این تحقیق علاوه بر انجام عملیات ECAP که با قرار دادن مواد اولیه داخل دوزه قالب ساخته شده و اعمال نیروی فشاری توسط سنبه بر روی ماده خام قرار گرفته داخل قالب و رسیدن به نمونه آماده شده باید پس از آماده سازی های مورد نیاز نمونه آن را تحت آزمایش های کشش و سختی سنجی قرار داد و از مقایسه نتیجه بدست آمده به بهترین حالت ممکن رسید.

۲-۱- مواد و روش ها

مواد اولیه مورد استفاده ای که در این تحقیق مورد آزمایش قرار می گیرد آلیاژ مس، کروم، زیرکونیوم با نام اختصاری CuCr1Zr و کد استاندارد C18150 است. در این آلیاژ مقدار عنصر زیرکونیوم (Zr) در حدود ۰.۰۸٪، مقدار عنصر کروم (Cr) در حدود ۰.۶۵٪ و مابقی را عنصر مس (Cu) تشکیل می دهد.

۲-۱-۱ مواد خام اولیه و قالب ECAP

برای ایجاد تغییر شکل مومسان شدید روی ماده اولیه مورد نظر نیاز به طراحی و ساخت قالب ECAP داریم که با طراحی های انجام شده در نرم افزار سالیدورک^{۲۵} و مطالعه روی ماده اولیه قالب، اقدام به

²⁵ Solid works

ساخت قالب می‌کنیم با توجه به این که جنس قطعه مورد نظر از استحکام بالایی برخوردار است و نیاز به نیروی بالای پرس برای انجام عملیات ECAP می‌باشد در انتخاب ماده اولیه قالب از مواد با استحکام مکانیکی بالا و قابلیت سخت کاری خوب استفاده شده است. که با توجه به ویژگی های مورد نظر از فولاد M040 در بخش های مختلفی از قالب استفاده شده. در شکل ۱-۲ قالب ECAP مورد استفاده در این آزمایش نمایش داده می‌شود.



شکل ۱-۲- قالب ECAP مورد استفاده شده در آزمایش.

برای شروع به انجام آزمایش به تعدادی ماده خام اولیه با ابعاد و سایز مشخص است. ماده خام اولیه که خصوصیات آن به طور کامل توضیح داده شد به صورت شاخه یک متری با قطر ۱۲ mm تهیه شد. با توجه به ابعاد قالب و اندازه های داده شده برای آزمایش ماده خام اولیه را به کمک برشکاری به طول های ۱۲۰ mm 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 است که جهت سهولت انجام آزمایش و کاهش فشار پرس قطر ماده خام اولیه را به میزان ۰.۰۵ mm تا ۰.۱ mm کاهش داده شود. شکل ۲-۲ قطعات ماده خام اولیه که آماده سازی شده است را نمایش می دهد.



شکل ۲-۲- نمونه قطعات خام اولیه.

۲-۱-۲ اجزایی قالب ECAP

قالب مورد استفاده شده در این آزمایش دارای اجزایی مهمی به عبارات زیر می‌باشد.

۱- سنبه

۲- سنبه گیر

۳- ماتریس بالایی

۴- ماتریس پایینی

اجزای فوق جزء مهم‌ترین اجزای یک قالب می‌باشند و علت دو تکه شدن ماتریس در این قالب زاویه انحنای ۹۰ درجه انتهایی کانال و همچنین امکان ساخت آن می‌باشد. قسمت های مرکزی ماتریس که نیاز به سختی بسیار بالا و عملیات حرارتی دارد را از جنس M040 ساخته شده است و پس از اتمام عملیات تراشکاری به کمک عملیات حرارتی سختی ماتریس را تا حد قابل ملاحظه ای بالا برده می‌شود و به صورت پرسی داخل بدنه آن قرار داده شده است.

در این قالب جهت پایین آوردن هزینه ساخت و ایجاد صرفه اقتصادی در تولید آن به جای تراش سنبه و بعد سخت کاری آن‌ها که پروسه زمان بری هم می‌باشد از میل پران‌هایی که با اندازه‌های استاندارد در بازار به صورت آماده موجود می‌باشد استفاده شده است. مزیت استفاده از میل پران‌ها در این است که در اندازه های اسمی دقیق و با سختی های قابل ملاحظه‌ای موجود می‌باشد که قابل استفاده در

این قالب به عنوان سنبه می‌باشد. یکی از معایب میل پران‌ها ترد بودن و شکنندگی بالای آن‌ها می‌باشد که در این آزمایش با استفاده از تعدادی میل پران با طول‌های متفاوت از شکنندگی در هنگام اعمال بار توسط دستگاه پرس جلوگیری شده است و به ترتیب از کوچکترین سنبه تا بلندترین سنبه برای اعمال بار در قالب ECAP استفاده شده است. در شکل ۲-۳ سنبه با طول‌های مختلف مورد استفاده در قالب را نشان داده می‌شود.



شکل ۲-۳- سنبه‌های قالب ECAP.

۲-۲- انجام آزمایش ECAP

برای انجام فرایند ECAP نیاز به مواردی از قبیل مواد خام اولیه، قالب، دستگاه پرس و روانکار قالب مورد نیاز می‌باشد که در بخش‌های اول این فصل به مشخصات کامل مواد خام اولیه و قالب مورد استفاده در فرایند اشاره شده است. دستگاه پرس مورد استفاده در این فرایند باید از نوع پرس‌های هیدرولیکی که امکان اعمال بار را به صورت تدریجی و ملایم را دارند باشد و پرس‌های مکانیکی که اعمال نیرو آنها به صورت ضربه‌ای بوده قابل استفاده نمی‌باشند. پرس مورد استفاده در این آزمایش یک دستگاه پرس هیدرولیکی با ظرفیت اعمال بار تا ۵۰ تن، از شرکت JAR می‌باشد که در شکل ۲-۴ دستگاه پرس هیدرولیکی مورد استفاده در آزمایش، نمایش داده شده است.



شکل ۲-۴- دستگاه پرس هیدرولیکی.

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 جابجایی 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 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 می شود. این جابجایی باید به مقداری باشد که امکان قرار دهی 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 اصطحکاک بین قطعه و بدنه داخلی ماتریس را کاهش می دهد و میزان نیروی لازم برای پرس را به همین نسبت کاهش می دهد . روانکار استفاده شده در این آزمایش به نام Moly Slip EHT یکی از بهترین گریس های استفاده شده در فرایند ECAP به دلیل داشتن ویژگی های خاص از قبیل کار در دمای بالای ۲۵۰ درجه سانتی گراد می باشد این ماده روانکار برای

استفاده در دمای معمولی توصیه می‌شود و حاوی دی سولفید مولیبدن و گرافیت است. شکل ۲-۵ این ماده روانکار را نشان داده است.



شکل ۲-۵- ماده روانکار فرایند ECAP.

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 ابتدای شروع فرایند از ۱ تن بر میلیمتر مربع به ۱۲ تن بر میلیمتر مربع می‌رسید و متغیر بودن این میزان نیرو هم وابسته سرعت پیشروی در نظر گرفته شده برای اعمال بار قالب بود. شکل ۲-۶ نمونه هایی از قطعات ECAP شده را نمایش داده است.



شکل ۲-۶- نمونه قطعات ECAP شده در پاس های متفاوت

فرایند ECAP را می توان هم به صورت سرد و هم به صورت گرم به کمک قرار دادن تعدادی المنت گرمایی داخل حفره هایی از قالب که از قبل طراحی شده انجام داد. این المنت ها با افزایش دمای قالب و قطعه کار کمک می کند که با نیروی پرس کمتری فرایند ECAP را انجام داد. در این آزمایش بدون نیاز به گرم کردن قالب و قطعه کار و به صورت سرد عملیات ECAP تا ۵ پاس انجام شده است.

۲-۳- آماده سازی نمونه های آزمایش

به منظور انجام برخی آزمایش ها از قبیل آزمون سختی سنجی و تست کشش 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 و تست کشش بر روی نمونه ها انجام شده است که در ادامه به نحوه آماده سازی این نمونه ها جهت انجام آزمایش ها پرداخته شده است.

۲-۳-۱ آماده سازی نمونه های سختی سنجی

به منظور انجام بعضی از آزمون ها از جمله سختی سنجی، نمونه ها باید دارای سطوحی صاف و صیقلی بوده و ثابت نگه داشته شوند. یکی از راه های ثابت نگه داشتن نمونه ها مانت کردن آنها است. این کار از طریق ثابت کردن نمونه در مادهای پلیمری انجام می شود. عملیات مانت را می توان به دو صورت سرد

و گرم انجام داد. مانت سرد در مواردی که ماده ی 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 ظرف های جداگانه و روی گرمکن به مدت ۲۰ دقیقه و در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد 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 نمونه ها شود. سپس مخلوط را در قالب هایی که از قبل با گریس چرب شده و نمونه‌ها درون آنها قرار داده شده، می‌ریزیم. بسته به حرارت مخلوط و مدت هم زدن، بین ۱ تا ۱۰ ساعت طول می‌کشد تا رزین کاملاً سفت شود. سپس نمونه ها از قالب مانت خارج شده و آماده ی استفاده در آزمون های بعدی می‌شود.

یکی دیگر از روش های آماده سازی نمونه‌ها جهت سختی سنجی قرار دادن نمونه‌های برش خورده به صورت پرسی در داخل مقطعی از پروفیل تفلون برش خورده می‌باشد. به کمک این روش هم می‌توان نمونه را ثابت نگه داشت و هم اینکه قابلیت پولیش کاری نمونه را افزایش داد.

پس از مانت کردن، نمونه‌ها با کمک دستگاه پولیش مطابق شکل ۲-۷ سنباده زنی و پولیش می‌شوند. سنباده زنی از کاغذهای سمباده به ترتیب با شماره‌های ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰ یعنی از دانه درشت به دانه ریز استفاده می‌شود.

پس از سمباده زنی نمونه‌ها پولیش می‌شوند. در مرحله ی اول، پولیش با خمیر ۳-۴ میکرون و در مرحله بعدی با خمیر ۰.۵ - ۱ میکرون انجام می‌شود تا سطح نمونه ها کاملاً صیقلی و آینه ای شود. و پس از این مراحل نمونه، آماده ی آزمون های بعدی می‌شود. شکل ۲-۸ نمونه های مانت و پولیش شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۷- دستگاه پولیش.



شکل ۲-۷- نمونه های آماده سازی شده سختی سنجی.

۲-۳-۲ آماده سازی نمونه تست کشش

جهت بررسی خواص کشسانی نمونه های آزمایش ECAP نیاز به ساخت نمونه های برای انجام آزمون کشش است و بر اساس استانداردهای موجود نمونه تست کشش باید دارای ابعاد و اندازه های مشخصی باشد. برای آماده سازی نمونه های کشش نیاز به تراشکاری قطعات می باشد و با کم کردن قطر از طول مشخصی از قطعات آنها را آماده می کنیم که تست روی آنها انجام شود. یکی از مسائلی که معمولاً در قطعاتی که عملیات ECAP روی آنها انجام شده است این است که این قطعات دارای تاب و لنگی می باشند و به همین دلیل امکان ماشینکاری را ندارند یکی از راه هایی که می تواند به اندازه قابل توجهی این مشکل را برطرف سازد استفاده از پرس های هیدرولیکی دستی می باشد که

با قرار دادن قطعات بر زیر فک آنها و اعمال بار تدریجی در جهتی که لنگی ایجاد شده است می توان میزان خارج از محوری این قطعات را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. همان طور که در شکل ۲-۹ نشان داده شده است به کمک نیروی پرس و اعمال بار تدریجی این نقص به میزان قابل ملاحظه‌ای برطرف شده است.



شکل ۲-۹- اعمال نیرو به کمک پرس هیدرولیکی.

پس از آماده شدن نمونه اقدام به عملیات ماشینکاری به کمک دستگاه تراش می شود. این قطعات با توجه به این که به کمک اعمال نیروی پرس تاب گیری شده اند ولی مقدار قابل ملاحظه ای از خارج از مرکزیت آنها باقی مانده است و معمولاً با یک و یا دو پاس روتراشی به طور کامل دور شده و قابلیت تراشکاری دقیق را پیدا می کنند. 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 می شود و شروع به رو تراشی و ایجاد پله مورد نظر طبق استاندارد در آزمون کشش انجام شده است.

نمونه های فلزی مورد استفاده در آزمون استاندارد کشش طوری شکل دهی می شوند 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 نمی شوند و نتیجه آزمایش های این نمونه های کوچک ممکن است واقعا بیانگر خواص توده ماده نباشد. برای رسیدن به نتایجی که کاملا 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 می شود. گیره های نمونه آزمایش انواع متفاوت دارند؛ ساده ترین آن ها گیره گوه ای شکل است.

نمونه های آماده شده در این آزمایش در تصویر ۲-۱۰ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱۰- نمونه قطعات آماده شده تست کشش.

۲-۴- اندازه گیری سختی

برای اندازه گیری سختی نمونه ها، از دستگاه میکرو سختی سنج ویکرز متعلق به شرکت bails آلمان استفاده شده است. این دستگاه شامل اسکوپ نوری و یک فروروندهی ویکرز می باشد که به یک رایانه متصل بوده و خروجی را نمایش می دهد. فرورونده ویکرز، به شکل یک هرم با قاعدهی مربعی و با زاویه ی رأس 136° است. این فرورونده بسته به نیاز از 0.01 kg تا 1 kg به جسم نیرو وارد کرده و در آن

نفوذ می‌کند. فرورونده به مدت ۱۰ ثانیه نیرو به جسم وارد کرده و سپس به حالت اولیه بازمی‌گردد. با وارد شدن بار، اثری به شکل لوزی روی جسم باقی می‌ماند که با مشخص کردن قطرهای این لوزی، نرم افزار به صورت خودکار سختی را اندازه گیری می‌کند. شکل ۲-۱۱ این دستگاه را نمایش داده است.



شکل ۲-۱۱- دستگاه اندازه گیری سختی.

۲-۵- تست کشش

تست کشش^{۲۶} یکی از مهمترین آزمون‌های مواد فلزی است. ماشین‌های تست کشش در انواع مختلف عرضه می‌شوند. بعضی از آنها تنها برای انجام تست کشش طراحی شده‌اند، در حالی که بعضی دیگر از نوع یونیورسال هستند و برای تست کشش و فشار تک محوری و هم چنین خمش سه نقطه ای مناسب هستند. بعضی از این ماشین‌ها، کوچک و رومیزی هستند که نیروی حداکثر آنها بین N ۵۰۰ 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.

²⁶ Tensile test

علی رغم اندازه و نوع کاربرد ماشین، یعنی ماشین‌های کوچک یا بزرگ و ماشین‌های مورد استفاده برای آزمون کشش، فشار یا خمش، لازم است تعدادی ویژگی مشخص در ماشین وجود داشته باشد. این ویژگی‌ها 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 اندازه‌گیری دقیق نیروی وارد شده

علاوه بر این، در بعضی از ماشین‌های آزمایش، سیستم‌هایی برای اندازه‌گیری و ثبت دقیق تغییرات ابعاد نمونه آزمایش گنجانده شده‌اند، ولی عموماً این گونه اندازه‌گیری‌ها با استفاده از دستگاه‌های مجزا مانند ازدیاد طول سنج و پیچش سنج، که به نمونه آزمایش وصل می‌شوند، صورت می‌گیرد.

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 مهره‌ای چرخان حرکت می‌کند. در سیستم‌های هیدرولیکی نیرو توسط یک پیستون هیدرولیکی که درون سیلندری مملو از روغن حرکت می‌کند، اعمال می‌شود.

در بسیاری از موارد ثابت نگه‌داشتن آهنگ کرنش اهمیت دارد. بیشتر ماشین‌ها مجهز به وسایلی برای کار در چند آهنگ کرنش معین هستند، ولی بعضی از آن‌ها می‌توانند آهنگ کرنش را به طور پیوسته بین دو حد بالا و پایین تغییر دهند. نتایج آزمایش‌های نمونه‌های فلزی تابع آهنگ کرنش آزمایش نیست ولی مواد پلیمری معمولاً به آهنگ کرنش حساسند. برای این مواد آهنگ‌های کرنش در استانداردهای مربوطه تعیین شده‌اند. در شکل ۲-۱۲ دستگاه کشش مورد استفاده شده در این آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۲- دستگاه اندازه گیری کشش.

۲-۶- متالوگرافی و کاربرد آن

متالوگرافی، شاخه‌ای از علم متالورژی است که شامل آماده سازی و مطالعه سطح یک نمونه فلزی می‌باشد. در این بررسی و مطالعه، که با استفاده از ابزاری بنام میکروسکوپ صورت می‌گیرد، اطلاعاتی راجع به ساختار درونی قطعات فلزی بدست می‌آید.

بطور آلی، مطالعات ساختاری فلزات و آلیاژها، در زیر میکروسکوپ در دو مقیاس به شرح زیر انجام می‌گردد:

(۱) بررسی و مطالعه ماکروسکوپی^{۲۷}

(۲) بررسی و مطالعه میکروسکوپی^{۲۸}

²⁷ Macroscopic Examination

²⁸ Microscopic Examination

۲-۶-۱ مطالعات ماکروسکوپی ساختار فلزات و آلیاژها

در این نوع بررسی، ساختار فلزات در زیر میکروسکوپ و با بزرگنمایی کم (تا حدود ۱۰ برابر) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این امر موجب می‌شود تا بر روی سطح وسیعی از نمونه مورد آزمایش یک مطالعه اجمالی انجام شود و اغلب نیز اطلاعات اولیه‌ای راجع به کیفیت قطعه، یعنی یکپارچگی فلز و ساختار آن، انجماد و کیفیت عملیات نهایی (ریخته‌گری، کار مکانیکی، جوشکاری و ...) بدست آید. بدلیل پایین بودن بزرگنمایی، بررسی‌های ماکروسکوپی در تحقیقات فلزات، بیشتر در مراحل ابتدایی و اولیه بکار گرفته می‌شوند و مطالعات دقیق‌تر و نهایی، دیگر در این مقیاس قابل بررسی نمی‌باشند. مطالعه ساختارهای ماکروسکوپی، می‌تواند هم بطور مستقیم بر روی سطح فلز (به عنوان مثال بر روی سطح قطعات ریخته‌گری یا قطعات آهنگری شده) صورت گیرد و هم بر روی مقاطع شکست و نیز بعد از انجام عملیات سطحی ویژه بر روی سطح قطعه انجام می‌شود. در زیر بطور خلاصه، به موارد کاربرد متالوگرافی در بررسی‌های ماکروسکوپی ساختار فلزات و آلیاژها اشاره می‌گردد:

بررسی مقاطع شکست قطعات به منظور تعیین علل شکست و نیز نوع شکست از نقطه نظر اینکه، این شکست از نوع ترد^{۲۹} و یا از نوع نرم^{۳۰} می‌باشد.

لازم به ذکر است که مقطع شکست ترد، بصورت صیقلی و روشن دیده می‌شود، در حالیکه مقطع شکست نرم، بدلیل وجود ناهمواری (پستی و بلندی) تیره دیده می‌شود. شکست نرم با تغییر فرم پلاستیک همراه است.

تعیین حفره‌های انقباضی، حفره‌های گازی، شکافها و محفظه‌های تشکیل شده در فلز ریخته شده (شمش‌ها یا قطعات ریخته‌گری) که در اثر شرایط نامناسب ذوب و ریخته‌گری و انجماد حاصل می‌شوند.

ترکهای تشکیل شده در فلز نورد یا آهنگری شده، در حین کار مکانیکی یا عملیات حرارتی محفظه‌ها و مکهای گازی که ضمن جوشکاری در محل جوش بوجود می‌آیند.

²⁹ Brittle Fracture

³⁰ Ductile Fracture

۲-۶-۲ وسایل و تجهیزات مورد استفاده در متالوگرافی

مشاهده ساختار میکروسکوپی مواد اغلب با دو وسیله میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی صورت می‌گیرد. 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 می‌گیرد.

در حالی که در تحقیقات عالی که نیاز به بزرگنمایی‌های بسیار بالا می‌باشد از میکروسکوپ الکترونی استفاده می‌شود. میکروسکوپ الکترونی امروزه از مدرنترین دستگاه‌های 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 می‌گیرد.

میکروسکوپ نوری دستگاه آشنایی است که با طرحهای 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 می‌شوند.

در متالوگرافی و شناخت ساختار میکروسکوپی مواد و فلزات چون بیشتر مواد کدر هستند لذا نور از آنها عبور نمی‌کند، در نتیجه در متالوگرافی بیشتر از میکروسکوپ انعکاسی استفاده می‌شود.

اولین مرحله آماده کردن نمونه برای مشاهده زیر میکروسکوپ، ساییدن و پرداخت کردن آن تا مرحله آینه ای است، در این وضعیت تمام قسمتهای سطح نمونه، نور را به داخل عدسی منعکس می‌کنند، در نتیجه هیچگونه ساختار میکروسکوپی مشاهده نمی‌شود.

با عمل اچ کردن (حک کردن) مرز بین دانه ها مرئی می‌شوند. معمولا برای انجام این کار ، سطح پرداخت شده را در معرض تاثیر نوعی ماده شیمیایی قرار می‌دهند . تاثیر ماده شیمیایی روی نمونه، با خوردن مرز بین دانه ها شروع می‌شود . مرز بین دانه‌ها در اثر خورده شدن بصورت شیارهایی ظاهر می‌شود . نورهای منعکس شده از شیارها تغییر مسیر داده و به عدسی چشمی نمی‌رسد، در نتیجه مرز بین دانه به صورت خطوط تیره ظاهر می‌شوند. 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 دانه‌ها سریعتر از سطح دانه‌های

دیگر خورده می‌شوند. آن دانه‌هایی که طوری جهت گیری شده اند که نور منعکس شده از آنها به داخل میکروسکوپ بر نمی‌گردد، تیره دیده می‌شود.

۲-۶-۳ میکروسکوپ الکترونی

میکروسکوپ الکترونی امروزه اغلب در مراکز تحقیقاتی معتبر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

زمینه های تحقیق بیشتر عبارتند از: زمین شناسی، متالورژی، تکنولوژی نیمه هادیها، کنترل کیفی بررسی ساختاری فلزات، شکست نگاری، خوردگی و اکسیداسیون، متالورژی پودری، لاستیکها و پلاستیکها، انجماد، شکل دادن فلزات و

بزرگنمایی میکروسکوپ الکترونی بسیار بالاست و تا ۳۰۰۰۰۰ برابر می‌رسد و قدرت تفکیک آن نیز بسیار عالی است و قادر است تا حدود ۱۰ آنگستروم را تشخیص دهد. امروزه همراه با میکروسکوپ الکترونی، دستگاه آنالیز اشعه X نیز وجود دارد که می‌تواند 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 KV50) از یک فیلمان حرارت دیده شتاب داده می‌شوند این الکترونها از میان عدسی‌های مغناطیسی عبور کرده و بصورت متمرکز شده بر روی سطح نمونه (آلیاژ) تابیده می‌شود و موجب می‌شود که الکترونهايي از سطح نمونه خارج گردند، این الکترونها توسط یک کلکتور جمع آوری شده و توسط آمپلی فایر تقویت شده و بر روی صفحه تلویزیونی رویت می‌گردد و اطلاعات دقیقی از سطح نمونه بدست می‌دهد که می‌توان آنرا مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. شکل ۲-۱۳ دستگاه میکروسکوپ الکترونی مورد استفاده را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۱۳- دستگاه میکروسکوپ الکترونی مورد استفاده

۲-۷- 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 گردد. به همین دلیل، سطح نمونه بایستی تحت عملیات سطحی خاصی، آماده گردد. 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 گردد. مراحل آماده سازی یک مقطع جهت بررسی و مطالعه میکروسکوپی به چهار قسمت نمونه برداری، قالبگیری، سنباده زنی نمونه و ظاهر سازی ساختمان ماده به ترتیب زیر می‌باشد:

۲-۷-۱ نمونه برداری^{۳۱}

انتخاب نمونه‌های 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

³¹Specimen Selection

آن، لازمست تا نمونه برداری در هر دو جهت صورت گیرد. قطعات و نمونه‌های کوچک، پس از انجام عملیات سطحی مناسب بر روی آنها، مستقیماً جهت مطالعه، زیرمیکروسکوپ قرار می‌گیرند. در صورتیکه اندازه و وزن یک قطعه زیاد باشد و یا اینکه قطعه دارای شکل پیچیده‌ای بوده و فاقد یک قسمت مسطح باشد، در اینصورت، لازمست که نمونه‌ای کوچک از قطعه بریده شده و تحت عملیات سطحی قرارگیرد.

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 می‌توان از طریق بریدن بوسیله اره و یا سایر ابزار برنده انجام داد. در موادی که دارای سختی با لایه هستند، عمل برش، با استفاده از دیسکهای کربوران‌دوم، الماس و غیره انجام می‌شود. نکته قابل توجه آن است که باید در حین برش از گرم شدن بیش از حد قطعه اجتناب گردد، زیرا این امر می‌تواند به تغییر ساختار فلز منتهی گردد.

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

۲-۷-۲ قالبگیری (سوار کردن) نمونه‌ها^{۳۲}

نمونه‌هایی را که دارای ابعاد بسیار کوچکی هستند و یا اینکه، شکل نامناسبی دارند، نمی‌توان به آسانی در دست گرفته و عملیات آماده سازی را بر روی آنها انجام داد. به همین منظور، این نمونه‌ها را

³² Mounting

با مواد پلاستیکی مصنوعی قالبگیری می کنند. مواد قالبگیری از نقطه نظر انجماد، در دو نوع گرما سخت و سرما سخت، وجود

دارند. مقطع بریده شده در این تحقیق را پس از برشکاری در مقطعی از پروفیل گرد تفلون با سایز بزرگتر که به آسانی قابلیت در دست قرار گرفتن را دارد قرار داده شده است.

۲-۷-۳ سنباده زنی نمونه ها^{۳۳}

سنباده زنی (سنباده کاری) یکی از مراحل مهم در آماده سازی نمونه ها می باشد. زیرا ناهمواری های ناشی از مرحله نمونه برداری، بایستی در این مرحله بر طرف گردد. لازم به ذکر است که سوختگی ناشی از بریدن به سختی از بین می رود. در حین عمل سنباده کاری، خراشهایی بوجود می آید که بایستی در مراحل بعدی و با استفاده از مواد ساینده ریزتر کاهش داده شوند. نکته قابل توجه آن است که در انتهای مرحله سنباده کاری، تنها خراشهای ناشی از آخرین مرحله سنباده کاری (سنباده کاری با ریزترین مواد ساینده) بایستی بر روی سطح وجود داشته باشد و خراشهای ناشی از سنباده های دارای مواد ساینده درشت تر، در صورتی که در طی مراحل سنباده کاری قبلی از بین نرفته باشند، دیگر با عملیات بعدی (صیقلی کردن) از بین نخواهند رفت.

بطور کلی سطحی که قرار است آماده شود، بوسیله ساینده های درجه بندی شده برحسب اندازه ذرات مواد ساینده، به ترتیب از ذرات درشت به ذرات ریز، تحت سایش قرار می گیرد. معمولاً عمل سایش از ۶۰ مش آغاز شده و سپس تا موادی با اندازه ۱۸۰-۶۰۰ مش و حتی بیشتر ادامه پیدا می کند. سنباده های مورد استفاده در تحقیق از نظر اندازه ذرات مواد ساینده به ترتیب زیر می باشد:

مش: ۶۰۰-۸۰۰-۱۰۰۰-۱۵۰۰-۲۰۰۰-۳۰۰۰

انتخاب اولین مواد ساینده به میزان زبری سطح و عمق خراش و ناهمواری های ناشی از مرحله نمونه برداری بستگی دارد.

برای سطوحی که با اره نواری بریده می شوند مش ۶۰-۲۴۰ مش انتخاب می شود. اولین سنباده معمولاً بین سطوحی که عمل برش آنها به همراه سایش انجام می گیرد هموارتر بوده و خراش کمتری دارند. در این

³³ Grinding

سطوح عمل سمباده کاری با سمباده های ۱۲۰ آغاز می شود .

به منظور کاهش دادن عیوب ناشی از حرارت و نیز افزایش عمر و دوام کاغذ سمباده بایستی عملیات سمباده کاری به روش تر (مرطوب) انجام گیرد. رطوبت از گیر افتادن ذرات فلز در میان ذرات مواد ساینده و در نتیجه کاهش راندمان سایش جلوگیری کرده ، عمل بریدن را توسعه می بخشد. همچنین در سمباده کاری مرطوب، نمونه خنک می شود و بدین ترتیب حرارت حاصل از اصطکاک که ممکن است باعث تغییر ساختار میکروسکوپی حقیقی شود، کاهش پیدا می کند.

آب معمولی ترین خنک کننده و روان ساز، برای تمام مواد، به استثنای موادی که با آب واکنش می دهند، می باشد. جهت سمباده زدن، نسبت به نمونه نبایستی در طول عملیات سمباده کاری ثابت نگه داشته شود. برای دستیابی به بهترین نتایج، این جهت بایستی در بین مراحل کار ۴۵ تا ۹۰ درجه تغییر نماید. در مواردیکه از سمباده کاری دستی استفاده می شود آزمایش کننده، بایستی سطح را به دقت بازرسی کند تا مطمئن گردد خراشهای مربوط به مرحله قبلی، کاملاً از بین رفته باشند.

۲-۷-۴ ظاهر سازی ساختمان - اچ کردن^{۳۴}

نمونه های فلزی صیقلی شده، معمولاً هیچگونه مشخصات ساختاری را نشان نمی دهند . هدف از اچ کردن سطح فلز، مرئی ساختن ساختار بلورین فلز و تشخیص سازنده های مختلف می باشد . برای اچ کردن، نمونه تمیز و صیقلی شده را در محلول اچ کننده مناسب فرو می برند. محلول های اچ کننده، از حل کردن اسیدهای آلی و غیر آلی، قلیائی ها یا سایر 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 ۱-۲ محلول اچ مناسب جهت آلیاژ مس کروم زیرکونیم مورد استفاده شده در این تحقیق را نمایش داده است.

³⁴ Etching

جدول ۱-۲- محلول اچ آلیاژ مورد تحقیق

ردیف	اچ کننده	ترکیب	ملاحظات
۱	سولفوریک اسید نیتریک اسید	50% H_2SO_4 50% HNO_3	زمان ۱۰ تا ۳۰ ثانیه
۲	محلول HF	0.5 ml NOH_3 40 ml Watter 10 ml HF	زمان ۱۰ ثانیه

جهت دستیابی به نتایج بهتر از اچانت، لازم است که از دو محلول معرفی شده به ترتیب و بدون وقفه زمانی استفاده شود.

معمولا برای اچ کردن نمونه، آن را با انبری نگه داشته و از طرف سطح صیقلی شده درون ظرف کوچکی که قسمتی از آن از 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 فرایند ممکن است تکرار شود. هرگاه نمونه زیاد اچ شده باشد، بایستی آنرا صیقلی نموده مجددا اچ نمود. 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. یکی از هدفهای اچ کردن شیمیایی، بر طرف ساختن فلز تغییر شکل یافته ای است که ممکن است در خلال صیقلی کردن، توسعه یافته باشد. بطور کلی اجزا ساختاری، در اثر اچ شدن ترجیحی ظاهر می گردند، 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 می‌کند و درجات متغیری از نور منعکس شده با سایه حاصل از دانه‌های مختلف، ایجاد می‌کند.

فصل سوم: نتایج و بحث

فصل ۳ نتایج و بحث

در این فصل با نمایش دادن نتایج آزمایش‌های لازم بر روی نمونه‌های آماده سازی شده و مقایسه تجربی این داده‌ها تلاش می‌کنیم که با بحث به روی داده‌ها به یک نتیجه ایده آل رسیده باشیم.

۳-۱- نتایج بدست آمده از ECAP

در این آزمایش نمونه خام از آلیاژ مس، کروم، زیرکونیوم با نام اختصاری CuCr1Zr و کد استاندارد C18150 است. در این آلیاژ مقدار عنصر زیرکونیوم (Zr) در حدود ۰.۰۸٪، مقدار عنصر کروم (Cr) در حدود ۰.۶۵٪ و مابقی را عنصر مس (Cu) تشکیل می‌دهد. به طول ۱۲۰ میلیمتر و قطر ۱۲ میلیمتر را توسط نیروی پرس هیدرولیکی از داخل دوزه قالب ECAP که داری زاویه انتحایی ۹۰ درجه می‌باشد عبور می‌دهیم. توسط این اعمال بار فلز مورد نظر به صورت صفحه‌ای برش خورده و در جهت پرس ادامه مسیر می‌دهد. این اعمال نیرو نه تنها باعث شکست مرز دانه‌های فلز شده بلکه بر روی اندازه دانه‌های آن هم تاثیر می‌گذارد و باعث ریز دانه تر شدن ماده مورد آزمایش می‌گردد. این ریز دانه شدن در نمونه اولیه ایجاد شده و با تکرار عملیات ECAP بر روی نمونه‌ای که یک بار بر روی آن عملیات صورت گرفته است می‌توان دانه بندی ماده اولیه را تا حد قابل ملاحظه‌ای و حتی در حد نانومتر کاهش داد. شکل ۳-۱ نحوه شکست صفحات و روند تغییر شکل در فرایند مورد نظر را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۱- نمایش مسیر ECAP.

این روند با اعمال نیروی بیشتر ادامه می‌یابد به صورتی که تمام قطعه خام اولیه پس از شکست مرزدانه‌ها در جهت افقی ایجاد صفحه کرده و قطعه ECAP شده در پاس اول که در شکل ۳-۲ نمایش داده شده بدست می‌آید.



شکل ۳-۲- نمونه قطعه پاس اول ECAP.

در صورتی که قطعه‌ای که در پاس اول ECAP بدست آمده، میزان خصوصیات مورد نظر تحقیق را نداشته باشد می‌توان با تکرار پروسه ECAP به این ویژگی‌ها دست پیدا کرد. قطعه‌ای را که در پاس اول بدست آمده را می‌توان با مقدار کمی آماده سازی به صورت دوباره داخل قالب گذاشت و تنها مسئله‌ای که باید به آن توجه کرد جهت بار گذاری در پاس‌های دوم به بعد است .

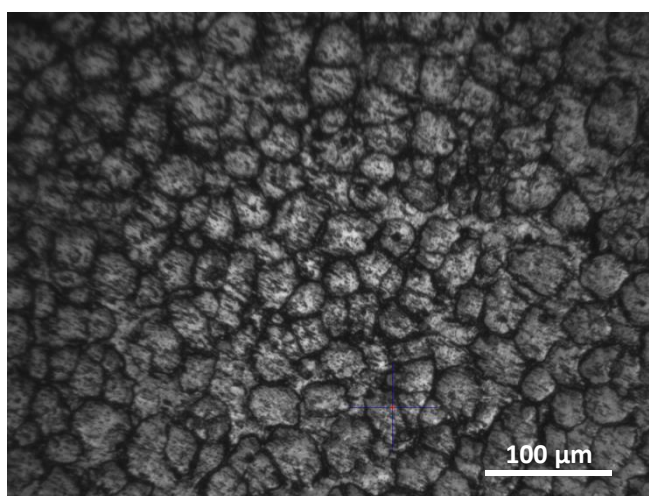
با توجه به سطح مقطع نمونه تحت ECAP، می‌توان مسیرهای مختلفی برای این فرآیند انتخاب نمود. این مسیرها می‌تواند شامل چرخاندن نمونه برای پاس بعدی به میزان ۱۸۰ درجه حول محور اصلی نمونه و یا ۹۰ درجه (در صورت وجود تقارن) و همچنین شامل سر و ته کردن نمونه باشد. برخی از این مسیرها تنها برای نمونه‌های با مقطع چند ضلعی قابل اعمال است. هر کدام از این مسیرها، میدان‌های تنش‌های متفاوتی در نمونه‌ها ایجاد می‌کند. هر یک از این مسیرها اثرات متفاوتی بر روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد و آلیاژ می‌گذارد. در این تحقیق از مسیر (A) برای ادامه فرایند استفاده شده است. به نحوی که قطعه پس از پایان مرحله ECAP اولی بدون هیچ گونه چرخش و سر و ته کردنی داخل ماتریس قالب جهت پاس دوم ECAP قرار داده می‌شود. شکل ۳-۳ نشان می‌دهد که ۵ مرحله ECAP به روی ماده مورد نظر در این تحقیق انجام شده است .



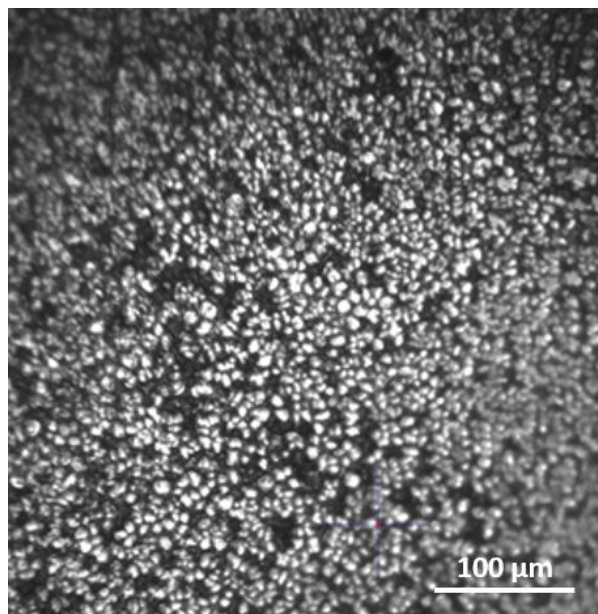
شکل ۳-۳- نمونه قطعه ECAP شده در آزمایش.

۳-۱-۱ متالوگرافی ماده

یکی از بهترین روش ها برای نمایش دانه بندی ها در آلیاژهای مس دریافت تصویر متالوگرافی به کمک میکروسکوپ های نوری می باشد. این نوع میکروسکوپ ها با بزرگنمایی تصویر سطح مقطع نمونه می توانند نحوه آرایش دانه ها در مواد فلزی را نمایش بدهند. میکروسکوپ های نوری دارای قدرت بزرگنمایی خوبی می باشند. برای انجام این آزمایش از میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی های ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰ برابر استفاده شده است. شکل ۳-۴ تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۲۰ برابر بر روی نمونه خام ماده اولیه را نشان داده است.

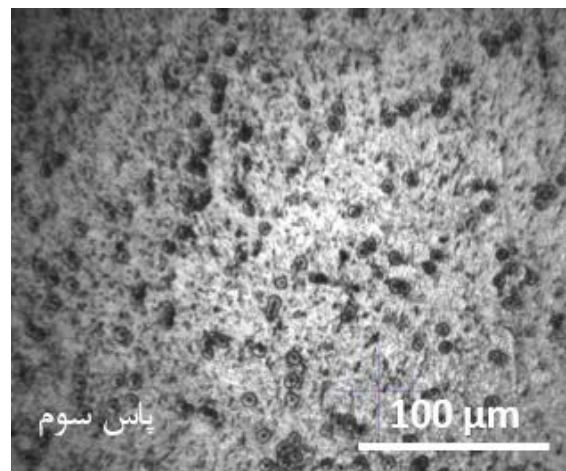
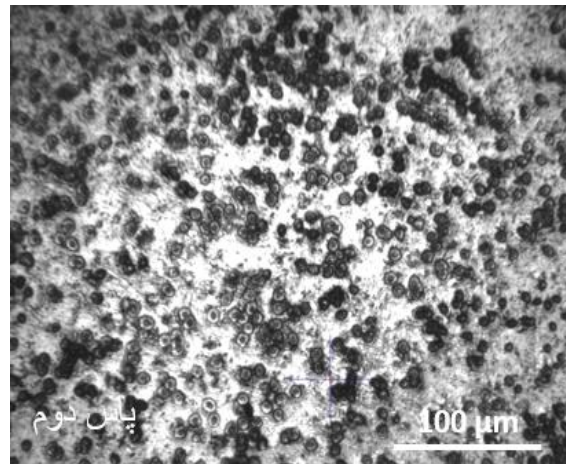


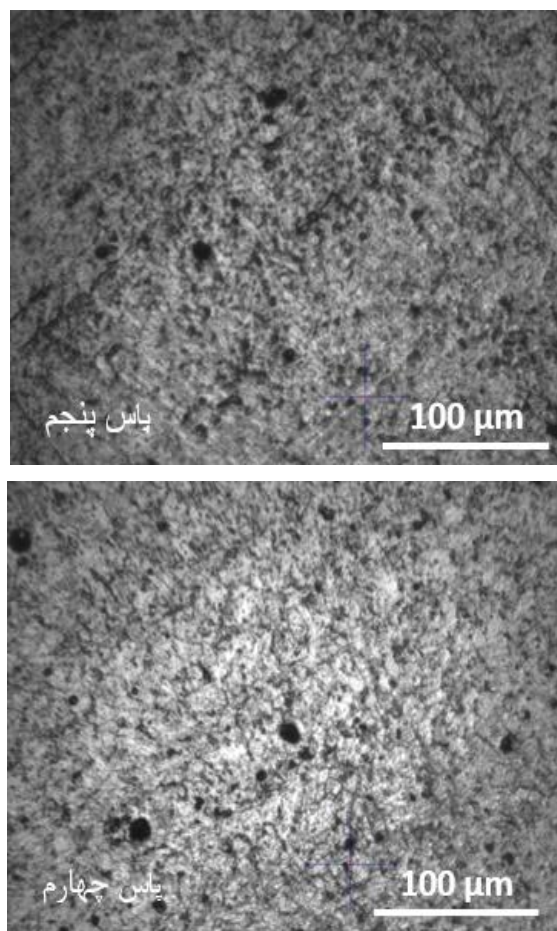
شکل ۳-۴- تصویر متالوگرافی نمونه ماده خام اولیه با بزرگنمایی ۲۰ برابر.



شکل ۳-۵- تصویر متالوگرافی نمونه پاس اول ECAP.

همان‌طور که در بخش خواسته‌های آزمایش مطرح شده بود، انجام آزمایش ECAP تاثیر بسیاری بر ریز دانه کردن ماده مورد تحقیق دارد. با مقایسه تصاویر ۳-۴ و ۳-۵ می‌توان به این نتیجه رسید که عملیات ECAP با شکستن مرز دانه‌ها و تبدیل دانه‌ها به دانه‌های کوچکتر به بالا بردن استحکام در مواد کمک می‌کند. یکی دیگر از مساله‌هایی که در این تحقیق مورد بررسی است تاثیر تعداد پاس‌ها این فرایند بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی مواد می‌باشد که در شکل ۳-۶ تاثیر تعداد پاس‌های فرایند بر ماده مورد تحقیق نشان داده شده است. دریافت تصویر متالوگرافی با میکروسکوپ نوری و بزرگنمایی ۲۰ می‌باشد.





شکل ۳۳-۶- تصویر متالوگرافی میکروسکوپ نوری نمونه‌های ECAP.

۳-۱-۲ روش تعیین اندازه متوسط دانه

در تعیین اندازه متوسط دانه ها باید توجه داشت که نقاطی بایستی مورد بررسی قرار گیرند که نماینده کل سطح مقطع فلز و یا آلیاژ مورد نظر باشد.

چهار روش اساسی برای تخمین اندازه دانه ها توسط استاندارد ASTM توصیه شده است که عبارتند از :

الف (روش پلانیمتریک^{۳۵}

ب) روش تقاطع^{۳۶} (روش خطی)

ج) روش مقایسه ای (روش مقایسه با جدول استاندارد ASTM)

³⁵ Planimetric Method

³⁶ Heyn

د) روش رسم دایره^{۳۷} (روش سطحی سنجی)

در این تحقیق از روش سطحی سنجی سطح دایره برای بدست آوردن اندازه متوسط دانه استفاده شده است.

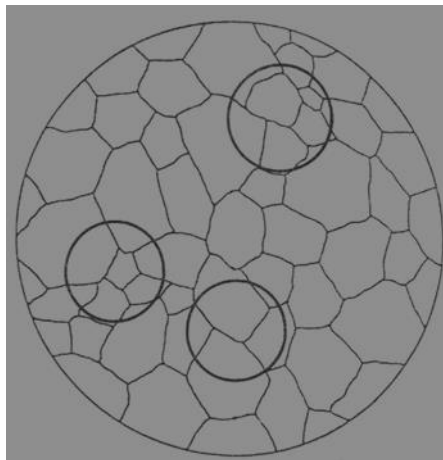
۳-۱-۳ اندازه متوسط دانه

بعد از تهیه عکس مورد نظر، بر روی عکس دوایری به شعاع دلخواه R رسم می شود (شکل ۳-۲). تعدادی از دانه ها در درون این دوایر قرار گرفته (Z) و تعدادی محیط دایره را قطع می کنند (N). حال اگر مساحت هر دایره را (F) و اندازه متوسط هر دانه را (Fm) در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$F_M = \frac{F \times 10^6}{(Z + 0.67 N) V^2} [\mu m] \quad V:$$

بزرگ نمایی

در این روش حداقل سه دایره رسم می شود و محاسبات برای هر کدام بطور جداگانه انجام گرفته و آنگاه میانگین اعداد بدست آمده را حساب کرده و به عنوان اندازه متوسط دانه در نظر می گیریم.



شکل ۳-۵- روش رسم دایره.

با کمک فرمول روش سطحی سنجی رسم دایره میزان متوسط اندازه دانه را در نمونه خام اولیه و در پاس اول از فرایند پرس در کانال های همسان زاویه دار را محاسبه شده است و این نتایج در جدول ۱-۳ نمایش داده شده است.

³⁷ Jeffries

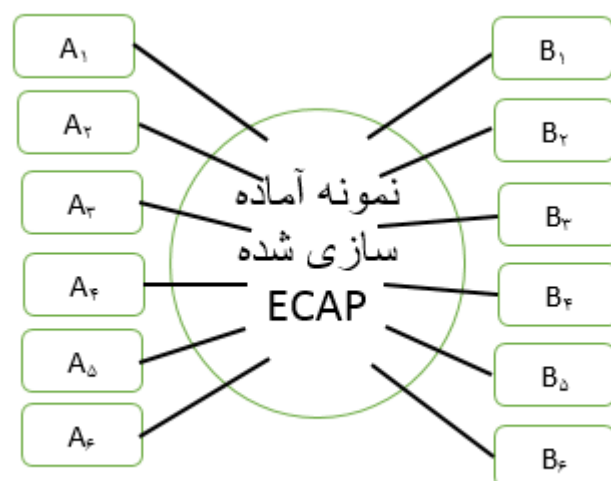
جدول ۳-۱- متوسط اندازه دانه

میانگین اندازه متوسط دانه	F_{M3} [μm]	F_{M2} [μm]	F_{M1} [μm]	
۵۳.۹۷۷	۶۰.۲۷۶	۵۴.۶۵۵	۴۷	نمونه خام اولیه
۹.۸۲۵	۸.۳۳۵	۱۰.۱۲۵	۱۱.۱۱۸	پاس اول ECAP

۳-۲- بررسی نتایج سختی سنجی

پس از اندازه‌گیری سختی نمونه‌های آماده سازی شده نتایج به شرح زیر نمایش داده می‌شود. انجام آزمایش سختی سنجی در این تحقیق با میزان HV 1kg در نظر گرفته شده است. جهت بالا بردن دقت در اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها و همچنین بررسی محل‌هایی که در جهت ECAP قرار گرفته‌اند از هر نمونه طی دو ردیف در سمت چپ (A) و راست (B) با فاصله‌های ۲ mm تعداد ۱۲ مرحله مطابق نمودار ۳-۷ این آزمایش انجام گرفت.

با توجه به انجام آزمون سختی سنجی به روی قطعه خام اولیه که عملیات ECAP بر روی آن انجام نگرفته است. اعداد سختی ۱۵۱، ۱۶۰ و ۱۵۶ بدست آمد که به صورت میانگین می‌توان عدد سختی برای نمونه اولیه را ۱۵۵.۶۶۶ بیان نمود در تصاویر و نمودارهای زیر به بحث بر روی میزان سختی سنجی نمونه پاس اول ECAP در این آزمایش پرداخته شده است.



شکل ۳-۷- نمودار نمایش محل های سختی سنجی در سطح نمونه

۳-۲-۱ سختی سنجی نمونه پاس اول ECAP

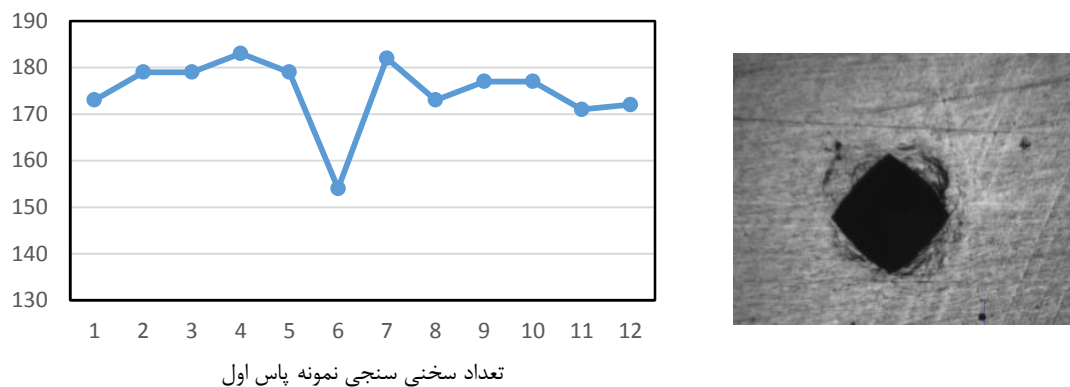
با توجه به اعداد سختی به دست آمده از نمونه شماره یک که در پاس اول از عملیات ECAP به دست آمده است. می توان با یک میانگین گیری ساده مقدار واقعی عدد سختی را برای این نمونه بدست آورد و به کمک نمودار های مقایسه ای به بحث بر روی نتایج این عملیات پرداخت. عدد سختی بدست آمده برای نمونه پاس اول HV1 ۱۷۵ می باشد. در شکل ۳-۷ اعداد بدست آمده از آزمون سختی سنجی بر روی نمونه پاس اول ECAP نمایش داده شده است.

No.	Hardness	Method	Converted	Lens/Zoom	X- coordinate	Y- coordinate	Date	Time
1	173	HV1	598 MPa	20x (1) 239.5x	0	0	19/12/2015	05:11:20
2	179	HV1	621 MPa	20x (1) 239.5x	2.01	0	19/12/2015	05:13:01
3	183	HV1	635 MPa	20x (1) 239.5x	2.01	0	19/12/2015	05:15:24
4	179	HV1	621 MPa	20x (1) 239.5x	0.005	0	19/12/2015	05:17:02
5	179	HV1	621 MPa	20x (1) 239.5x	0.005	0	19/12/2015	05:18:51
6	154	HV1	520 MPa	20x (1) 239.5x	2.006	0	19/12/2015	05:20:36
7	173	HV1	598 MPa	20x (1) 239.5x	2.006	0	19/12/2015	05:22:53
8	182	HV1	630 MPa	20x (1) 239.5x	0	0	19/12/2015	05:24:40
9	177	HV1	612 MPa	20x (1) 239.5x	0	0	19/12/2015	05:26:08
10	177	HV1	612 MPa	20x (1) 239.5x	2.001	0	19/12/2015	05:29:10
11	172	HV1	593 MPa	20x (1) 239.5x	2.001	0	19/12/2015	05:30:56
12	171	HV1	589 MPa	20x (1) 239.5x	0	0	19/12/2015	05:32:50

نمونه ۱	۱	۲	۳	۴	۵	۶
A	۱۷۷	۱۷۹	۱۷۹	۱۸۲	۱۷۷	۱۷۱
B	۱۷۹	۱۸۳	۱۵۴	۱۷۳	۱۷۷	۱۷۲

شکل ۳-۷- نتایج سختی سنجی طبق نمودار سختی برای پاس یک قطعه ECAP.

شکل ۳-۸ به نمایش اثر ایجاد فرورونده ویکرز بر روی نمونه پاس یک از آزمایش ECAP و نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف نمونه را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۸- اثر فرو رونده ویکرز روی نمونه و نمودار مقایسه سختی های گرفته شده از نمونه پاس یک ECAP.

۳-۲-۲ سختی سنجی نمونه پاس دوم ECAP

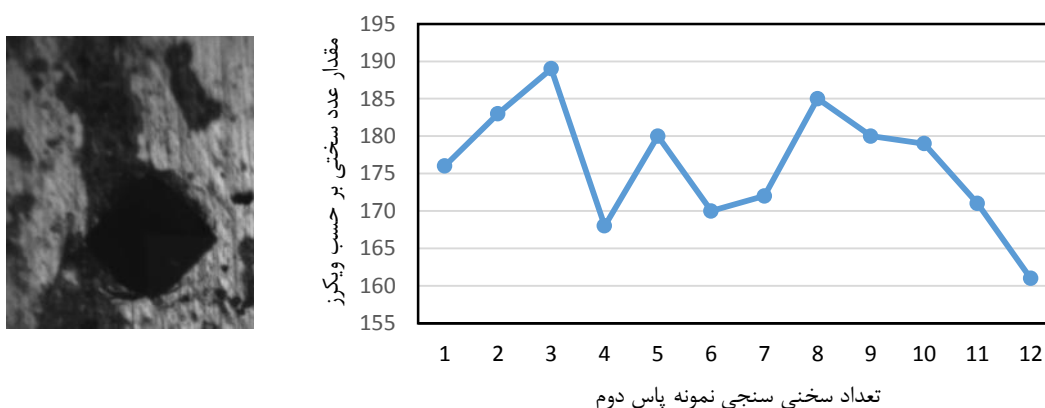
شکل ۳-۹ اعداد سختی به دست آمده از نمونه شماره دو که در پاس دوم از عملیات ECAP به دست آمده را نمایش می‌دهد. می‌توان با یک میانگین گیری ساده مقدار واقعی عدد سختی را برای این نمونه بدست آورد و به کمک نمودار این نتایج مقایسه شده است. عدد سختی بدست آمده برای نمونه پاس دوم HV1 ۱۷۶ می‌باشد.

No.	Hardness	Method	Converted	Lens/Zoom	X-coordinate	Y-coordinate	Date	Time
1	176	HV1	—	20x (1) 239.5x	0	0	19/12/2015	05:40.12
2	183	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.005	0	19/12/2015	05:42.41
3	168	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.005	0	19/12/2015	05:44.31
4	189	HV1	—	20x (1) 239.5x	0	0	19/12/2015	05:46.33
5	180	HV1	—	20x (1) 239.5x	0	0	19/12/2015	05:50.19
6	170	HV1	—	20x (1) 239.5x	2	0	19/12/2015	05:52.40
7	185	HV1	—	20x (1) 239.5x	2	0	19/12/2015	05:54.31
8	172	HV1	—	20x (1) 239.5x	0.002	0	19/12/2015	05:55.46
9	180	HV1	—	20x (1) 239.5x	0.002	0	19/12/2015	05:57.23
10	179	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.001	0	19/12/2015	05:58.47
11	161	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.001	0	19/12/2015	06:01.09
12	171	HV1	—	20x (1) 239.5x	0.129	0	19/12/2015	06:02.34

نمونه ۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶
A	۱۷۶	۱۸۹	۱۸۰	۱۷۲	۱۸۰	۱۷۱
B	۱۸۳	۱۶۸	۱۷۰	۱۸۵	۱۷۹	۱۶۱

شکل ۳-۹- نتایج سختی سنجی طبق نمودار سختی برای پاس دوم قطعه ECAP.

شکل ۳-۱۰ اثر ایجاد فرورونده ویکرز بر روی نمونه پاس یک از آزمایش ECAP و نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف نمونه نمایش داده شده است



شکل ۳-۱۰- اثر فرو رونده ویکرز روی نمونه و نمودار مقایسه سختی های گرفته شده از نمونه پاس دوم ECAP

۳-۲-۳ سختی سنجی نمونه پاس سوم ECAP

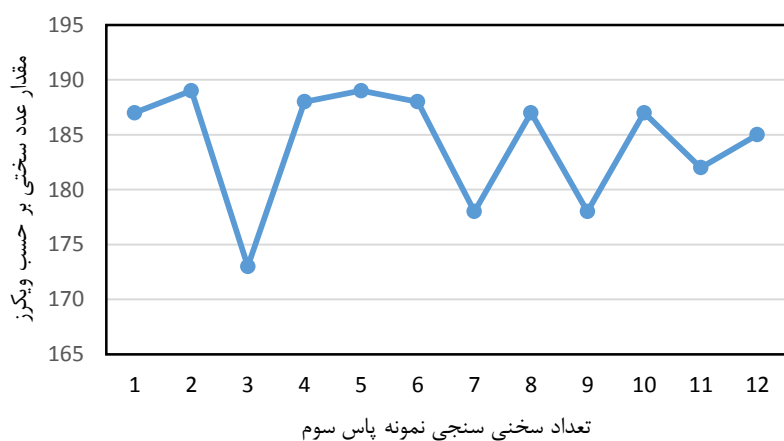
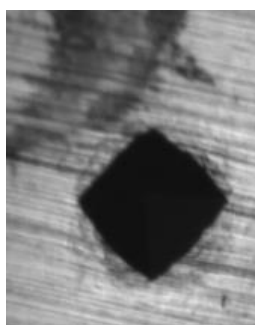
شکل ۳-۱۱ اعداد سختی به دست آمده از نمونه شماره سه که در پاس سوم از عملیات ECAP به دست آمده را نمایش می دهد. می توان با یک میانگین گیری ساده مقدار واقعی عدد سختی را برای این نمونه بدست آورد و به کمک نمودار این نتایج مقایسه شده است. عدد سختی بدست آمده برای نمونه پاس سوم HV1 ۱۸۵ می باشد.

No.	Hardness	Method	Converted	Lens/Zoom	X-coordinate	Y-coordinate	Date	Time
1	187	HV1	—	20x (1) 239.5x	0	0	19/12/2015	06:11.11
2	189	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.002	0	19/12/2015	06:12.33
3	188	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.002	0	19/12/2015	06:13.54
4	173	HV1	—	20x (1) 239.5x	0	0	19/12/2015	06:15.16
5	189	HV1	—	20x (1) 239.5x	0	0	19/12/2015	06:16.35
6	188	HV1	—	20x (1) 239.5x	2	0	19/12/2015	06:17.46
7	187	HV1	—	20x (1) 239.5x	2	0	19/12/2015	06:19.36
8	170	HV1	—	20x (1) 239.5x	0	0	19/12/2015	06:21.14
9	170	HV1	—	20x (1) 239.5x	0.993	0	19/12/2015	06:24.03
10	187	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.003	0	19/12/2015	06:25.32
11	185	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.003	0	19/12/2015	06:26.52
12	182	HV1	—	20x (1) 239.5x	0.001	0	19/12/2015	06:28.16

نمونه ۳	۱	۲	۳	۴	۵	۶
A	۱۸۷	۱۷۳	۱۸۹	۱۷۸	۱۷۸	۱۸۲
B	۱۸۹	۱۸۸	۱۸۸	۱۸۷	۱۸۷	۱۸۵

شکل ۳۳-۱۱- نتایج سختی سنجی طبق نمودار سختی برای پاس سوم قطعه ECAP شده در آزمایش

شکل ۳-۱۲ اثر ایجاد شده توسط فرورونده ویکرز بر روی نمونه پاس یک از آزمایش ECAP و نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف نمونه را نشان داده است .



شکل ۳-۱۲- اثر فرورونده ویکرز روی نمونه و نمودار مقایسه سختی های گرفته شده از نمونه پاس دوم ECAP

۳-۲-۴ سختی سنجی نمونه پاس چهارم ECAP

شکل ۳-۱۳ اعداد سختی به دست آمده از نمونه شماره چهار که در پاس چهارم از عملیات ECAP به دست آمده را نمایش می دهد. می توان با یک میانگین گیری ساده مقدار واقعی عدد سختی را برای

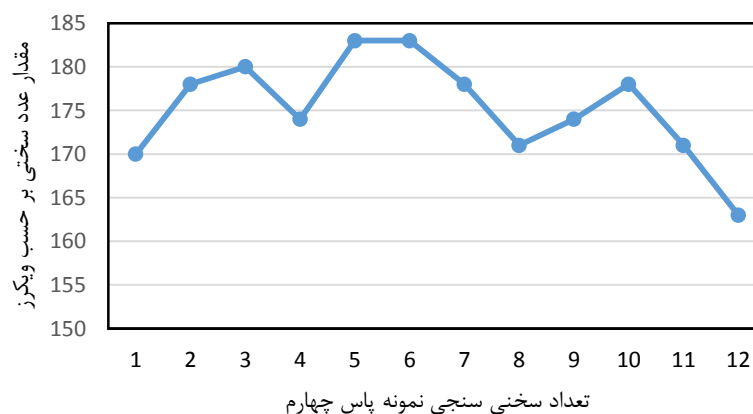
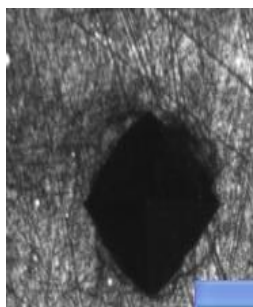
این نمونه بدست آورد و به کمک نمودار این نتایج مقایسه شده است. عدد سختی بدست آمده برای نمونه پاس چهارم HV1 ۱۷۵ می باشد.

No.	Hardness	Method	Converted	Lens/Zoom	X-coordinate	Y-coordinate	Date	Time
1	170	HV1	—	20x (1) 239.5x	0	0	19/12/2015	06:42:10
2	170	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.004	0	19/12/2015	06:43:52
3	174	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.004	0	19/12/2015	06:45:34
4	180	HV1	—	20x (1) 239.5x	0	0	19/12/2015	06:46:54
5	183	HV1	—	20x (1) 239.5x	0	0	19/12/2015	06:48:31
6	183	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.002	0	19/12/2015	06:50:03
7	171	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.002	0	19/12/2015	06:51:29
8	170	HV1	—	20x (1) 239.5x	0.001	0	19/12/2015	06:53:08
9	174	HV1	—	20x (1) 239.5x	0.001	0	19/12/2015	06:55:20
10	178	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.001	0	19/12/2015	06:57:58
11	163	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.001	0	19/12/2015	07:00:12
12	171	HV1	—	20x (1) 239.5x	0.006	0	19/12/2015	07:01:50

نمونه ۴	۱	۲	۳	۴	۵	۶
A	۱۷۰	۱۸۰	۱۸۳	۱۷۸	۱۷۴	۱۷۱
B	۱۷۸	۱۷۴	۱۸۳	۱۷۱	۱۷۸	۱۶۳

شکل ۳۳-۱۳- نتایج سختی سنجی طبق نمودار سختی برای پاس چهارم قطعه ECAP

شکل ۳-۱۴ اثر ایجاد شده توسط فرورونده ویکرز بر روی نمونه پاس چهارم از آزمایش ECAP و نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف نمونه را نمایش داده است.



شکل ۳-۱۴- اثر فرو رنده ویکرز روی نمونه و نمودار مقایسه سختی های گرفته شده از نمونه پاس چهارم ECAP

۳-۲-۵ سختی سنجی نمونه پاس پنجم ECAP

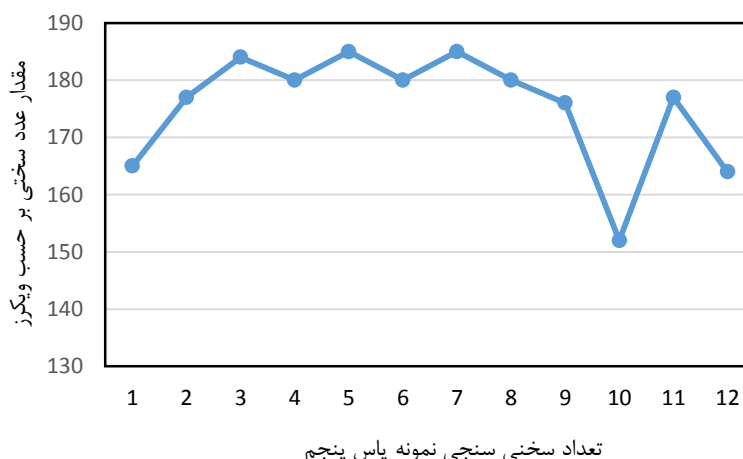
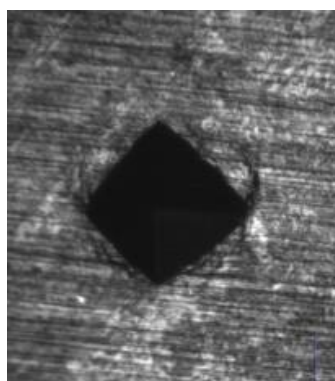
در شکل ۳-۱۵ اعداد سختی به دست آمده از نمونه شماره پنج که در پاس پنجم از عملیات ECAP به دست آمده می توان با یک میانگین گیری ساده مقدار واقعی عدد سختی را برای این نمونه بدست آورد و به کمک نمودار نتایج بدست آمده مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. عدد سختی بدست آمده برای نمونه پاس پنجم HV1 ۱۷۴ می باشد.

No.	Hardness	Method	Converted	Lens/Zoom	X-coordinate	Y-coordinate	Date	Time
1	165	HV1	—	20x (1) 239.5x	0	0	19/12/2015	07:06.25
2	177	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.009	0	19/12/2015	07:07.48
3	180	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.009	0	19/12/2015	07:09.01
4	184	HV1	—	20x (1) 239.5x	0.003	0	19/12/2015	07:10.24
5	185	HV1	—	20x (1) 239.5x	0.003	0	19/12/2015	07:11.41
6	180	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.009	0	19/12/2015	07:13.06
7	180	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.009	0	19/12/2015	07:14.31
8	185	HV1	—	20x (1) 239.5x	0	0	19/12/2015	07:15.49
9	176	HV1	—	20x (1) 239.5x	0	0	19/12/2015	07:16.59
10	142	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.003	0	19/12/2015	07:18.27
11	164	HV1	—	20x (1) 239.5x	2.003	0	19/12/2015	07:19.53
12	177	HV1	—	20x (1) 239.5x	0.004	0	19/12/2015	07:21.36

نمونه ۵	۱	۲	۳	۴	۵	۶
A	۱۶۵	۱۸۴	۱۸۵	۱۸۵	۱۷۶	۱۷۷
B	۱۷۷	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۴۲	۱۶۴

شکل ۳-۱۵- نتایج سختی سنجی طبق نمودار سختی برای پاس پنجم قطعه ECAP.

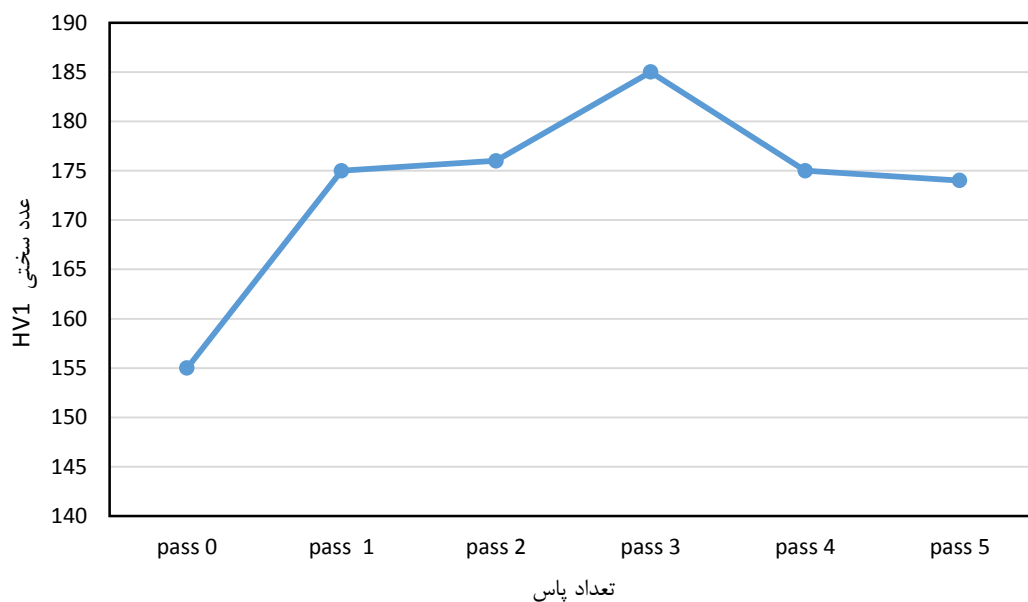
شکل ۳-۱۶ اثر ایجاد شده توسط فرورونده ویکرز بر روی نمونه پاس پنجم از آزمایش ECAP و نمودار تغییرات سختی در نقاط مختلف نمونه را نمایش داده است.



شکل ۳-۱۶- اثر فرو رونده ویکرز روی نمونه و نمودار مقایسه سختی های گرفته شده از نمونه پاس پنجم ECAP

۳-۳- تاثیر تعداد پاس های ECAP بر سختی ماده

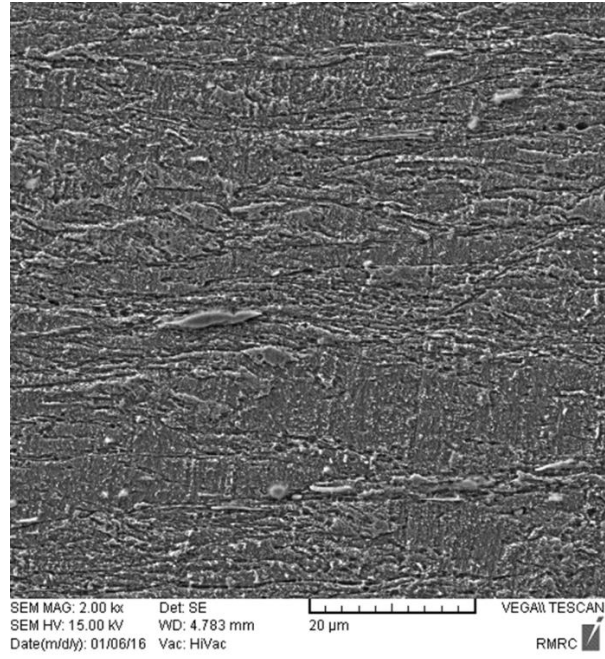
در این آزمایش توانستیم که تا ۵ مرحله ECAP بر روی قطعه خام اولیه انجام دهیم و نمودار روند تغییرات سختی به دست آماده از سختی سنجی ماده را در شکل ۳-۱۷ نمایش داده شده است.



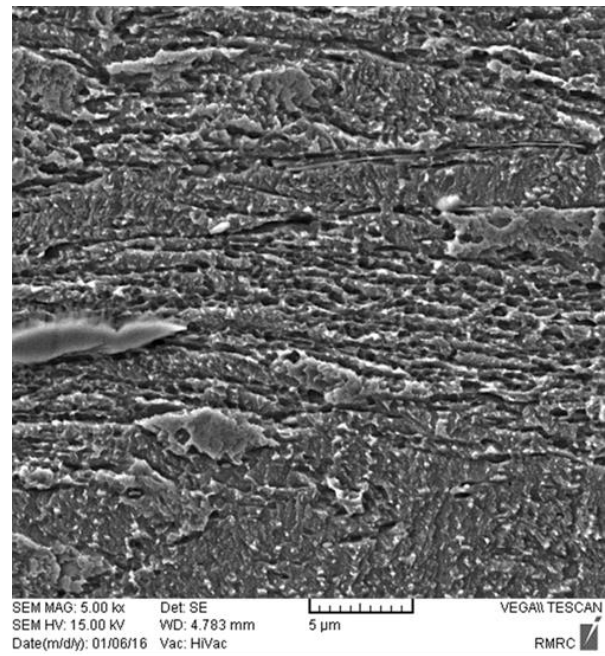
شکل ۳-۱۷- نمودار مقایسه ای اثر تعداد پاس های ECAP بر روی سختی

۳-۴- نتایج بدست آمده از تصویر SEM

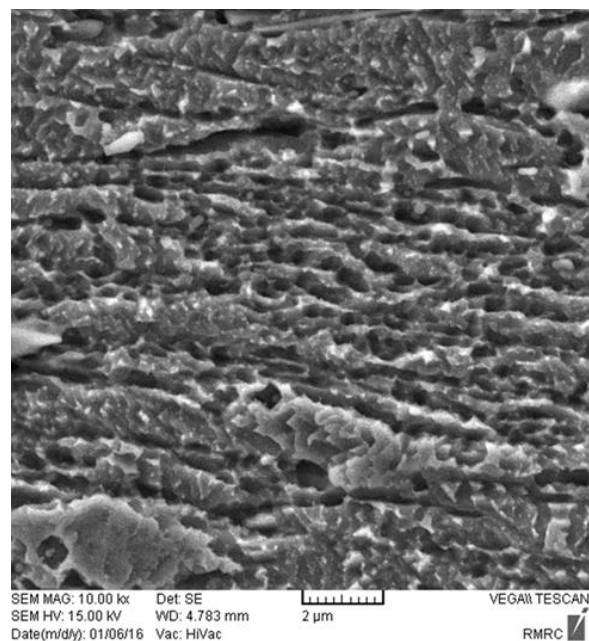
در این تحقیق جهت بررسی اندازه دانه های نمونه ECAP شده با همکاری مرکز پژوهش متالورژی رازی در بخش میکروسکوپ های الکترونی از دستگاه SEM ، TEESCAN به مدل TESCAN-LMU استفاده شده است. با توجه به این که در این تحقیق توانسته بودیم که ماده مورد تحقیق را تا ۵ پاس مورد فرایند ECAP قرار دهیم از نمونه پنجم که دارای اندازه دانه های ریز تری نسبت به مابقی نمونه ها است جهت دریافت تصویر SEM استفاده نموده ایم. شکل ۳-۱۸ نحوه آرایش دانه ها را در سطح مقطع نمونه شماره ۵ را با بزرگنمایی هایی به ترتیب ۲۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ برابر را نمایش داده است.



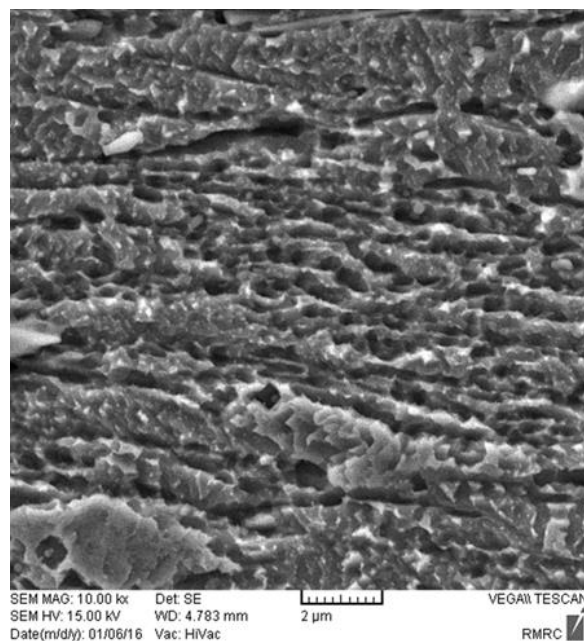
(الف)



(ب)



(ج)

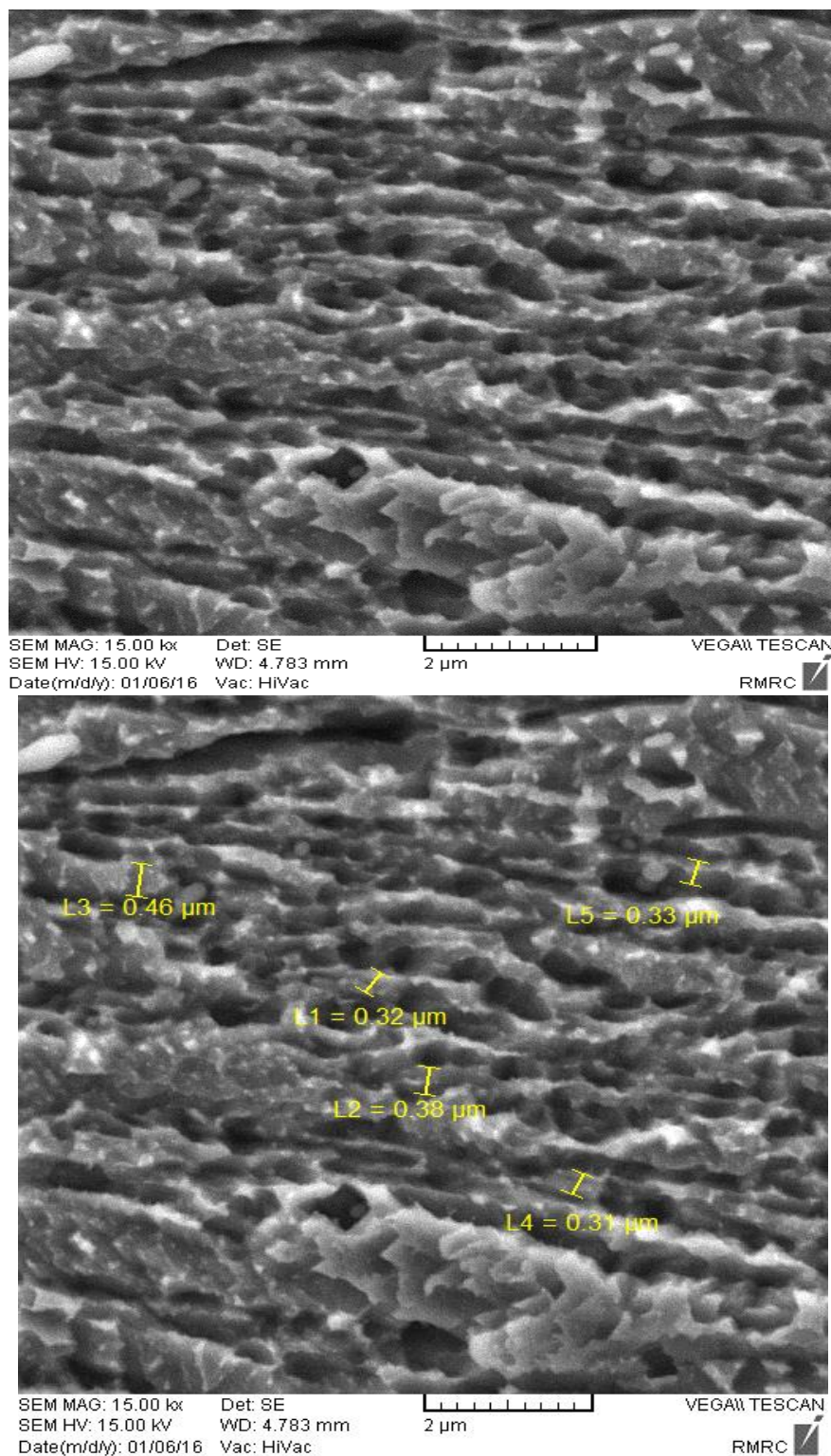


(د)

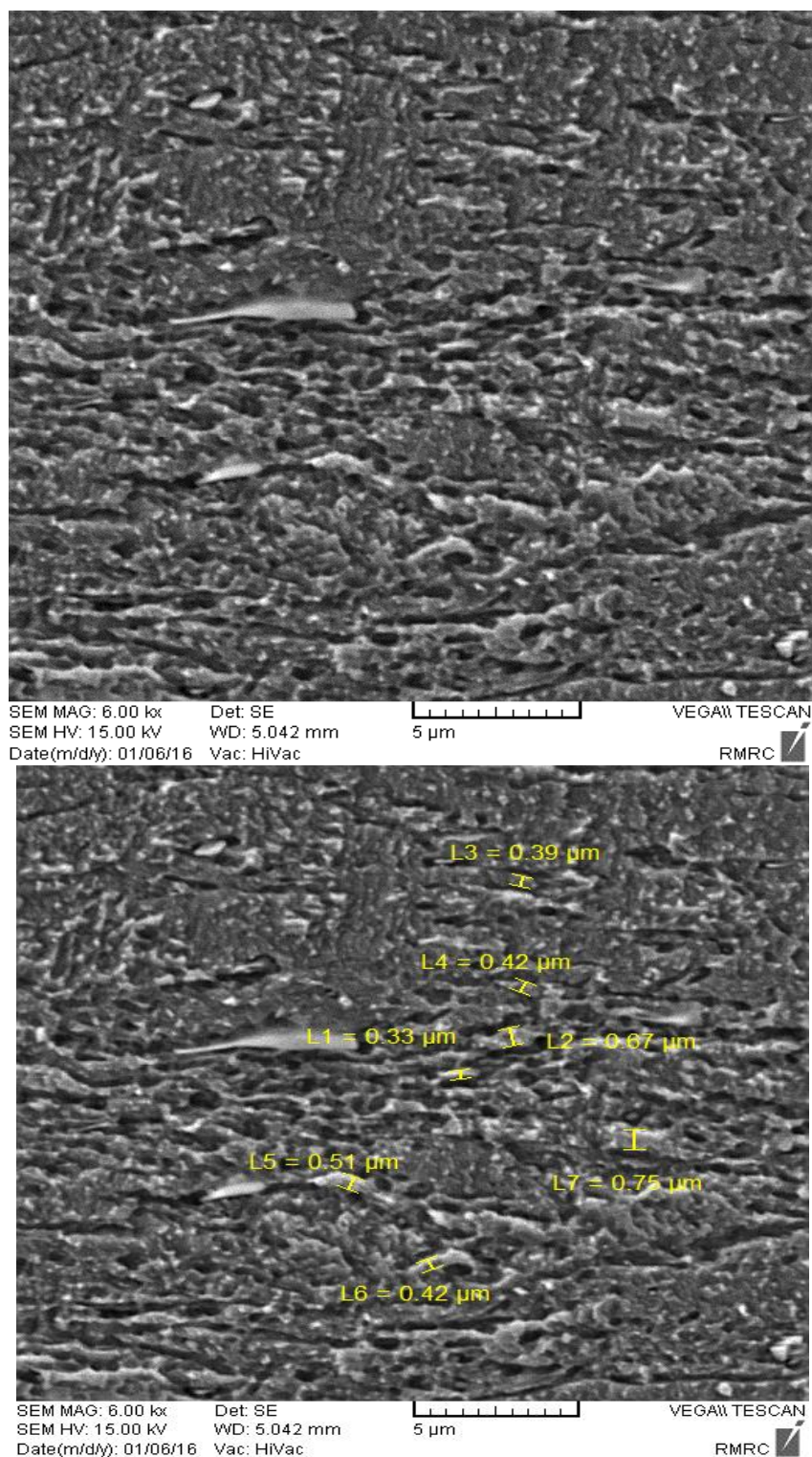
شکل ۳۳-۱۸- تصویر آرایش دانه ها در ECAP به کمک میکروسکوپ الکترونی SEM. الف) با بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر ب) با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر ج) با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر د) با بزرگنمایی ۱۵۰۰۰ برابر .

۳-۴-۱ اندازه گیری ریز دانه های نمونه

یکی از دلیل های اصلی دریافت تصویر SEM اندازه گیری اندازه دانه در آلیاژ مورد تحقیق می باشد. در شکل ۳-۱۹ مقدار اندازه دانه ها را در نمونه شماره ۵ ECAP شده را نمایش می دهد.



شکل ۳۳-۱۹- تصویر نمایش آرایش دانه ها بعد از ECAP پاس پنجم با بزرگنمایی ۱۵۰۰۰ برابر.



شکل ۳-۱۹- تصویر اندازه گذاری دانه ها بعد از پاس پنجم ECAP با بزرگنمایی ۶۰۰۰ برابر.

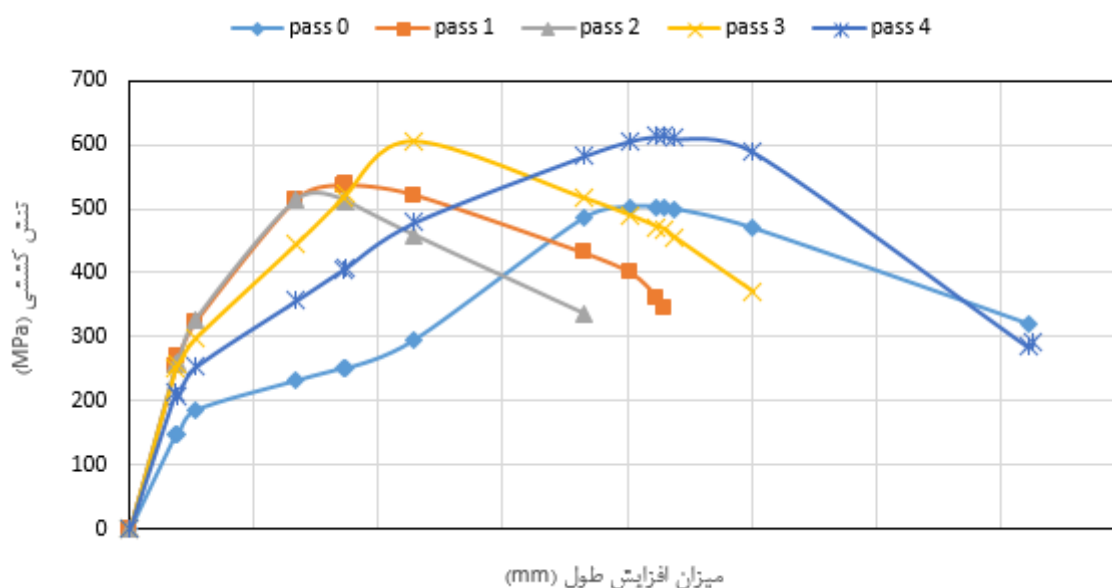
۳-۵- نتایج تست کشش

نتایج حاصل از تست کشش برای طراحان و مهندسان حائز اهمیت فراوان 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 مشخصا فولاد، نقطه تسلیم کاملا مشخص دارند، ولی در بیشتر فلزات تبدیل رفتار از حالت الاستیک به مومسان به آرامی صورت می‌گیرد. جدول ۳-۱ نتایج آزمون کشش نمونه‌های ECAP شده را نمایش می‌دهد.

جدول ۳-۲- نتایج بدست آماده در آزمون کشش نمونه های ECAP .

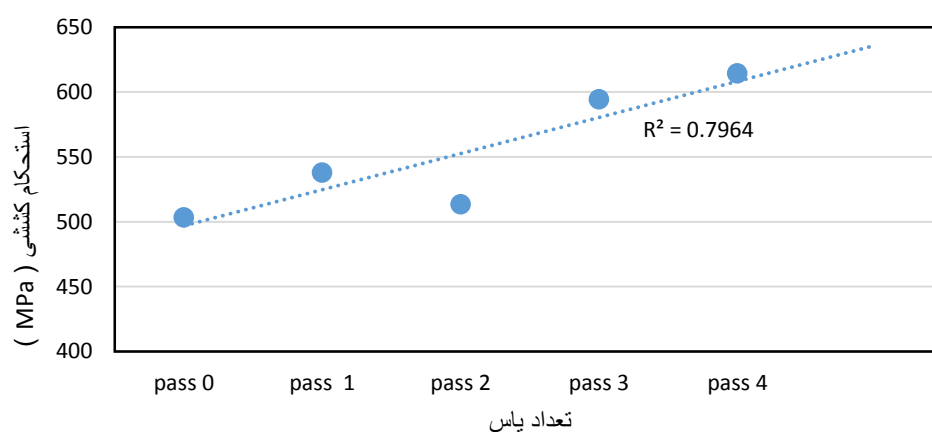
استحکام کششی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	
۵۰۳.۳۶۱	۲۵۱.۴۹۵	ماده خام اولیه
۵۳۷.۸۵۹	۲۶۸.۹۳۴	مرحله اول
۵۱۳.۳۷۶	۲۵۵.۹۳۶	مرحله دوم
۵۹۴.۴۰۰	۲۹۷.۶۴۷	مرحله سوم
۶۱۴.۳۴۷	۶۱۴.۰۲۱	مرحله چهارم

با توجه با نتایج بدست آماده از آزمون کشش بر روی نمونه‌های ECAP می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش مراحل ECAP می‌توان به میزان استحکام کششی بالاتری دست یافت و همچنین تنش تسلیم به میزان قابل ملاحظه ای با تکرار مراحل افزایش می‌یابد. شکل ۳-۲۰ نمودار تنش کرنشی را در پاس های مختلف نمایش داده است



شکل ۳-۲۰- نمودار تنش کرنش در پاس های مختلف فرایند ECAP.

با توجه به نتایج بدست آمده از انجام آزمون کشش بر روی نمونه های آماده سازی شده و محاسبه میزان استحکام کششی و تنش تسلیم برای هر یک از نمونه ها مشاهده شد که انجام عملیات ECAP در پاس چهارم از فرایند به بالاترین میزان استحکام کششی در آلیاژ مورد تحقیق خود رسیده است. و با توجه به این اندازه گیری ها نمودار روند تغییرات استحکام کششی ماده بر اثر پاس های مختلف شکل دهی را نمایش می دهد.



شکل ۳-۲۰- نمودار تنش کرنش در پاس های مختلف فرایند ECAP.

همانطور که در نمودار روند تغییرات آزمون کشش مشاهده می شود تا پاس دوم از این فرایند تغییرات قابل ملاحظه ای بر روی استحکام کششی ماده مورد تحقیق صورت نگرفته است و در همین حال در

پاس چهارم به میزان قابل ملاحظه ای از استحکام کششی همانگونه که انتظارات این تحقیق بوده، رسیده است. این تغییرات به صورت صعودی و نزولی در تحقیقات گذشته بر روی آلیاژهای مختلف هم وجود داشته است و هدف از این آزمایش ها و ترسیم نمودارهای روند تغییرات دستیابی به خواص مکانیکی آلیاژ طی پاس های مختلف از فرایند می باشد. تا به بهترین حالت برای تغییر شکل این آلیاژ بدست آید.

فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

فصل ۴ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در پایان انجام آزمایش های فوق و دستیابی به نتایجی که مورد تحقیق بود نیاز دانسته شد که به صورت مختصر به بررسی نتایج بدست آماده پرداخت. و همچنین با ارائه پیشنهاداتی به محقق هایی که نیاز می‌دانند به ادامه این تحقیق بپردازند می‌دهیم.

۴-۱- نتیجه گیری

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 نانوساختار 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 پی‌برد.

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 پس 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 اعمال نمود. 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 هوا فضا 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 آزمایش های تجربی بر روی آلیاژ مس، کروم و زیرکونیم جهت انجام عملیات عبور از کانال های همسان زاویه دار (ECAP) در دمای محیط به منظور ریزدانه کردن آلیاژ و افزایش استحکام آن پرداخته شده است. همچنین تاثیر پاس های فرایند بر استحکام تسلیم و نهایی و اندازه دانه نشان داده شد و معلوم شد که این فرایند قطعه پس از تعداد پاس های مشخصی به حد اشباع می رسد و پس از آن به شکست قطعه منجر خواهد شد که نتایج بدست آمده را به شرح ذیل ارائه می دهیم.

۱- فرآیند ECAP در ایجاد ساختار ریز دانه در آلیاژ بسیار موثر است. به گونه ای که میانگین اندازه دانه در حالت اکستروود شده به $0.4 \mu m$ در پاس پنجم رسیده است.

۲- 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.

۳- افزایش تعداد پاس ها موجب یکنواختی بیشتر ساختار می شود.

۴- نتایج آزمون سختی نشان می دهد میزان سختی از $155HV$ در نمونه ماده خام اولیه به HV 185 در پاس سوم افزایش یافته است. البته توزیع سختی در مقطع نمونه در پاس های اولیه به صورت غیر یکنواخت است. که علت آن را می توان توزیع غیر یکنواخت کرنش و ایجاد ساختار دوگانه در پاس های اولیه دانست.

۵- با توجه به نتایج بدست آمده از انجام آزمون کشش بر روی نمونه های آماده سازی شده و محاسبه میزان استحکام کششی و تنش تسلیم برای هر یک از نمونه ها مشاهده شد که انجام

عملیات ECAP در پاس چهارم از فرایند به بالاترین میزان استحکام کششی در آلیاژ مورد تحقیق دست یافته‌ایم.

۶- به کمک دریافت تصاویر متالوگرافی از سطح مقطع نمونه خام اولیه و نمونه پاس اول از فرایند، اندازه متوسط دانه به صورت قابل ملاحظه ای همانگونه که مورد نظر در این تحقیق بود، کاهش یافته است. به گونه ای که اندازه متوسط دانه که در ماده خام اولیه $53.977\mu\text{m}$ بود در پاس اول این فرایند به $9.825\mu\text{m}$ کاهش یافته است.

پس از قرار گیری آلیاژ مس تحت فرایند ECAP، با شکل گیری مرز دانه های متعدد در اثر شکسته شدن دانه‌ها بزرگ اولیه حرکت آزاد الکترون‌ها کاهش یافته و رسانایی الکتریکی ماده اندکی کاهش می‌یابد. (حداکثر در حدود ۸٪ نمونه اولیه). میزان کاهش هدایت الکتریکی مس تولید شده به روش ECAP در مقایسه با مس آلیاژی با استحکام معادل بسیار ناچیز می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که فرایند ECAP (خصوصا تا پاس سوم) یک روش موثر جهت تولید مس با استحکام و هدایت الکتریکی بالا می‌باشد.

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 و اشکال پیچیده تر یا قطعات دارای استحکام بیشتر که به صورت کاربردی در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند متمرکز شود.

و همچنین با توجه به این که فرایند 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 پایان‌نامه از فرایند ECAP با زاویه کانال ۹۰ درجه و مسیر بارگذاری A استفاده نموده ایم و تمام داده های آزمایش های تجربی بر اساس این نوع فرایند می‌باشد که توصیه می‌شود که در آینده بر روی انواع این نوع مسیرها مطالعات و آزمایشات تجربی صورت گیرد.

در بحث آزمایشگاهی، با توجه به محدودیت امکانات، اندازه گیری میزان رسانایی الکتریکی و رسانایی گرمایی آلیاژ اندازه گیری نشد که توصیه میشود در کارهای دیگر این خصوصیات مواد هم مورد توجه قرار بگیرد.

مطلب دیگری که نیاز به مطرح کردن هست دمای پرس کاری در فرایند ECAP می باشد. در این پایان نامه تمامی مراحل پرس کاری در دمای محیط صورت گرفت. در حالی که این فرایند را می توان با ایجاد تغییر دما در قالب و قطعه خام اولیه به کمک المنت های گرمایی که در بدنه قالب جا سازی شده و قابلیت افزایش دما را دارند. به نظر می رسد که با انجام این عمل فرایند پرس کاری به نیروی کمتری نیاز باشد که توصیه میشود که در تحقیقات آینده این نکته نیز در نظر گرفته شود.

منبع ها

1. Rosochowski, A. (2004, December). Processing metals by severe plastic deformation. In *Solid State Phenomena* (Vol. 101, pp. 13-22).
2. Shin, D. H., Park, J. J., Kim, Y. S., & Park, K. T. (2002). Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum. *materials Science and Engineering: A*, 328(1), 98-103.
3. Tóth, L. S., Arzaghi, M., Fundenberger, J. J., Beausir, B., Bouaziz, O., & Arruffat-Massion, R. (2009). Severe plastic deformation of metals by high-pressure tube twisting. *Scripta Materialia*, 60(3), 175-177.
4. Shin, D. H., Park, J. J., Kim, Y. S., & Park, K. T. (2002). Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum. *materials Science and Engineering: A*, 328(1), 98-103.
5. Lowe, T. C., & Valiev, R. Z. (2004). The use of severe plastic deformation techniques in grain refinement. *Jom*, 56(10), 64-68.
6. Rosochowski, A. (2004, December). Processing metals by severe plastic deformation. In *Solid State Phenomena* (Vol. 101, pp. 13-22).
7. Saito, Y., Tsuji, N., Utsunomiya, H., Sakai, T., & Hong, R. G. (1998). Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process. *Scripta materialia*, 39(9), 1221-1227.
8. Kazeminezhad, M., & Hosseini, E. (2010). Optimum groove pressing die design to achieve desirable severely plastic deformed sheets. *Materials & Design*, 31(1), 94-103.
9. Shin, D. H., Park, J. J., Kim, Y. S., & Park, K. T. (2002). Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum. *materials Science and Engineering: A*, 328(1), 98-103.
10. Mohebbi, M. S., & Akbarzadeh, A. (2010). Accumulative spin-bonding (ASB) as a novel SPD process for fabrication of nanostructured tubes. *Materials Science and Engineering: A*, 528(1), 180-188.
11. Faraji, G., Babaei, A., Mashhadi, M. M., & Abrinia, K. (2012). Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new severe plastic deformation method for cylindrical tubes. *Materials Letters*, 77, 82-85.
12. Zangiabadi, A., & 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), 5066-5072.
13. Valiev, R. Z., & Langdon, T. G. (2006). Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in Materials Science*, 51(7), 881-981.

14. Kim, H. S., Seo, M. H., & Hong, S. I. (2000). On the die corner gap formation in equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 291(1), 86-90.
15. Jayakumar, P. K., Balasubramanian, K., & 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, 7-13.
16. Vinogradov, A., Ishida, T., Kitagawa, K., & 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), 2181-2192.
17. WANG, Z. Q., ZHONG, Y. B., RAO, X. J., Chao, W. A. N. G., Jiang, W. A. N. G., ZHANG, Z. G., ... & REN, Z. M. (2012). Electrical and mechanical properties of Cu-Cr-Zr alloy aged under imposed direct continuous current. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(5), 1106-1111.
18. Vinogradov, A., Suzuki, Y., Ishida, T., Kitagawa, K., & Kopylov, V. I. (2004). Effect of chemical composition on structure and properties of ultrafine grained Cu-Cr-Zr alloys produced by equal-channel angular pressing. *Materials transactions*, 45(7), 2187-2191.

Abstract

In recent years, the production methods and mechanical properties of materials with very fine grain size nm subject of many researches in the field of materials science and related sciences it. One of the best ways to achieve mechanical properties of materials with nanometer grain size in metal matched channel angular pressing (ECAP) is. It acts in a manner that prevents the cracks and failures in process and raw sample size does not change after the process. In this thesis to study the same channel angular pressing process has been studied and to carry out experimental tests of copper, chromium, zirconium for rebar diameter and length mm 12 mm 120 for each sample was used. One of the significant features of the query process and discussed in angled mirrors allow channels to achieve a higher quality grade features with repeat doing this process on the sample tested. In this investigation, this process has 5 steps onto the desired alloy, and experimental tests carried out by the characteristics of the samples studied. The results showed that copper, zirconium, chrome, high functionality and an increase in the strength of granule by this process is.

With Metallography by light microscopy images of samples prepared by polishing and etching samples clearly visible The first pass significantly reduced particle size and larger particles composed of more seeds of failure In the first pass samples on the value of the grain size was reduced electron microscopy was used to observe particle size distribution The alloy in the second pass of ECAP process has reached the highest difficulty level HV1 185. If raw hardness HV1 155 before the process is. This alloy ECAP process a good impression on the tensile strength and tensile strength material has MPa 615.

Keywords: PRESS channels angled mirrors, copper-chromium-zirconium alloy, mechanical properties , the material is very fine-grained, hard.



Shahrood University of Industrial Technology

Faculty of Mechanical Engineering

Investigation of the effect of number of forming passes on the
microstructure and mechanical properties of zirconium alloy in equal
channel angular pressing

Reza Salmani

Supervisor:

Dr. Hadi Ghaderi

Advisor:

Dr. Mojtaba Ghatei

February 2016