

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید

مطالعه تجربی تغییر شکل مومسان شدید آلیاژ زیرکونیوم نیوبیوم با استفاده از
فرایند پرس کاری در کانال همسان زاویه دار

نگارنده

محمد مرادی افتاده

استاد راهنما

سید هادی قادری

بهمن ۱۳۹۵



فرم شماره ۷: صورت جلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمد مرادی افتاده به شماره دانشجویی ۹۲۱۲۹۶۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید تحت عنوان مطالعه تجربی تغییر شکل مومسان شدید زیرکونیوم خالص تجاری با استفاده از فرآیند پرس کاری در کانال‌های همسان زاویه‌دار که در تاریخ ۱۳۹۵/۱۱/۱۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: <u>خوب</u> امتیاز <u>۱۷/۸۷</u>)	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input type="checkbox"/> مردود
نوع تحقیق: نظری <input type="checkbox"/> عملی <input checked="" type="checkbox"/>		

- ۱- عالی (۲۰-۱۹)
- ۲- بسیار خوب (۱۸-۱۸/۹۹)
- ۳- خوب (۱۶-۱۷/۹۹)
- ۴- قابل قبول (۱۴-۱۵/۹۹)
- ۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	سید هادی قادری	استادیار	<u>قادری</u>
۲- استاد راهنمای دوم	-----	-----	-
۳- استاد مشاور	-----	-----	-
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	مهدی وحدتی	استادیار	<u>مهدی</u>
۵- استاد ممتحن اول	مهدی گردویی	استادیار	<u>۱۸/۱۱/۹۵</u>
۶- استاد ممتحن دوم	محسن کریمی	استادیار	<u>[Signature]</u>

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: محمد محسن شاه مردان



ش. مردان

تقدیم نامہ

تقدیم بہ روح پاک پدرم کہ عالمانہ بہ من آموخت تا چگونه در عرصہ زندگی، ایستادگی را تجربہ نمایم

و بہ مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق کہ وجودم برایش ہمہ رنج بود و وجودش برایم ہمہ مہر

سپاس‌گزاری

نمی‌توانم معنایی بالاتر از تقدیر و تشکر بر زبانم جاری سازم و سپاس خود را در وصف استادان خویش آشکار
نمایم، که هر چه گویم و سرایم، کم گفته‌ام. از زحمات و مساعدت‌های بی‌شائبه استاد راهنمای گرانقدر جناب
آقای دکتر سید هادی قادری تشکر و قدردانی می‌کنم، سلامت و توفیق روزافزودنشان را از خداوند متعال
خواستارم.

همچنین از اساتید محترم دانشکده مکانیک به ویژه آقایان دکتر مهدی کردویی، دکتر مجتبی قطعی و دکتر محمد باقر نظری
تشکر ویژه دارم.

در پایان از دوستان عزیزم آقایان مهندس کی پور، مقصود لوی، سعید نژاد و پولاد سنج صمیمانه سپاسگزارم.

تعهد نامه

اینجانب محمد مرادی افتاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان‌نامه ((مطالعه تجربی تغییر شکل مومسان شدید آلیاژ زیرکونیوم نیوبیوم با استفاده از فرایند پرس‌کاری در کانال‌های همسان زاویه‌دار)) تحت راهنمایی دکتر سید هادی قادری متعهد می‌شوم:

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

امروزه روش‌های تغییر شکل شدید مومسان توسعه بسیاری در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. به وسیله این روش‌ها می‌توان کرنش‌های زیادی به مواد اعمال کرد. یکی از این روش‌ها پرس کاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار (ECAP) است که به علت عدم تغییر در سطح مقطع نمونه می‌توان آن را بارها مورد پرس کاری قرار داد. هدف از انجام این فرایند دستیابی به ساختارهای فوق ریزدانه و افزایش استحکام و سختی از طریق افزایش چگالی نابجایی‌ها است. هدف از این پژوهش مطالعه تجربی تغییر شکل مومسان شدید آلیاژ زیرکونیوم نیوبیوم با استفاده از فرآیند ECAP است. برای این منظور ابتدا قالب ECAP طراحی و تحلیل شد. تحلیل تنش‌های اعمالی به اجزای قالب، به روش المان محدود و در نرم افزار Abaqus در دو گام انجام شد. در گام اول، تنش پسماند ایجاد شده در اثر انطباق پرسی هسته مرکزی در حلقه فشاری تحلیل و طراحی قالب به نحوی انجام شد که در اثر این تداخل تنش فشاری $\sigma_{\theta} = 800 \text{ MPa}$ روی سطح کانال عمودی ایجاد شود. در دومین گام، نمونه به سمت پایین حرکت کرده و شکل‌دهی آن درون قالب شبیه‌سازی و مشخص شد در حین شکل‌دهی، تنش حلقوی روی سطح کانال عمودی به $\sigma_{\theta} = 280 \text{ MPa}$ می‌رسد که این میزان تنش به مراتب پایین‌تر از استحکام شکست قالب است. میزان کرنش‌های اعمالی در هر مرحله، به زاویه بین دو کانال وابسته است، در طراحی قالب بایستی این زاویه کمترین مقدار ممکن را داشته باشد تا در هر مرحله بیشترین میزان کرنش به قطعه اعمال شود و قالب دچار شکست نشود. به همین دلیل زاویه بین دو کانال $\varphi = 90^{\circ}$ انتخاب شد. فرایند پرس کاری روی نمونه‌هایی از جنس آلیاژ زیرکونیوم نیوبیوم در دمای 200°C تحت مسیر BC که در آن نمونه‌ها پس از هر خروج 90° در امتداد محور طولی در یک جهت چرخانده می‌شوند و دوباره وارد قالب می‌شوند، طی هشت مرحله با موفقیت انجام شد. سپس میکرو سختی و خواص مکانیکی نمونه‌ها بررسی شد. نتایج حاصل از تحلیل سطح شکست با میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که با افزایش مراحل شکل‌دهی اندازه فرورفتگی‌های سطح کاهش یافته و باعث کاهش ازدیاد طول شده است. بررسی نتایج میکرو سختی و تنش تسلیم نمونه‌ها حاکی از افزایش ۵۰ درصدی این مقادیر پس از پنج مرحله عبور از قالب است.

واژگان کلیدی: پرس کاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار، تغییر شکل شدید مومسان، مواد فوق ریزدانه، طراحی قالب ECAP.

فهرست عنوان‌ها

فصل ۱ مقدمه	۱
روش‌های مختلف فرآوری مواد حجمی UFG	۲
مقایسه فرآیندهای ترمومکانیکی و SPD	۳
انواع روش‌های SPD	۴
۱-۱-۱ روش ECAP	۵
مسیرهای شکلدهی	۶
سیستم‌های لغزش برای مسیرهای گوناگون	۷
۱-۱-۱ فرایند ECAP برای ورق‌ها	۸
۱-۱-۲ قالب‌های چرخشی، قالب با چندین سنبه و قالب‌های چند مرحله‌ای	۹
۱-۱-۳ ECAP با کانال‌های موازی	۱۱
۱-۱-۴ استفاده از غلتک‌های راهنما	۱۲
۱-۱-۵ ECAP به عنوان فرایند تلفیقی	۱۳
۱-۱-۶ فرایند ECAP به عنوان تثبیت‌کننده	۱۴
۱-۱-۷ سهولت ساخت تجهیزات ECAP	۱۵
۱-۱-۸ متغیرهای اساسی ECAP	۱۵
۱-۱-۹ کرنش اعمالی در ECAP	۱۵
۱-۱-۱۰ تأثیر زاویه کانال بر فرایند	۱۹
۱-۱-۱۱ تأثیر زاویه محل تقاطع دو کانال	۱۹
۱-۱-۱۲ تأثیر سرعت پرس	۱۹
۱-۱-۱۳ تأثیر دمای فرایند	۲۰
۱-۱-۱۴ نقش گرم شدن داخلی در حین فرایند ECAP	۲۱
۲-۱ معرفی ماده‌ی مورد تحقیق و خواص آن	۲۲
۳-۱ پیشینه‌ی تحقیق	۲۳
۴-۱ اهداف پژوهشی و مروری بر فصل‌های پایان‌نامه	۲۴
فصل ۲ طراحی قالب ECAP، مواد و آزمایش‌های تجربی	۲۷
۱-۲ طراحی قالب	۲۷
۲-۲ ماده مورد استفاده در آزمون	۳۰
۳-۲ روش المان محدود و معرفی نرم‌افزار شبیه‌سازی	۳۱
۱-۳-۲ ایجاد مدل هندسی	۳۲
۲-۳-۲ تعیین خصوصیات ماده خام و اجزای قالب	۳۳

۳۳	..... ۳-۳-۲ تعیین تعداد گام و نوع حل مسئله
۳۳	..... ۴-۳-۲ شبکه بندی
۳۳	..... ۴-۲ قالب ECAP
۳۴	..... ۵-۲ اجرای ECAP
۳۶	..... ۱-۵-۲ آماده سازی نمونه‌های سختی سنجی
۳۷	..... ۲-۵-۲ آماده سازی نمونه‌های آزمون کشش
۳۸	..... ۶-۲ اندازه‌گیری سختی
۳۹	..... ۷-۲ آزمون کشش
۴۰	..... ۱-۷-۲ آماده سازی نمونه‌های متالوگرافی

فصل ۳ نتایج و بحث..... ۴۳

۴۳	..... ۱-۳ طراحی قالب
۴۳	..... ۱-۱-۳ تحلیل تنش‌های ایجاد شده در اثر انطباق پرسی
۴۵	..... ۲-۱-۳ ابعاد بهینه قالب
۴۷	..... ۲-۳ نتایج تجربی
۴۸	..... ۱-۲-۳ متالوگرافی ماده
۵۱	..... ۳-۳ نتایج سختی سنجی
۵۵	..... ۱-۳-۳ توزیع سختی در امتداد محور نمونه
۵۶	..... ۲-۳-۳ توزیع سختی نهایی نمونه‌ها
۵۷	..... ۴-۳ نتایج تست کشش
۵۸	..... ۵-۳ تنش تسلیم
۵۹	..... ۶-۳ نتایج شکست نگاری

فصل ۴ نتیجه‌گیری و پیشنهادها..... ۶۱

۶۱	..... ۱-۴ نتیجه‌گیری
۶۲	..... ۲-۴ پیشنهادها

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ فرایند پرس کاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار ۵
- شکل ۲-۱ اصول کلی روش ECAP و صفحه اعمال تغییر شکل برشی در داخل قالب ۶
- شکل ۳-۱ مسیرهای مختلف فرایند ECAP [۴] ۷
- شکل ۴-۱ سیستم‌های مختلف لغزش برای مسیرهای گوناگون [۴] ۸
- شکل ۵-۱ فرایند ECAP برای نمونه‌های مسطح (الف) حالت عمودی، (ب) حالت افقی [۵] ۸
- شکل ۶-۱ ECAP با قالب چرخشی (الف) موقعیت اولیه، (ب) پس از اولین مرحله و (ج) پس از 90° چرخش قالب [۶] ۹
- شکل ۷-۱ شماتیک روش قالب چند سنبه‌ای [۷] ۱۰
- شکل ۸-۱ قالب‌های چند مرحله‌ای [۸] ۱۰
- شکل ۹-۱ ECAP با کانال‌های موازی [۹] ۱۱
- شکل ۱۰-۱ استفاده از غلتک راهنما و ECA [۱۱] ۱۲
- شکل ۱۱-۱ شماتیک فرایند ECAP تلفیقی [۱۵] ۱۳
- شکل ۱۲-۱ فرایند ECAP به عنوان تثبیت‌کننده [۱۶] ۱۴
- شکل ۱۳-۱ قالب ECAP با دیواره‌های متحرک [۲۰] ۱۵
- شکل ۱۴-۱ زوایای مختلف انحنای بیرونی کانال (الف) $\psi = 0^\circ$ ، (ب) $\psi = (\pi - \varphi)^\circ$ و (ج) $0 < \psi < (\pi - \varphi)^\circ$ ۱۶
- شکل ۱۵-۱ تأثیر زوایای مختلف قالب بر کرنش [۲۲] ۱۸
- شکل ۱۶-۱ عدم تأثیر سرعت پرس بر تنش تسلیم برای آلیاژ آلومینیم و ۱٪ منیزیم [۲۷] ۲۰
- شکل ۱۷-۱ تأثیر دمای فرایند ECAP بر اندازه دانه‌ها [۲۸] ۲۱
- شکل ۱-۲ قالب متداول ECAP [۳۵] ۲۸
- شکل ۲-۲ منحنی تنش-کرنش مهندسی آلیاژ Zr-1%Nb ۳۰
- شکل ۳-۲ مدل ترسیم شده اجزای قالب ۳۲

- شکل ۲-۴ قالب، المان‌های حرارتی و مدار کنترل دمای فرایند. ۳۴
- شکل ۲-۵ پرس هیدرولیک ۱۵۰ تن زاو آریا. ۳۵
- شکل ۲-۶ گریس مورد استفاده در فرایند. ۳۶
- شکل ۲-۷ نمونه‌های مانت شده. ۳۷
- شکل ۲-۸ دستگاه پولیش متکو. ۳۷
- شکل ۲-۹ شماتیک تاب گیری نمونه‌ها. ۳۸
- شکل ۲-۱۰ نمونه آماده‌شده آزمون کشش. ۳۸
- شکل ۲-۱۱ دستگاه اندازه‌گیری میکرو سختی. ۳۹
- شکل ۲-۱۲ آزمون کشش با دستگاه اینسترون ۸۸۰۲. ۴۰
- شکل ۲-۱۳ میکروسکوپ FESEM. ۴۱
- شکل ۳-۱ تنش‌های اعمالی به قالب. ۴۵
- شکل ۳-۲ تنش‌های اعمالی به قالب در اثر الف) انطباق پرسی و ب) شکل‌دهی. ۴۵
- شکل ۳-۳ قالب، اندازه‌ها و اجزای تشکیل دهنده آن. ۴۶
- شکل ۳-۴ مقایسه هندسه تغییر شکل در شبیه‌سازی و آزمون تجربی. ۴۷
- شکل ۳-۵ نمونه ECAP شده. ۴۷
- شکل ۳-۶ نمونه‌های خروجی از قالب پس از الف) یک، ب) سه، ج) پنج، د) شش، ه) هفت و و) هشت مرحله ECAP. ۴۸
- شکل ۳-۷ تصویر متالوگرافی نمونه ماده خام اولیه با بزرگنمایی ۲۰ برابر. ۴۹
- شکل ۳-۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی ۳۰۰۰۰ برابر الف) یک و ب) چهار مرحله ECAP. ۵۰
- شکل ۳-۹ تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی ۵۰۰۰۰ برابر الف) یک و ب) چهار مرحله ECAP. ۵۰
- شکل ۳-۱۰ اثر فرورونده ویکرز و میزان میکرو سختی نقاط مختلف برای نمونه اولین مرحله ECAP. ۵۱
- شکل ۳-۱۱ اثر فرورونده ویکرز و میزان میکرو سختی نقاط مختلف برای نمونه دومین مرحله ECAP. ۵۲
- شکل ۳-۱۲ اثر فرورونده ویکرز و میزان میکرو سختی نقاط مختلف برای نمونه سومین مرحله ECAP. ۵۲

- شکل ۳-۱۳ اثر فرورونده ویکرز و میزان میکرو سختی نقاط مختلف برای نمونه چهارمین مرحله ECAP ۵۳
- شکل ۳-۱۴ اثر فرورونده ویکرز و میزان میکرو سختی نقاط مختلف برای نمونه با پنج مرحله ECAP ۵۳
- شکل ۳-۱۵ اثر فرورونده ویکرز و میزان میکرو سختی نقاط مختلف برای نمونه با شش مرحله ECAP ۵۴
- شکل ۳-۱۶ اثر فرورونده ویکرز و میزان میکرو سختی نقاط مختلف برای نمونه با هفت مرحله ECAP ۵۴
- شکل ۳-۱۷ اثر فرورونده ویکرز و میزان میکرو سختی نقاط مختلف برای نمونه با هشت مرحله ECAP ۵۵
- شکل ۳-۱۸ توزیع سختی روی نمونه با یک و دو مرحله ECAP ۵۶
- شکل ۳-۱۹ توزیع سختی همراه با میزان خطا برای نمونه‌ها ۵۷
- شکل ۳-۲۰ تنش- کرنش مهندسی نمونه به ازای مراحل مختلف ECAP ۵۸
- شکل ۳-۲۱ میزان تنش تسلیم برای نمونه اولیه و به ازای یک، سه و پنج مرحله ECAP ۵۸
- شکل ۳-۲۲ سطح شکست زیرکونیوم برای نمونه الف) اولیه، ب) یک، ج) سه و د) پنج مرحله ECAP
(بزرگنمایی ۶۰۰) ۵۹
- شکل ۳-۲۳ سطح شکست زیرکونیوم برای نمونه الف) اولیه، ب) یک، ج) سه و د) پنج مرحله ECAP
(بزرگنمایی ۴۰۰۰) ۶۰

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱ خواص زیرکونیوم ۲۲
- جدول ۱-۲ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی Zr-1%Nb ۳۰
- جدول ۲-۲ ترکیب شیمیایی آلیاژ Zr-1%Nb مورد استفاده در فرایند ECAP ۳۱
- جدول ۳-۲ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه و قالب ۳۳

فهرست نشانه‌ها

p	فشار داخلی	σ_y	تنش تسلیم
φ	زاویه بین کانال‌ها	σ_f	تنش اصطکاکی
ψ	زاویه انحنا	k_y	ثابت تسلیم
K	فاصله بین محور دو کانال	d	اندازه دانه
N	تعداد عبور	r	فاصله شعاعی
n	تعداد مراحل شکل‌دهی	a	شعاع داخلی استوانه داخلی
$\bar{\varepsilon}$	کرنش معادل	b	شعاع خارجی استوانه داخلی
γ	کرنش برشی	c	شعاع خارجی استوانه خارجی
T_m	دمای ذوب	e	مقدار تداخل
		E	مدول یانگ

فصل ۱ مقدمه

طی یک دهه گذشته، تولید مواد فلزی فوق ریزدانه^۱ به طور ویژه‌ای مورد توجه محققین دنیا قرار گرفته است. این مواد به عنوان نسل جدیدی از محصولات فلزی مطرح هستند که خواص فیزیکی و مکانیکی آنها در مقایسه با مواد درشت‌دانه به طور قابل ملاحظه‌ای بالا می‌باشد. همچنین در این مواد برخی خواص استثنایی نیز وجود دارد که در مواد درشت‌دانه دیده نمی‌شود. در عین حالی که استحکام در مواد فلزی UFG بسیار بالاتر از مواد درشت‌دانه است، قابلیت شکل‌پذیری آنها نیز در حد خوبی می‌باشد. همچنین فلزات UFG حتی در دماهای پایین‌تر و نرخ کرنش‌های بالاتر، خاصیت شکل‌پذیری فوق مومسان عالی از خود نشان می‌دهند.

برای توسعه فرایندهای تولید مواد فلزی UFG، تحقیقات زیادی در مقیاس آزمایشگاهی و حتی صنعتی صورت گرفته است. در این ارتباط با تحقیق ثابت شده است که یکی از موثرترین روش‌های تولید فلزات UFG، اعمال تغییر شکل مومسان شدید^۲ می‌باشد.

^۱ Ultra Fine Grained (UFG)

^۲ Severe Plastic Deformation (SPD)

روش‌های مختلف فرآوری مواد حجمی UFG

در حالت کلی در خصوص تولید مواد فلزی UFG دو رویکرد مهم وجود دارد:

۱- رویکرد اول تحت عنوان روش پایین به بالا^۱

۲- رویکرد دوم تحت عنوان روش بالا به پایین^۲

رویکرد اول شامل روش‌هایی برای تولید مواد نانو ساختار است که در آن روش‌ها از طریق به هم اتصال دادن اتم‌ها و مولکول‌ها این کار صورت می‌گیرد. روش‌هایی مانند رسوب دادن الکترولیتی، متراکم کردن پودرهای نانو ساختار، رسوب دادن از فاز بخار و آلیاژسازی مکانیکی جزو این روش‌ها هستند. البته نمونه‌های حجمی به دست آمده از این روش‌ها خیلی کوچک بوده و برای کاربردهایی مانند صنایع الکترونیک مناسب می‌باشد. همچنین در محصولات فرآوری شده با این روش‌ها همواره مقداری تخلخل و آلودگی خارجی وجود دارد که در حین پروسه تولید وارد نمونه می‌شوند [۱]. رویکرد دوم مربوط به روش‌هایی است که در آن‌ها از طریق اعمال کرنش مومسان شدید روی مواد با دانه‌بندی اولیه درشت و کنترل تحولات متالورژیکی حاکم، محصولات فلزی UFG فرآوری می‌شود. روش‌های مبتنی بر رویکرد دوم در مقایسه با روش‌های مبتنی بر رویکرد اول دارای مزایایی است که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

۱- ابعاد و حجم نمونه‌های به دست آمده از این روش‌ها بزرگ‌تر می‌باشد.

۲- در حین فرایند تولید هیچ‌گونه آلودگی و تخلخل در محصول ایجاد نمی‌شود.

۳- با استفاده از این روش‌ها می‌توان طیف وسیعی از فلزات را فرآوری کرد.

به طور کلی روش‌های مبتنی بر رویکرد دوم را می‌توان به دو دسته زیر تقسیم‌بندی کرد [۱]:

۱- فرایندهای مختلف ترمومکانیکی

۲- فرایندهای SPD

^۱ Bottom-Up Approach

^۲ Up-Down Approach

مقایسه فرآیندهای ترمومکانیکی و SPD

در فرایندهای ترمومکانیکی کرنش مومسان با استفاده از روش‌های معمول شکل‌دهی مانند نورد و اکستروژن به فلز اعمال می‌شود، اما در روش‌های معمول شکل‌دهی به دو دلیل میزان کرنش اعمالی بر روی فلز محدود می‌باشد:

۱- در تمامی این روش‌ها افزایش کرنش متناظر با کاهش سطح مقطع نمونه می‌باشد و از نظر صنعتی این کاهش سطح مقطع تا حدی مقدور است.

۲- به دلیل شکل‌پذیری کم فلزات و آلیاژها در دماهای پایین و عدم اعمال تنش هیدرواستاتیک فشاری بر روی نمونه‌ها، کرنش‌های اعمال‌شده توسط روش‌های معمولی تغییر شکل محدود می‌باشد.

به طور کلی برای تولید مواد فلزی UFG لازم است که:

۱- کرنش‌های پلاستیک شدید به ماده اعمال شود تا چگالی بالایی از نابجایی‌ها تولید شود.

۲- نابجایی‌های تولیدی باید آرایش مجدد یافته و آرایه‌ای از مرز دانه‌ها را ایجاد کنند.

با عملیات ترمومکانیکی معمولاً نمی‌توان به محصولات فلزی با اندازه دانه‌های کوچک‌تر از $1\ \mu\text{m}$ رسید، این مسئله به دلیل پایین بودن میزان کرنش اعمالی در فرایندهای ترمومکانیکی است. عموماً با عملیات ترمومکانیکی حداکثر می‌توان دانه‌های یک فلز را تا حد $2-5\ \mu\text{m}$ ریز نمود. از این رو توجه محققان به ابداع و توسعه روش‌های جدیدی بود که بتوان با استفاده از آن روش‌ها کرنش‌های شدیدی را اعمال نمود و محصولات فلزی با اندازه دانه‌های کوچک‌تر از $1\ \mu\text{m}$ و در حد نانومتر تولید کرد. لذا در این ارتباط روش‌های مختلف SPD ابداع و پیشنهاد شد. تفاوت عمده بین فرایندهای مختلف ترمومکانیکی با روش‌های SPD در میزان کرنش اعمالی است. دو مشخصه مهم زیر در مورد روش‌های SPD وجود دارد [۲]:

۱- حضور تنش هیدرواستاتیکی زیاد روی نمونه که به موجب آن شکل‌پذیری فلز بهبود یافته و می‌توان کرنش‌های شدیدی را بدون بروز ترک بر نمونه، اعمال کرد.

۲- در هر مرحله از تغییر شکل، معمولاً میزان کرنش اعمالی بر روی نمونه پایین می‌باشد، اما با تکرار دفعات اعمال کرنش، نمونه در نهایت کرنش شدیدی را متحمل می‌شود.

با توجه به اینکه خصوصیات فیزیکی و مکانیکی همه مواد بلورین با چند عامل از جمله متوسط اندازه دانه مشخص می‌شود در نتیجه استحکام همه مواد بس بلور با اندازه دانه رابطه عکس خواهد داشت.

معادله هال-پیچ^۱ که نشان‌دهنده تنش تسلیم است بدین شکل بیان می‌شود:

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

طبق معادله (۱-۱) کاهش اندازه دانه باعث افزایش استحکام خواهد شد و این بهبود خواص فیزیکی عاملی برای استفاده از مواد UFG در صنعت خواهد بود.

انواع روش‌های SPD

اولین مقالات علمی در مورد فرآوری مواد فلزی حجمی UFG به روش SPD مربوط به اوایل دهه ۱۹۹۰ می‌باشد. در این مقالات فرآوری مواد حجمی UFG با ساختار دانه‌ای یکنواخت و هم محور با کسر زیادی از مرزهای بزرگ زاویه از طریق اعمال کرنش‌های شدید به اثبات رسیده است [۲].

برخی از روش‌های مهم SPD عبارتند از:

- ۱- پرس کاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار^۲
- ۲- نورد تجمعی^۳
- ۳- پیچش تحت فشار بالا^۴
- ۴- فورج چند جهته^۵
- ۵- اکستروژن پیچشی^۶
- ۶- نورد و فشار در شیار^۷
- ۷- فشردن سازی مداوم در کانال قالب^۸
- ۸- اکستروژن پیچشی و پیچش پس از اکستروژن^۹

^۱ Hah-etch

^۲ Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

^۳ Accumulative Roll Bonding (ARB)

^۴ High Pressure Torsion (HPT)

^۵ Multi Directional Forging (MDF)

^۶ Twist Extrusion (TE)

^۷ Constrained Groove Pressing and Rolling (CGP, CGR)

^۸ Cyclic Channel Die Compression (CCDC)

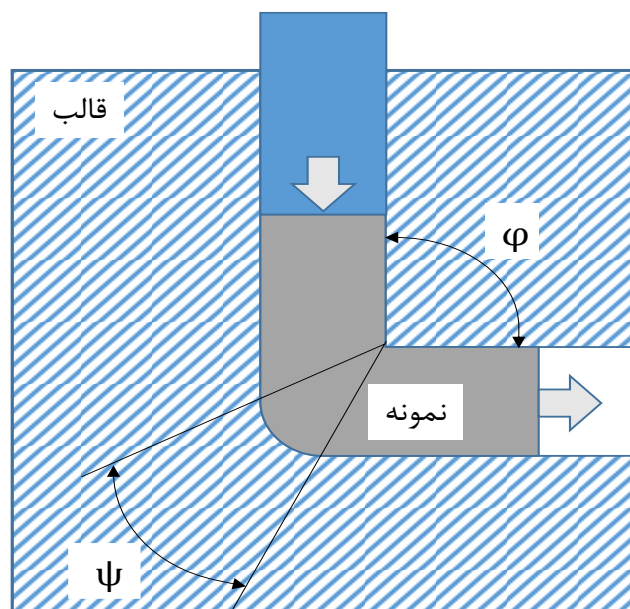
^۹ Torsion Extrusion and Torsion after Extrusion (TE, TAE)

۹- اکستروژن هیدرواستاتیک^۱

بعضی از این روش‌ها مانند ECAP, HPT, MDF و ARB روش‌های کاملاً توسعه‌یافته‌ای برای تولید مواد حجمی UFG می‌باشند. با استفاده از این روش‌ها می‌توان به اندازه دانه‌هایی در حد ۷۰-۵۰۰ nm دست یافت. امروزه با استفاده از این روش‌ها امکان تولید شمش‌هایی با ساختار UFG در مقیاس بزرگ میسر شده و به موجب آن زمینه برای تولید محصولات صنعتی از شمش‌های مذکور گسترش یافته است.

۱-۱- روش ECAP

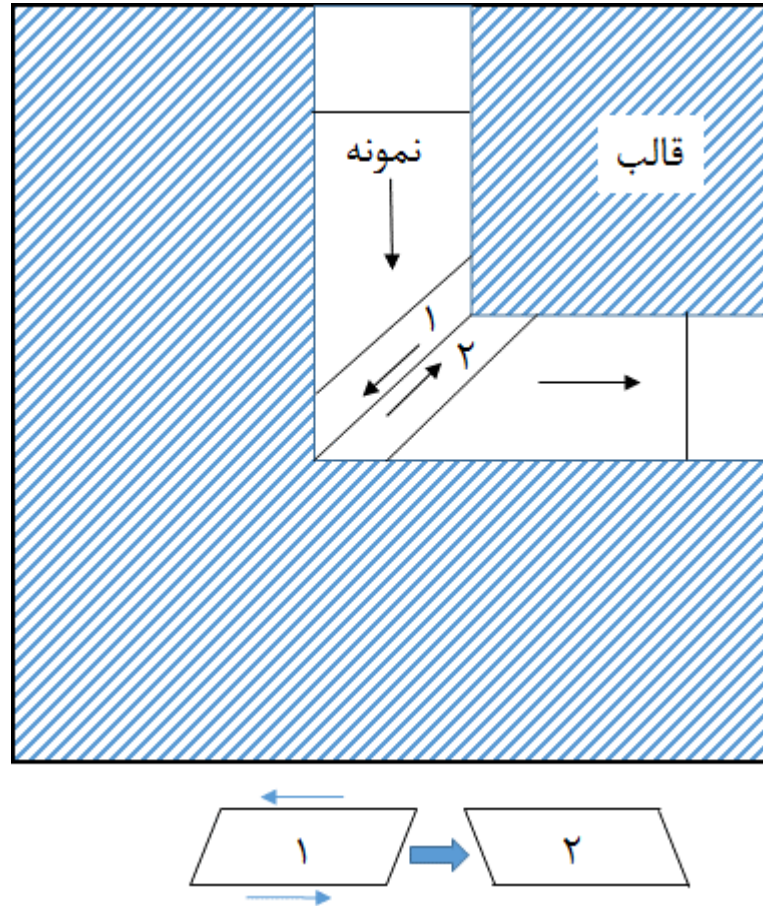
شماتیکی از روش ECAP در شکل ۱-۱ آورده شده است. این روش برای اولین بار توسط سیگال و همکارانش [۳] معرفی شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود قالب ECAP دارای کانالی با سطح مقطع دایره‌ای یا مربعی شکل می‌باشد که این کانال با زاویه تندی خمیده شده است. زاویه بین کانال‌ها φ بوده و زاویه‌ای که انحنا بیرونی محل تقاطع دو کانال دارد با ψ نشان داده شده است. در این روش نمونه‌ای با مقطع دایره‌ای یا مربعی از داخل کانال عبور داده می‌شود. کرنش ایجاد شده بر روی نمونه از نوع برشی خالص بوده که در حین عبور نمونه از ناحیه تغییر شکل برشی به نمونه اعمال می‌شود.



شکل ۱-۱ فرایند پرس کاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار

^۱ Hydrostatic Extrusion (HE)

در شکل ۲-۱ نحوه اعمال کرنش برشی بر روی نمونه در حین عبور از خمیدگی قالب نشان داده شده است. کرنش برشی در سطح تقاطع بین دو قسمت کانال (در فصل مشترک المان‌های ۱ و ۲) روی فلز اعمال می‌شود. نحوه تغییر شکل المان از حالت ۱ به ۲ در اثر کرنش برشی دیده می‌شود.

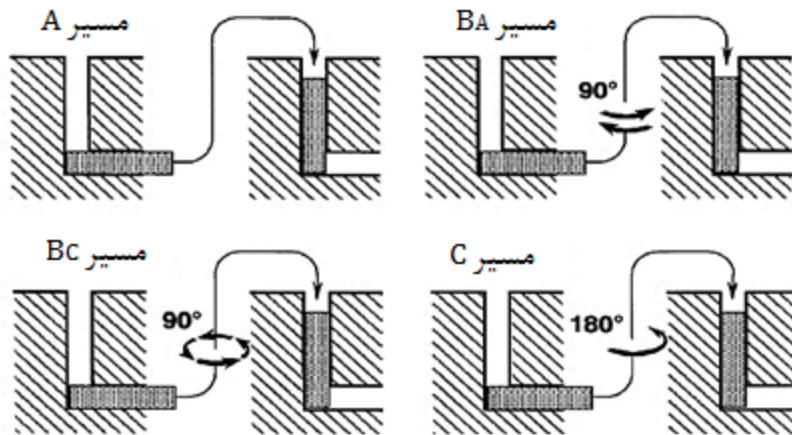


شکل ۲-۱ اصول کلی روش ECAP و صفحه اعمال تغییر شکل برشی در داخل قالب، المان ۱ در اثر عبور از صفحه برشی داخل قالب به شکل المان ۲ در می‌آید.

همان‌گونه که از شکل ۱-۱ نیز دیده می‌شود، ابعاد سطح مقطع نمونه در حین اعمال کرنش از طریق ECAP ثابت باقی می‌ماند لذا می‌توان نمونه را به دفعات متوالی از قالب عبور داد و در هر عبور مقداری کرنش مومسان در فلز ذخیره کرد.

مسیرهای شکل‌دهی

چهار مسیر مختلف فرایند به طور شماتیک در شکل ۳-۱ نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱ مسیرهای مختلف فرایند ECAP [۴]

مسیر A: که در آن نمونه‌ها بدون هیچ‌گونه چرخشی دوباره وارد قالب می‌شوند.

مسیر BA: که در آن نمونه‌ها در هر بار پرس کاری 90° ساعتگرد و 90° پادساعتگرد می‌چرخند.

مسیر BC: که در آن نمونه‌ها پس از هر مرحله فقط 90° در یک جهت چرخانده می‌شوند.

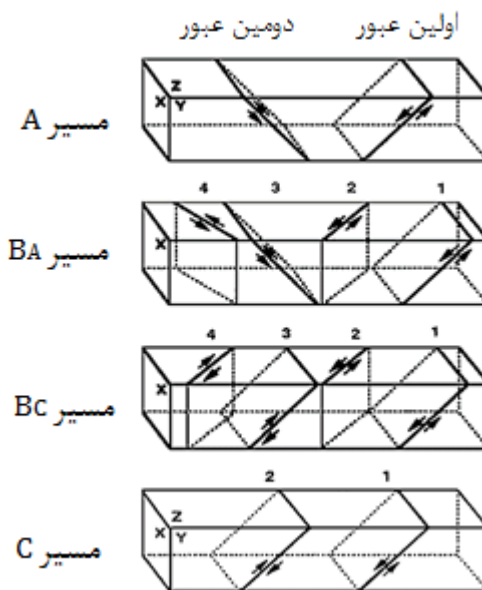
مسیر C: که در آن نمونه پس از هر مرحله 180° چرخانده می‌شود.

ترکیب‌های مختلفی از این مسیرها قابل دست‌یابی است مانند ترکیب مسیر BC و C بصورتی که پس از هر مرحله در ابتدا نمونه 90° و پس از آن 180° چرخانده می‌شود، اما شواهد علمی نشان می‌دهد که این ترکیب مسیرها تغییری بر خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها نخواهد داشت [۴].

سیستم‌های لغزش برای مسیرهای گوناگون

سیستم‌های لغزش متفاوتی بر مبنای مسیرهای مختلف در شکل ۴-۱ نمایش داده شده است. مطابق این شکل سیستم لغزش برای مراحل مختلف در هر مسیر نشان داده شده است، صفحاتی که با ۱ تا ۴ مشخص شده‌اند متناظر با یک تا چهار مرحله ECAP می‌باشند. در مسیر C برش بر روی همان صفحه در هر بار عبور اتفاق می‌افتد اما جهت برش پس از هر مرحله تغییر می‌کند، بنابراین مسیر C یک کرنش زائد^۱ است که پس از هر مرحله زوج کرنش اصلاح می‌شود. مسیر BC هم دارای کرنش زائد است چون لغزش در مرحله اول به وسیله لغزش در مرحله سوم و لغزش در مرحله دوم به وسیله لغزش در مرحله چهارم بی‌اثر می‌شود.

^۱ Redundant strain

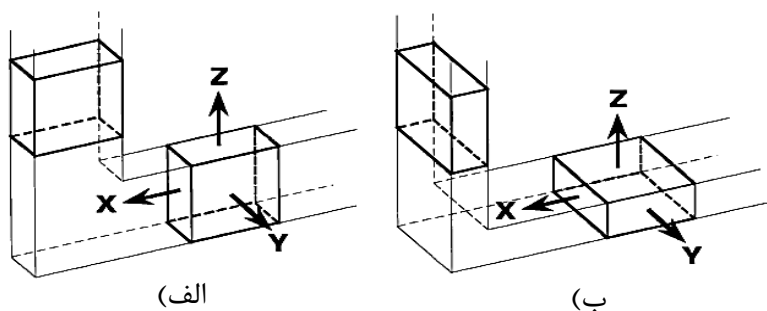


شکل ۴-۱ سیستم‌های مختلف لغزش برای مسیرهای گوناگون [۴]

همان طور که مشخص است مسیرهای A و BA فاقد کرنش اضافه می‌باشند.

۱-۱-۱ فرایند ECAP برای ورق‌ها

برای برخی کاربردهای صنعتی استفاده از ورق‌ها با اندازه دانه کوچک ضروری است، این نیاز باعث توسعه فرایند ECAP برای تولید نمونه‌های صفحه‌ای شد. هنگام پرس کاری نمونه‌های صفحه‌ای باید توجه داشت که دو حالت کاملاً متمایز وجود خواهد داشت. این حالات در شکل ۵-۱ نمایش داده شده است، در قسمت الف) نمونه به صورت عمودی و در شکل ب) نمونه در حالت افقی قرار گرفته است [۵] و محورهای X، Y و Z مشخص شده‌اند، در این نمونه‌ها میزان چرخش بین هر مرحله محدود خواهد بود، برای مثال نمونه عمودی می‌تواند در این جهات چرخش کند: ۱- چرخش 180° حول محور X که این مسیر CX نامیده می‌شود، C نشان‌دهنده 180° چرخش و X مشخص‌کننده گردش حول محور X می‌باشد، همچنین 180° چرخش حول محور Z، CZ نامیده می‌شود.

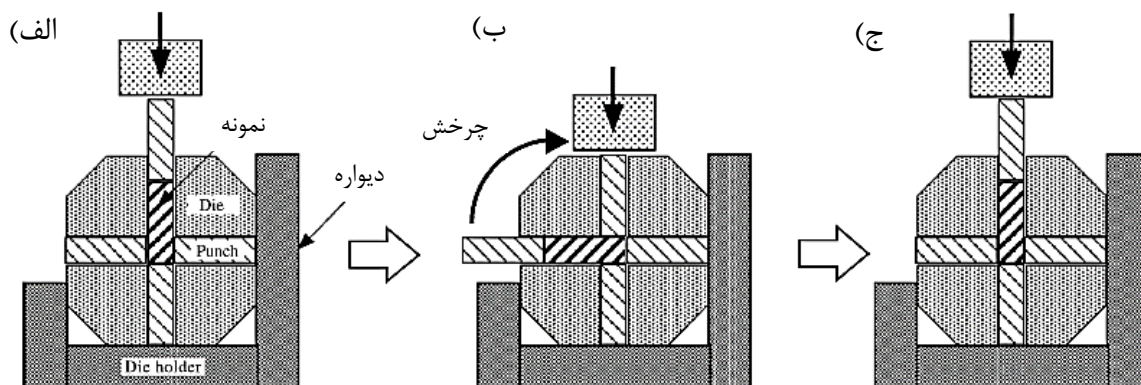


شکل ۵-۱ فرایند ECAP برای نمونه‌های مسطح الف) حالت عمودی، ب) حالت افقی [۵]

۱-۱-۲ قالب‌های چرخشی، قالب با چندین سنبه و قالب‌های چند مرحله‌ای

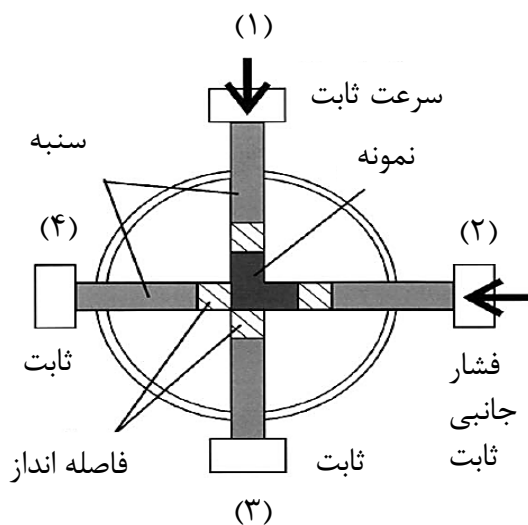
بزرگ‌ترین محدودیتی که در ECAP وجود دارد خروج نمونه‌ها پس از هر مرحله و قرار گرفتن داخل قالب برای مرحله بعد است، به دلیل این هدر رفت زمان هنگام تعویض نمونه‌ها و مسیرهای مختلف روش‌های جدیدی به منظور کاهش هزینه و وقت پیشنهاد شده است.

یکی از این روش‌ها استفاده از قالب‌های چرخشی می‌باشد [۶]، که به صورت شماتیک در شکل ۱-۶ آمده است، ملزومات شامل یک قالب با دو کانال است که مقاطع یکسانی دارند، تقاطع دو کانال با یکدیگر زاویه 90° می‌سازد، در قسمت پایینی قالب سه سنبه هم اندازه در کانال‌های افقی و عمودی جایگذاری می‌شوند. همان طور که در شکل ۱-۶ دیده می‌شود هنگامی که نمونه در کانال عمودی قرار می‌گیرد، نمونه روی سنبه زیرین به وسیله سنبه بالایی فشرده می‌شود و چون سمت راست و پایین آن بسته است از کانال سمت چپ خارج می‌شود. موقعیت دوم قالب در شکل ۱-۴-ب نمایش داده شده است که قالب 90° چرخیده است در نتیجه نمونه دوباره تحت فشار قرار می‌گیرد که موقعیت آن در شکل ۱-۴-ج نمایش داده شده است. همان طور که از تصاویر پیداست این روش مناسب مسیر A می‌باشد، هنگامی که نمونه احتیاج به هیچ چرخشی بین مراحل نداشته باشد، با این حال یکی از مزیت‌های قابل توجه این روش سادگی فرایند است، برای مثال قالب چرخشی ECAP برای پرس کاری متوالی تا ماکزیمم ۳۲ مرحله استفاده شده است. محدودیت این روش انتهای ناهمگون نمونه به دلیل کوچک بودن ابعاد است که در شکل ۱-۴ نمایش داده شده است.



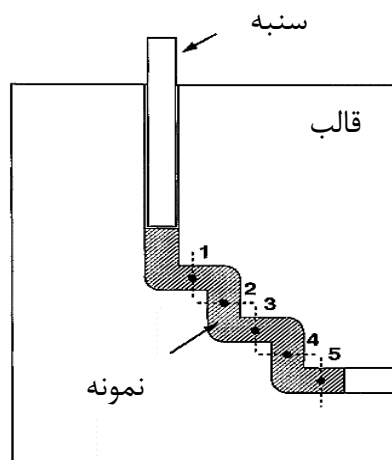
شکل ۱-۶ ECAP با قالب چرخشی (الف) موقعیت اولیه، (ب) پس از اولین مرحله و (ج) پس از 90° چرخش قالب [۶] روش جایگزینی که پیشنهاد شده استفاده از قالب با چندین سنبه است که در شکل ۱-۷ نمایش داده شده است [۷]. در این روش از چهار سنبه استفاده می‌شود که می‌توانند نیروهای زیادی را تحمل کنند، نمونه توسط سنبه (۱) فشرده می‌شود و از طرف سنبه (۲) نیروی جانبی به نمونه اعمال می‌شود و به صورت مکرر همانند

روش قالب چرخشی پرس کاری انجام می‌شود. این فرایند همانند روش قبل مناسب مسیر A می‌باشد و تا ۱۰ مرحله تکرار شده است [۷].



شکل ۷-۱ شماتیک روش قالب چند سنبله‌ای [۷]

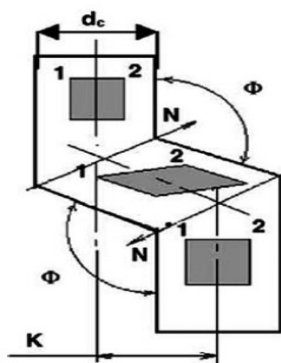
روش جایگزین دیگری که احتیاج به تجهیزات پیچیده ندارد استفاده از قالب‌های چند مرحله‌ای می‌باشد که در شکل ۸-۱ نمایش داده شده است. همان طور که مشخص است قالب شامل چندین کانال است که در زوایای 90° نسبت به هم قرار گرفته‌اند [۸]. این فرایند مناسب مسیر C می‌باشد که پس از مرحله دوم چرخش 180° نمونه‌ها اتفاق می‌افتد. این نوع قالب برای بررسی ساختار دانه‌بندی نمونه‌ها تحت مراحل مختلف مناسب می‌باشد. برای مثال موقعیت‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ در شکل ۸-۱، برای بررسی ریز ساختار مناسب می‌باشند. این قالب‌ها معمولاً به صورت دو تکه ساخته می‌شود تا دسترسی به نمونه‌ها به آسانی انجام شود.



شکل ۸-۱ قالب‌های چند مرحله‌ای [۸]

۳-۱-۱ ECAP با کانال‌های موازی

امروزه پتانسیل جدیدی برای استفاده از ECAP با کانال‌های موازی ایجاد شده است، اخیراً نتایجی نیز از این روش گرفته شده است. پژوهش‌هایی که در این باره انجام شده است عبارت است از استفاده از روش المان محدود دو بعدی و آزمایش‌های مستقیم که بیانگر فواید این روش می‌باشد. اصول این روش به صورت شماتیک در شکل ۹-۱ نمایش داده شده است [۹]. در این شکل φ زاویه محل برخورد دو کانال می‌باشد و K فاصله بین محور دو کانال است.



شکل ۹-۱ ECAP با کانال‌های موازی [۹]

وجه تمایز استفاده از دو کانال موازی زمانی خواهد بود که در طی یک فرایند، دو برش متمایز اتفاق می‌افتد [۱۰]. این بدین معنی است که برای رسیدن به ساختار دانه‌بندی UFG احتیاج به مراحل اضافی نخواهد بود. میزان فاصله و زاویه بین دو کانال K و φ پارامترهای اصلی طراحی قالب هستند که روی الگوی جریان ماده و میزان تنش و کرنش تأثیر خواهند داشت.

از ویژگی‌های مهم فرایند، جریان مواد در کانال‌های موازی است، پس از یک مرحله کامل شبکه بندی روی نمونه‌ها هیچ انحرافی را نشان نمی‌دهد [۹]، در نتیجه توزیع کرنش یکنواختی حتی در قسمت انتهایی نمونه‌ها به دست می‌آید. بنابراین بر خلاف روش متداول ECAP شکل نمونه‌ها پس از پرس کاری همانند شکل اولیه آن‌ها باقی خواهد ماند.

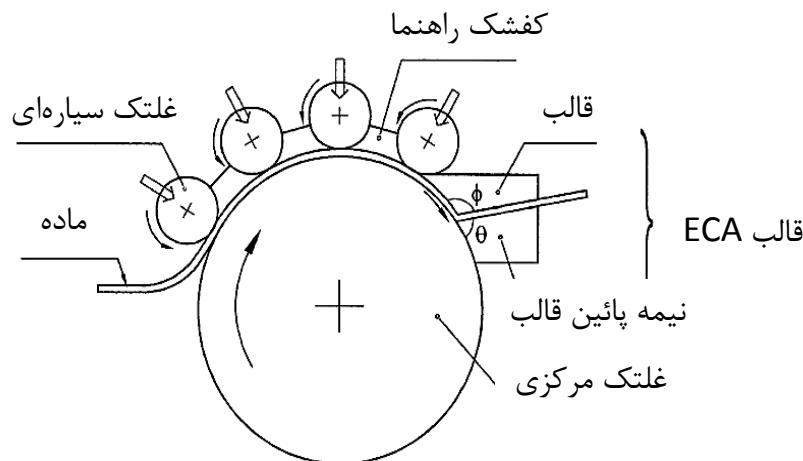
ECAP در کانال‌های موازی در دمای 500°C برای نمونه‌هایی از جنس مس و تیتانیوم برای ۴ مرحله انجام شده است و سپس ساختار آن به وسیله دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری^۱ مورد بررسی قرار گرفته است

^۱ Transmission electron microscop (TEM)

که نشان می‌دهد ساختار داخلی آن‌ها همانند زمانی است که نمونه‌ها در عملیات ECAP متداول تحت ۸ مرحله قرار گرفته‌اند. بنابراین ساختار UFG همگن تری در طول نمونه‌ها از ابتدا تا انتها ایجاد شده است. افزایش همگنی ساختار میکروسکوپی مهم‌ترین دست‌آوردی است که پتانسیل استفاده از ECAP را برای عملیات نهایی افزایش می‌دهد [۹].

۴-۱-۱ استفاده از غلتک‌های راهنما

در این فرایند از غلتک‌هایی به منظور راهنمایی و حمایت نمونه استفاده شده است [۱۱، ۱۲]. شماتیک این فرایند در شکل ۱-۱۰ آمده است. در این فرایند نمونه بین چندین غلتک سیاره‌ای و یک غلتک بزرگ مرکزی قرار می‌گیرد و همه این غلتک‌ها با سرعتی یکسان شروع به چرخیدن می‌کنند تا نیروی مورد نیاز، برای به جلو راندن نمونه ایجاد شود. قالب از دو قسمت نیمه بالایی و زیرین تشکیل شده است. زاویه نیمه بالایی قالب با غلتک مرکزی ϕ ، از پارامترهای مهم می‌باشد [۱۳].



شکل ۱-۱۰ استفاده از غلتک راهنما و ECA [۱۱]

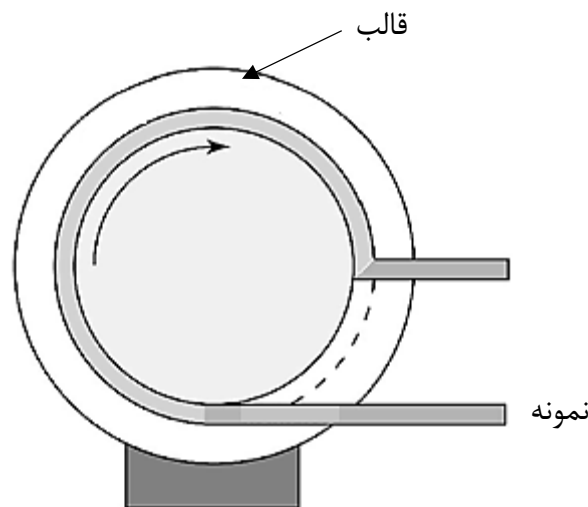
با وجود موفقیت‌های بدست‌آمده در ارتباط با این روش‌ها، نتایج به دست آمده تنها دامنه‌ای بسیار محدود از مواد و آلیاژها را شامل می‌شود. کارهای زیادی باید انجام شود تا این تکنیک‌ها دامنه وسیعی از مواد را تحت پوشش قرار دهند.

۱-۱-۵ ECAP به عنوان فرایند تلفیقی^۱

اکستروژن تلفیقی در سی سال قبل برای تولید مفتول گسترش یافته بود [۱۴]. اما امروزه این فرایند با ECAP ترکیب شده است و به عنوان ECAP تلفیقی شناخته می‌شود [۱۵].

در این فرایند اصل بر استفاده از نیروی اصطکاک برای کشیدن قطعه در قالب ECAP است. قالب طوری طراحی شده است که قطعه کار می‌تواند مکرراً تحت عملیات قرار بگیرد تا ساختار UFG ایجاد شود.

قالب این فرایند به صورت شماتیک در شکل ۱-۱۱ نمایش داده شده است [۱۵]. همان طور که ملاحظه می‌شود قالب از محور چرخنده و یک محفظه که فضای بین محور و پوسته بیرونی است و قطعه کار در داخل آن قرار می‌گیرد تشکیل شده است. قطعه کار توسط نیروی اصطکاک به جلو کشیده می‌شود و در اثر تماس با محور چرخان شروع به چرخیدن می‌کند. قطعه کار در داخل قالب به وسیله محفظه ثابت محدود می‌شود و همچنین این قسمت به قطعه کار در زاویه مشخص شده نیرو وارد می‌کند. در این شکل زاویه تنظیم شده 90° می‌باشد که معمول‌ترین زاویه در کانال‌های همسان زاویه‌دار می‌باشد، با این زاویه ECAP به طور موثری پیوسته خواهد بود. سایر پارامترهای ECAP مانند زاویه قالب و نرخ کرنش نیز باید در نظر گرفته شوند.



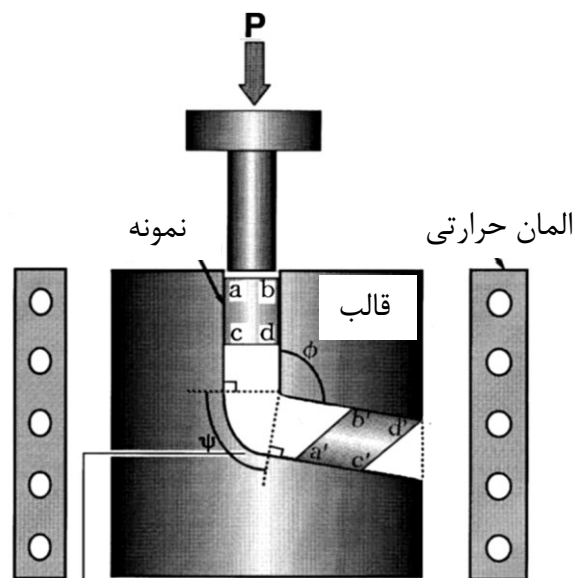
شکل ۱-۱۱ شماتیک فرایند ECAP تلفیقی [۱۵]

^۱ The ECAP-Conform process

۱-۱-۶ فرایند ECAP به عنوان تثبیت‌کننده^۱

فرایند ECAP علاوه بر اینکه برای مواد جامد فلزی استفاده می‌شود می‌تواند برای پودرهای فلزی نیز استفاده شود [۱۷،۱۶]. شکل ۱۲-۱ فرایند ECAP را برای پرس پودر آلومینیم ۲۰۲۴ نشان می‌دهد [۱۶]. پودر اولیه با اندازه دانه کوچک‌تر از $45 \mu\text{m}$ به صورت سرد پرس می‌شود و تشکیل یک میل‌گرد با قطر 20 mm و طول 70 mm را می‌دهد. در شکل ۱۲-۱ زاویه بین دو کانال 105° و زاویه انحنای محل برخورد دو کانال 75° است.

مشکلی که در پرس‌کاری پودرهای آلومینیمی رخ می‌دهد ایجاد ترک است که به منظور جلوگیری از این مشکل معمولاً پودر را داخل محفظه‌ای از جنس خود پودر قرار داده و در حالت گرم پرس‌کاری می‌کنند. این محفظه در شکل ۱۲-۱ به صورت abcd نمایش داده شده است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد نمونه با چگالی بالا و بدون ترک تولید شده است، البته به کمک قرار دادن فشار پستی نیز می‌توان ترک‌ها را حذف نمود و به اندازه دانه‌ای در حدود $1 \mu\text{m}$ رسید.

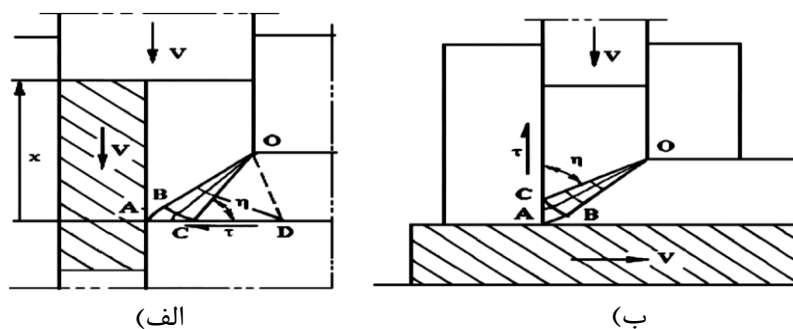


محل اندازه‌گیری
و کنترل دما

شکل ۱۲-۱ فرایند ECAP به عنوان تثبیت‌کننده [۱۶]

۷-۱-۱ سهولت ساخت تجهیزات ECAP

یک روش ساده برای ساخت تجهیزات ECAP ماشین کاری دو صفحه با مقطع چهارگوش و پولیش کردن آن‌ها است که می‌توان برای ایجاد قسمت‌هایی از قالب از آن‌ها کمک گرفت البته این روش بیشتر مناسب کارهای آزمایشگاهی است و چندین مرحله شکل‌دهی را می‌توان به وسیله آن ایجاد کرد. روان‌ساز مناسب مانند MoS_2 به منظور کاهش اصطکاک دیواره‌های قالب استفاده می‌شود. روش دیگر برای کاهش اصطکاک استفاده از دیواره‌های متحرک است [۱۹، ۱۸]. دو مثال از دیواره‌های قابل حرکت در شکل ۱-۱۳ نمایش داده شده است که دیواره‌ها در دو حالت هاشور زده شده‌اند: الف) دیواره به عنوان کانال ورودی و ب) به عنوان کانال خروجی.



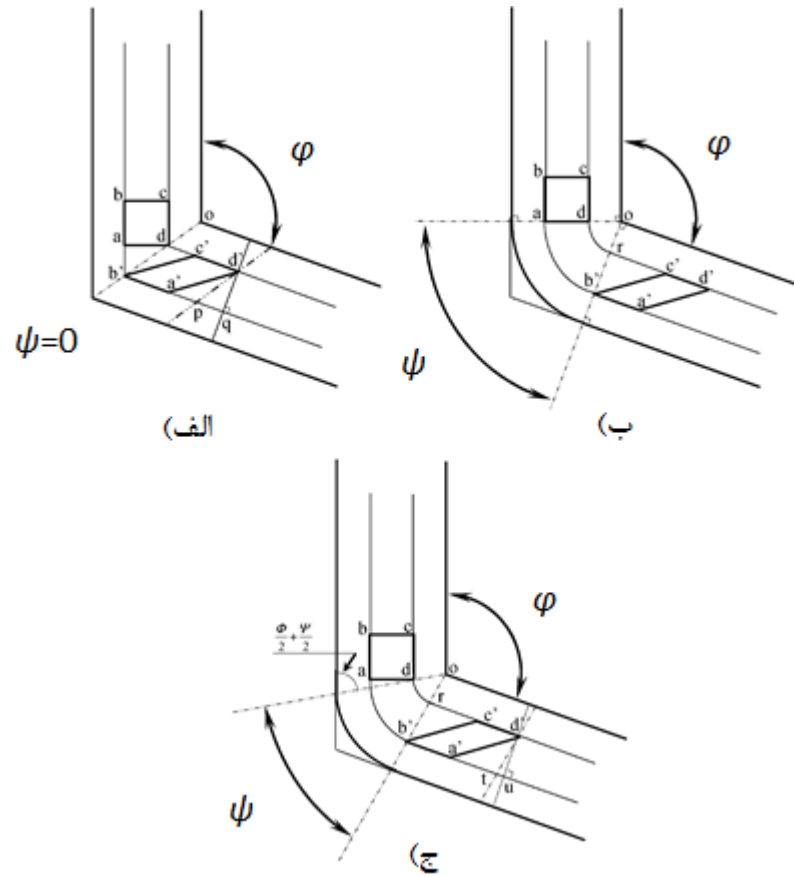
شکل ۱-۱۳ قالب ECAP با دیواره‌های متحرک [۲۰]

۸-۱-۱ متغیرهای اساسی ECAP

طرز عمل فرایند ECAP، جریان مواد از طریق برش ساده است. چند پارامتر اساسی مانند کرنش‌های اعمالی در هر مرحله از طریق قالب و سیستم لغزش در طی فرایند پرس کاری از پارامترهای اساسی در تعیین ساختار UFG تولیدات است.

۹-۱-۱ کرنش اعمالی در ECAP

مقادیر کرنش به ازای زوایای مختلف در شکل ۱-۱۴ نشان داده شده است. کرنش در حالتی که نمونه‌ها به طور کامل روانکاری شده‌اند و هیچ اصطکاک وجود ندارد در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱۴-۱ زوایای مختلف انحنای بیرونی کانال (الف) $\psi=0^\circ$ ، (ب) $\psi=(\pi-\varphi)^\circ$ و (ج) $0 < \psi < (\pi-\varphi)^\circ$

برای موقعیتی که $\psi=0^\circ$ است شکل ۱۴-۱ الف یک المان مربعی کوچک در ورودی کانال با نام‌گذاری abcd نام‌گذاری شده است و پس از عبور از کانال و رسیدن به کانال دوم با تغییر شکل ایجاد شده با نام‌گذاری شده $a'b'c'd'$ است، می‌توان از اصول اولیه مشخص نمود که کرنش برشی γ از رابطه (۲-۱) به دست می‌آید.

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (۲-۱)$$

با استفاده از همین روش برای حالت ۱۴-۱ ب- رابطه به صورت (۳-۱) خواهد بود.

$$\gamma = \psi \quad (۳-۱)$$

و با تحلیلی مشابه برای حالت ۱۴-۱ ج- رابطه (۴-۱) صادق خواهد بود.

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) + \psi \operatorname{Cosec}\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) \quad (۴-۱)$$

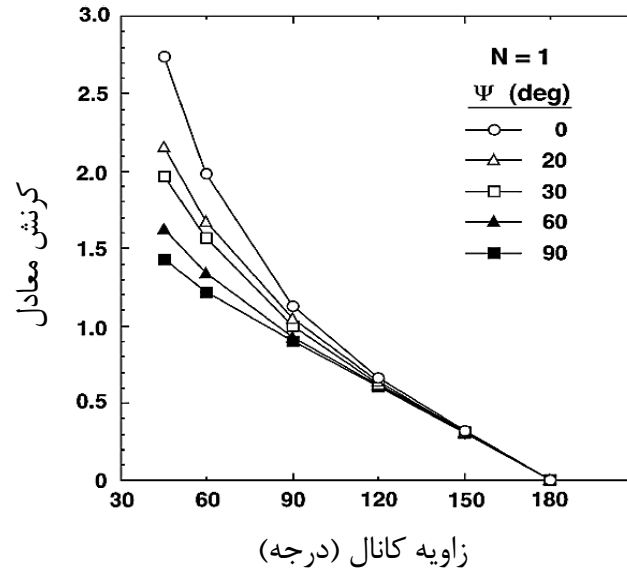
شکل کلی معادله به صورت رابطه (۴-۱) می‌باشد که با قرار دادن $\psi=0^\circ$ به رابطه (۲-۱) و با قرار دادن $\psi=(\pi-\varphi)$ به رابطه (۳-۱) خواهیم رسید، در نتیجه معادله کرنش مومسان معادل برای N مرحله به شکل رابطه (۵-۱) در خواهد آمد.

$$\epsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2\cot\left(\frac{\varphi + \psi}{2}\right) + \psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\varphi + \psi}{2}\right) \right] \quad (۵-۱)$$

در رابطه (۵-۱) هنگامی که $\psi=0^\circ$ و زاویه کانال دو برابر در نظر گرفته شود رابطه به شکل (۶-۱) در خواهد آمد.

$$\epsilon_N = \frac{2N}{\sqrt{3}} \cot \varphi \quad (۶-۱)$$

شواهد آزمایشگاهی در مورد صحت استفاده از رابطه (۵-۱) در ECAP وجود دارد، اولین مورد استفاده از نمونه رنگ شده در یک قالب شفاف بود که نشان می‌داد تطبیق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و معادله (۵-۱) وجود دارد، در نواحی مرکزی نمونه این مقادیر بسیار دقیق تر اما در کناره‌های نمونه به دلیل اصطکاک مقداری انحراف وجود داشت [۲۱]. دومین مورد آزمایش بر روی میل گردی از جنس آلومینیم خالص است که در این حالت $\varphi=90^\circ$ و $\psi=0^\circ$ بوده و کرنش به طور مستقیم پس از پرس کاری اندازه‌گیری شد [۲۲]. نتایج تطبیق بسیار خوبی را با معادله (۵-۱) نشان می‌دادند، معادله مشخص می‌کرد که ۸۵٪ ناحیه تغییر شکل به صورت غیریکنواخت است اما در عمل مشخص شد که فقط ۱۵٪ ناحیه تغییر شکل غیریکنواخت است. در نمودار شکل ۱-۱۵ رابطه بین کرنش معادل و زاویه قالب نمایش داده شده است. این نمودار میزان کرنش معادل برای یک مرحله در زوایای قالب از 45° تا 180° و زاویه انتهایی قالب از صفر تا 90° را مشخص می‌کند.



شکل ۱-۱۵ تأثیر زوایای مختلف قالب بر کرنش [۲۲]

نتایجی که از نمودار به دست می‌آید بدین شرح است:

- زاویه انتهایی قالب ψ تأثیر کمی بر کرنش معادل در زوایای قالب $\varphi > 90^\circ$ خواهد داشت.
- مقادیر کرنش بالا در یک مرحله از طریق کاهش مقادیر φ و ψ به دست خواهد آمد.
- برای قالب‌های متداول با زاویه 90° کرنش معادل برای یک مرحله تقریباً برابر یک خواهد بود که این میزان کرنش از زاویه انتهایی قالب مستقل خواهد بود.

عوامل تجربی موثر بر ECAP

هنگامی که مواد تحت عملیات ECAP قرار می‌گیرند چندین عامل مختلف بر کارپذیری و ساختار میکروسکوپی نمونه تأثیر می‌گذارد این عوامل به سه بخش تقسیم‌بندی می‌شوند.

- عواملی که به طور مستقیم بر فرایند تأثیر می‌گذارند مانند زاویه قالب و زاویه انتهایی محل برخورد دو کانال
- عواملی که به طور غیرمستقیم و به واسطه اجراکننده فرایند، کنترل می‌شود مانند سرعت فرایند، دمای اجرای فرایند و وجود یا عدم وجود فشار پشتی
- عواملی که بر بهبود، همگنی ساختار و پالایش دانه‌بندی تأثیر خواهد داشت مانند ساختار کریستالی اولیه و توزیع دانه‌ها

بنابراین برای آزمایش کننده مهم است که رفتار ماده را قبل از اجرای فرایند مورد تحلیل قرار دهد.

۱-۱-۱۰ تأثیر زاویه کانال بر فرایند

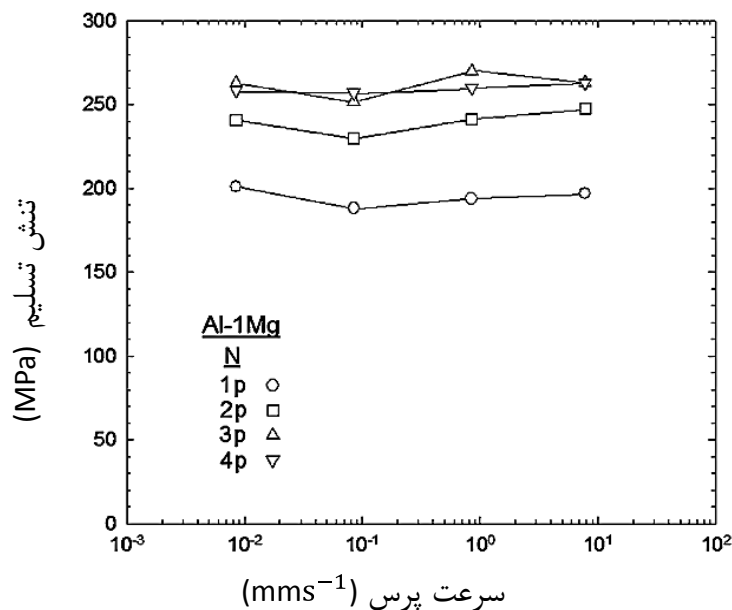
زاویه کانال مهم‌ترین عاملی است که میزان کرنش اعمالی در هر مرحله را دیکته می‌کند و تأثیر مستقیم بر ساختار میکروسکوپی ماده خواهد داشت، با این اوصاف غالب پژوهش‌ها با زوایای کانال بین 90° - 120° انجام شده است و مقادیر بالاتر و پایین‌تر از این زوایا تأثیر چندانی بر نتایج نخواهند داشت.

۱-۱-۱۱ تأثیر زاویه محل تقاطع دو کانال

زاویه انحنای کانال، که نشان‌دهنده زاویه قوس انتهایی دو کانال در محل برخورد است، این زاویه نقش کم‌رنجی را در فشار اعمالی به نمونه بازی می‌کند، با این حال مهم است که تأثیر این زاویه بر بهبود ساختار مواد مورد بررسی قرار گیرد، پژوهش‌های زیادی وجود دارد که به وسیله نرم‌افزارهای المان محدود میزان زاویه ψ را محاسبه کرده‌اند [۲۳-۲۵].

۱-۱-۱۲ تأثیر سرعت پرس

فرایند ECAP معمولاً به وسیله پرس‌های هیدرولیکی انجام می‌شود. سرعت پرس به طور متداول بین $1-20 \text{ mm/s}$ است. اولین پژوهش‌ها در مورد سرعت رم پرس برای آلومینیم خالص و آلیاژ آلومینیم و $10-100 \text{ mm/s}$ انجام شد [۲۶]. نتیجه این آزمایش‌ها نشان داد که سرعت پرس تأثیر چندانی بر بهبود ساختار داخلی نمونه‌ها ندارد، اما در سرعت‌های پایین‌تر میزان تعادل میکرو ساختار ماده بیشتر خواهد بود. شکل ۱-۱۶ عدم تأثیر سرعت پرس بر تنش تسلیم را برای آلیاژ آلومینیم و 10 S^{-1} منبسط نشان می‌دهد. در این شکل تنش تسلیم با تست کشش در دمای محیط با نرخ کرنش 10 S^{-1} انجام شده است و این مقادیر برای تعداد مراحل مختلف تحت مسیر BC رسم شده است. مطابق نمودار بر میزان استحکام با افزایش تعداد مراحل شکل‌دهی افزوده شده است. از تفاوت‌های دیگری که در سرعت‌های مختلف اتفاق می‌افتد می‌توان به گرم شدن نمونه تحت سرعت شکل‌دهی بالا اشاره کرد، درحالی‌که هیچ تغییر دمایی در سرعت‌های پایین مشاهده نشده است [۲۷]. به علاوه آزمون بر روی تیتانیوم با سرعت‌های پرس 2 mm/s و $2/8 \text{ mm/s}$ تغییرات ناچیزی بر میکرو ساختار این نمونه‌ها پس از یک مرحله را نشان می‌دهد.



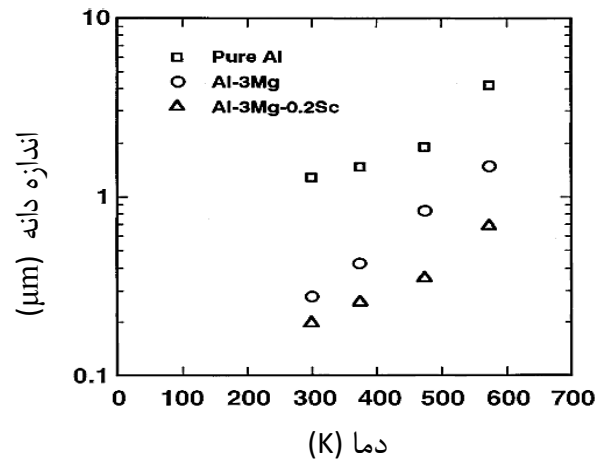
شکل ۱-۱۶ عدم تاثیر سرعت پرس بر تنش تسلیم برای آلیاژ آلومینیم و ۱٪ منیزیم [۲۷]

۱-۱-۱۳ تأثیر دمای فرایند

دمای عملیات از عواملی است که می‌توان در طی فرایند به راحتی کنترل کرد. اولین آزمایش‌های انجام شده بر تأثیر دما روی نمونه‌هایی از آلومینیم خالص، آلیاژ آلومینیم و ۳٪ منیزیم از دمای محیط تا ۳۰۰ °C انجام شده است [۲۸]. به منظور اندازه‌گیری دمای دقیق کانال، در قالب سوراخی افقی در فاصله ۵ mm دیواره کانال در نزدیکی صفحه برش ایجاد شده بود. نمونه‌ها به دو صورت مورد آزمایش قرار گرفتند یکی با قرار دادن نمونه در قالب و نگاه داشتن ۱۰ دقیقه در همان دما و پرس‌کاری و دومین حالت قرار دادن نمونه در کوره و سپس خروج آن و قرار دادن در قالب و انجام عملیات که نتایج بدین شکل به دست آمد:

- مطابق شکل ۱-۱۷ اندازه دانه‌ها با دمای ECAP رابطه مستقیم دارد [۲۸].
- زاویه مرز دانه‌ها با افزایش دما، در اثر بالا رفتن سرعت بازیابی در دمای بالا، افزایش می‌یابد. برای پرس‌کاری تیتانیوم شواهد نشان می‌دهد که مکانیزم تغییر شکل از لغزش روی صفحات متراکم با افزایش دما، به دوقلویی تغییر پیدا می‌کند.

با این همه نتایج نشان می‌دهد که ECAP مواد در دمای بالا آسان‌تر است، اما ساختار دانه‌بندی نمونه‌ها با افزایش دما درشت می‌شود بنابراین باید پایین‌ترین حد بهینه دما برای گرفتن بهترین نتیجه رعایت شود.



شکل ۱۷-۱ تأثیر دمای فرایند ECAP بر اندازه دانه‌ها [۲۸]

۱-۱-۱۴ نقش گرم شدن داخلی در حین فرایند ECAP

گرم شدن داخلی که در اثر سرعت حرکت پرس و به دلیل اصطکاک بین دیواره‌های کانال و نمونه ایجاد می‌شود، معمولاً بین $11-15^{\circ}\text{C}$ می‌باشد [۲۷].

محدودیت‌های روش ECAP

در انجام فرایند ECAP دو محدودیت عمده وجود دارد:

۱- برای وادار کردن نمونه به سیلان در مجاری قالب ECAP نیاز به اعمال نیروی فشاری زیادی است که ممکن است در این شرایط سنبه و قالب هر دو دچار شکست شوند و یا اینکه فقط سنبه کماتش کرده و بشکنند.

۲- همچنین برنامه شبیه‌سازی المان محدود در مورد تحلیل نحوه سیلان فلز در داخل قالب ECAP نشان داده است که در مورد فلزاتی که شکل‌پذیری پایینی دارند، احتمال پر نشدن گوشه‌های قالب وجود دارد.

برای غلبه بر مشکلات فوق، دو راه حل عمده پیشنهاد شده است:

۱- از قالب‌هایی با زاویه φ بزرگ‌تر استفاده شود که در این صورت برای دست یافتن به کرنش‌های بالاتر، باید دفعات عبور دادن نمونه از قالب بیشتر شود.

۲- در سطح بیرونی محل تقاطع دو کانال قالب، زاویه ψ ایجاد شود. البته باید توجه شود که با افزایش زاویه قالب اگرچه مشکلات مربوط به انجام ECAP کاهش پیدا می‌کند اما امکان دستیابی به ساختار

UFG مشکل تر می‌شود. به عبارت دیگر با کاهش زاویه قالب به کمتر از 90° ، میزان کرنش اعمالی در هر مرحله از تغییر شکل بیشتر شده و می‌توان به طور موفقیت‌آمیزی به ساختار UFG دست یافت.

۲-۱- معرفی ماده‌ی مورد تحقیق و خواص آن

زیرکونیوم توسط مارتین هنریچ کلاپروت، شیمیدان آلمانی در ۱۷۸۹ کشف شد. وی این عنصر را از آنالیز ترکیب جارگون ($ZrSiO_4$) به دست آورد. این عنصر در سال ۱۸۲۴ توسط یک شیمیدان سوئدی به نام جاکوب برزیلس جدا شد و عاقبت در سال ۱۹۱۴ خالص‌سازی شد.

به دست آوردن زیرکونیوم خالص بسیار سخت است چون این عنصر از نظر شیمیایی کاملاً مشابه هافنیم می‌باشد. امروزه بیش‌ترین مقدار زیرکونیوم از تصفیه زیرکون ($ZrSiO_4$) و بادلیت (ZrO_2) از روش کرول به دست می‌آید. جدول ۱-۱ خواص فیزیکی، شیمیایی و اتمی زیرکونیوم را نمایش می‌دهد.

جدول ۱-۱ خواص زیرکونیوم

خواص اتمی، فیزیکی و شیمیایی زیرکونیوم	
عدد اتمی	۴۰
جرم اتمی	۹۱/۲۲
نقطه ذوب	$1852^\circ C$
نقطه جوش	$4400^\circ C$
ساختار بلوری	HCP
رنگ	سفید خاکستری
حالت استاندارد	جامد
چگالی	$6/49 \text{ g/cm}^3$

زیرکونیوم، فلزی به رنگ سفید-طوسی و درخشان است. این ماده سبک‌تر از فولاد بوده و سختی آن شبیه به مس است. این عنصر وقتی به ذرات ریز تقسیم شود، به سرعت در هوا مشتعل می‌شود، مشتعل کردن این فلز در حالت جامد بسیار دشوار است. فلز زیرکونیوم در دمای پایین‌تر از 35 K خاصیت آهنربایی پیدا می‌کند.

این فلز با ساختار کریستالی hcp مقاومت بالایی در برابر خوردگی دارد و می‌تواند به طور وسیعی در صنایع استفاده شود، اما به دلیل استحکام و سختی اولیه کم کاربرد چندانی ندارد. به همین دلیل می‌توان با ECAP به ساختارهای UFG در این فلز دست یافت که علاوه بر استحکام و سختی بالا اندازه دانه در آن‌ها به شدت کاهش یافته است. زیرکونیوم در ابزارهای جراحی، کاشتنی‌های پزشکی، مبدل‌های حرارتی به دلیل قابلیت تحمل دماهای بالا کاربرد فراوانی دارد. همچنین به دلیل قدرت کم در جذب نوترون‌ها از زیرکونیوم در ساخت میله‌های سوخت در نیروگاه‌های هسته‌ای استفاده می‌شود. آلیاژ زیرکونیوم و نیوبیوم، خاصیت ابررسانایی در دماهای پایین را برای زیرکونیوم در بر دارد که برای ساختن آهن‌رباهای بسیار قوی توسط نیروی الکتریکی در مقیاس زیاد استفاده می‌شود.

۱-۳- پیشینه‌ی تحقیق

لی و کیم [۲۹] در سال ۲۰۰۶ مطالعه‌ای بر روی ساختار و خواص مکانیکی زیرکونیوم خالص تجاری Zr-702 انجام دادند. آن‌ها زیرکونیوم با اندازه دانه اولیه $40 \mu\text{m}$ را در دمای محیط تحت مسیر Bc، چهار مرحله تحت ECAP قراردادند. پس از انجام فرایند اندازه دانه به 500 nm کاهش یافته بود. قالب مورد استفاده در این فرایند با زاویه کانال 135° و زاویه انحنای بیرونی محل تقاطع 45° ساخته شده بود. روان کار مورد استفاده در این فرایند از نوع MoS_2 بوده و فرایند با سرعت رم پرس 0.85 mm/s انجام شد، پس از انجام فرایند تنش تسلیم از میزان اولیه 250 MPa به 350 MPa افزایش یافته بود درحالی‌که ازدیاد طول با کاهش همراه بود.

کائو و همکاران [۳۰] در سال ۲۰۰۶ زیرکونیوم خالص تجاری را تحت مسیر A طی هشت مرحله ECAP کردند، در این فرایند از قالبی با زاویه کانال 90° و زاویه انحنای بیرونی 20° استفاده شده بود و فرایند در دمای 350°C با سرعت پرس 2 mm/s انجام شد. پس از هشت مرحله مداوم اندازه دانه از مقدار اولیه $1 \mu\text{m}$ به حدود 250 nm رسیده بود و تنش تسلیم از 404 MPa با افزایش 85% به 740 MPa رسیده بود درحالی‌که درصد ازدیاد طول از مقدار اولیه 30% در نهایت به 20% کاهش یافته بود. همچنین سختی نمونه‌ها از 155 HV پس از ۸ مرحله به 214 HV افزایش یافته بود.

ژائو و همکاران [۳۱] در سال ۲۰۱۰ تیتانیوم خالص تجاری را طی هشت مرحله در دمای محیط در قالبی با زاویه کانال 120° و زاویه انحنای بیرونی 20° تحت فرایند ECAP قراردادند. پس از هشت مرحله اندازه دانه‌ها از $23 \mu\text{m}$ به حدود 200 nm کاهش یافته بود و افزایش چشمگیری در تنش تسلیم و استحکام کششی

نمونه‌ها اتفاق افتاده بود. در این فرایند سرعت پرس ۲ mm/s بوده و از روان کاری شامل MoS₂ ۱۵٪ و ۸۵٪ پودر گرافیت استفاده شده بود. میزان سختی اولیه نمونه‌ها ۱۵۹ HV بوده که پس از هشت مرحله این مقدار به ۲۶۴ HV رسیده بود و تنش تسلیم از ۲۷۵ MPa به حدود ۷۱۰ MPa افزایش یافته بود درحالی‌که ازدیاد طول از ۳۵٪ به ۱۹٪ کاهش یافته بود.

ترنت و همکاران [۳۲] در سال ۲۰۱۱، ECAP آلیاژ زیرکونیوم و نیوبیوم Zr-2.5%Nb را مورد مطالعه قرار دادند. ابتدا ماده خام اولیه را در دمای ۳۵۰ °C به مدت یک ساعت تحت عملیات آنیلینگ قرار داده و سپس در قالبی با زاویه کانال ۹۰° و در دمای ۴۲۰ °C نمونه‌ها را طی شش مرحله تحت فرایند ECAP با سرعت پرس ۰/۴ mm/s در مسیر B قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند اندازه دانه‌ها از ۵ μm به ۱۰۰ nm کاهش یافته است و میزان تنش تسلیم از ۴۵۰ MPa به ۷۵۰ MPa رسیده است.

یوژانگ و همکاران [۳۳] در سال ۲۰۱۱ تیتانیوم خالص تجاری را در قالبی با زاویه کانال ۱۳۵° در دمای محیط با دو سرعت ۰/۵ mm/s و ۰/۰۵ mm/s تحت عملیات ECAP قرار دادند، به این صورت که ابتدا نمونه‌ها برای دو ساعت در دمای ۷۲۰ °C تحت آنیل قرار گرفته و سپس تحت مسیر Bc و با استفاده از روان کار MoS₂ پرس کاری شدند. پس از انجام فرایند اندازه اولیه دانه‌ها که پس از آنیل ۱۰ μm بود به ۱۰۰ nm کاهش یافته بود و سختی اولیه از ۱۷۰ HV پس از دو مرحله به ۲۴۵ HV رسیده بود، تنش تسلیم نمونه پس از آنیل ۶۰۰ MPa بوده که پس از دو مرحله به ۷۵۰ MPa رسیده بود. نتایج نشان می‌داد که در سرعت‌های پرس پایین‌تر خواص بهتری حاصل می‌شود.

نیکولین و همکاران [۳۴] در سال ۲۰۱۵ مطالعه بر روی ساختار، ترکیب فازها و خصوصیات مکانیکی آلیاژ زیرکونیوم Zr-2.5%Nb را در دماهای مختلف انجام دادند. هر نمونه طی دو عبور در دماهای مختلف قرار گرفت و مشخص شد که با افزایش دما اندازه نهایی دانه‌ها نیز افزایش می‌یابد. با عملیات آنیلینگ دانه رشد کرده درحالی‌که میزان نابجایی‌ها به همان تعداد باقی مانده است. همچنین مشخص شد که با افزایش دما در حین اجرای فرایند تنش تسلیم کاهش می‌یابد اما بر درصد ازدیاد طول افزوده می‌شود.

۱-۴- اهداف پژوهشی و مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

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 SPD به نحوی طراحی شده‌اند که ابعاد نمونه حین فرایند تغییر نکند. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که این فرایندها، 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 تولیدشده با روش‌های مذکور، به نظر می‌رسد روش SPD یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای تولید مواد فلزی با اندازه دانه نانومتری در مقیاس صنعتی می‌باشد.

از نوآوری‌های این پایان‌نامه می‌توان به تحلیل تنش‌های اعمالی و در نهایت طراحی قالب با ابعاد بهینه اشاره کرد. در این پژوهش با ایجاد تغییر شکل مومسان شدید به واسطه عبور از کانال‌های همسان زاویه‌دار تلاش بر این داریم که یک ساختار ریزدانه با استحکام بالا از آلیاژ زیرکونیوم، نیوبیوم ایجاد شود. سپس با انجام آزمون کشش و اندازه‌گیری میکرو سختی نمونه‌های ECAP شده در هر مرحله، تغییرات ایجاد شده در تنش تسلیم و سختی آن‌ها بررسی می‌شود.

پایان‌نامه پیش‌رو شامل چهار فصل است. در فصل دوم به تحلیل قالب از نظر تنش‌های اعمالی، طراحی و ساخت آن پرداخته شده است. همچنین روش انجام فرایند ECAP و آماده‌سازی نمونه‌های آزمون کشش، سختی و متالوگرافی بیان شده است. در فصل سوم نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمون‌های مختلف آمده است. در فصل چهارم نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای ادامه کار آمده است.

فصل ۲ طراحی قالب ECAP، مواد و آزمایش‌های تجربی

در این فصل طراحی قالب، مواد اولیه، روش آزمایش، ماشین‌آلات و تجهیزات مورد استفاده جهت اجرای فرایند و آماده سازی نمونه‌ها بیان شده است.

۲-۱- طراحی قالب

اولین قدم در طراحی قالب پاسخ به پرسش‌های زیر است:

- ابعاد قطعه‌ای که باید تحت ECAP قرار گیرد چقدر است؟
- خط جدایش قالب در چه قسمتی باشد؟
- آلیاژ مورد استفاده برای هر یک از اجزای قالب چیست و بایستی تحت چه عملیاتی قرار گیرند؟
- فرایند ساخت قالب نیاز به چه تجهیزاتی دارد؟

پس از پاسخ به پرسش‌های فوق باید طرح اولیه قالب پیاده سازی شود. قالب‌های متداول ECAP از دو صفحه که سطوح آن‌ها ماشینکاری و مسیر فرایند بین آن دو ایجاد شده است، مطابق شکل ۲-۱ تشکیل می‌شوند.



شکل ۱-۲ قالب متداول ECAP [۳۵]

به دلیل اینکه این گونه قالب‌ها به وسیله پیچ و پین‌هایی موقعیت‌دهی و بسته می‌شوند، در هنگام گیر کردن قطعه داخل قالب احتیاج به باز کردن تمامی پیچ‌ها، خارج کردن قطعه و تنظیم دوباره قالب است، که تمامی این مراحل باعث از بین رفتن زمان خواهد شد. از طرفی چون خط جدایش دو نیمه قالب در امتداد محور طولی قطعه قرار گرفته است، نیروهای شعاعی وارده از طرف قطعه به قالب باعث افزایش تنش برشی در پیچ‌های اتصال قالب می‌شود. همچنین ماشینکاری مسیر ECAP در این گونه قالب‌ها معمولاً به وسیله ماشین‌های کنترل عددی کامپیوتری و برای مقاطع دایره‌ای با استفاده از ابزارهای سر کروی انجام می‌شود که مستلزم هزینه‌ی بالای تولید می‌باشد.

به علت محدودیت‌های فوق‌الذکر طراحی جدید برای قالب ECAP در نظر گرفته شد که تا حدودی از مشکلات ایجاد شده در حین ساخت و انجام آزمایش جلوگیری شود. با توجه به این نکته که میزان کرنش اعمالی در هر مرحله به زاویه بین دو کانال وابسته است، طراحی قالب به گونه‌ای انجام می‌شود که بتوان در هر مرحله بیشترین کرنش را به قطعه اعمال کرد تا علاوه بر کاهش هزینه‌های ساخت، قالب دچار شکست نشود. بنابراین زاویه بین دو کانال $\varphi=90^\circ$ در نظر گرفته شد. به دلیل انتخاب این زاویه بین کانال‌ها، بهترین محل جدایش دو نیمه قالب از هم تقاطع بین دو کانال افقی و عمودی در نظر گرفته شد. در صورت گیر کردن قطعه در قالب با باز کردن نیمه پائینی قالب و اعمال نیرو از بالا قطعه خارج می‌شود، همچنین به دلیل قابلیت تحمل تنش‌های شعاعی بیشتر نیمه بالایی قالب به صورت استوانه‌ای یکپارچه ساخته شد و قسمت مرکزی آن که کانال افقی را در بر دارد به صورت جازدنی ساخته شد، که از جمله مزایای این طرح می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- در هنگام آسیب دیدن کانال افقی با هزینه اندک می‌توان نسبت به تعویض آن اقدام نمود.
 - چون بیشترین تماس قطعه با جداره داخلی قالب است این قسمت با سایش بالایی روبرو خواهد بود به همین دلیل باید این قسمت از قالب سخت‌کاری شود و چون فولادهایی با قابلیت سخت‌کاری قیمت بالایی دارند اگر خواسته باشیم تمام نیمه بالایی قالب از این فولادها ساخته شود متحمل هزینه بالایی خواهیم شد.
 - در بر گرفته شدن هسته مرکزی قالب که سخت‌کاری شده است به وسیله حلقه فشاری باعث می‌شود تنش حلقوی فشاری روی سطح داخلی کانال ایجاد شود و در هنگام شکل‌دهی تنش‌های ایجاد شده روی سطح کانال عمودی منجر به شکست نشود.
 - از جمله مزایای دیگر این طرح سادگی ساخت آن به وسیله تجهیزات معمول تراشکاری است که باعث کاهش هزینه‌های تولید خواهد شد.
 - از طرفی چون نیمه بالایی و پائینی قالب به وسیله سه پیچ آلن به یکدیگر متصل می‌شوند زمان تنظیم قالب^۱ به شدت کاهش می‌یابد.
- با در نظر گرفتن موارد اشاره شده طرح اولیه قالب مشخص و در مرحله بعد به تحلیل تنش‌های ایجاد شده در قالب و ابعاد بهینه قالب می‌پردازیم.
- برای بدست آوردن میزان تنش‌های اعمالی به قالب و در نتیجه بهینه سازی ابعاد قالب از نرم‌افزار المان محدود آباکوس^۲ استفاده شد، فرایند تحلیل تنش‌های اعمالی به قالب شامل دو مرحله می‌شود که عبارتند از:

۱- تنش‌های ایجاد شده در اثر انطباق پرسی هسته مرکزی داخل حلقه فشاری

۲- تنش‌های ایجاد شده در حین انجام فرایند ECAP

^۱ Die set up

^۲ Abaqus 6.14-2

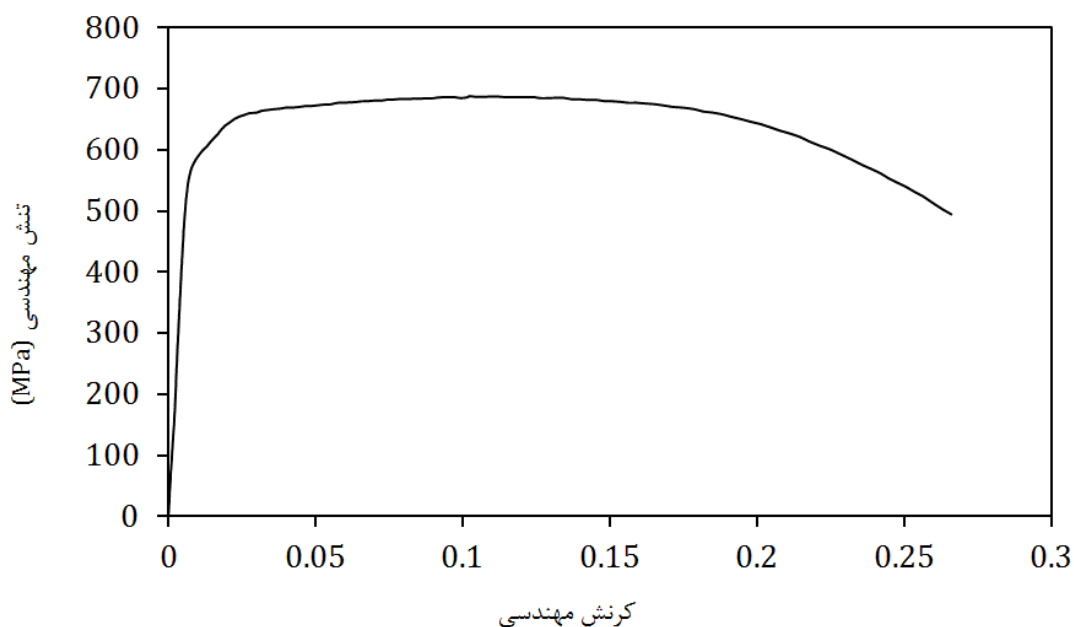
۲-۲- ماده مورد استفاده در آزمون

ماده مورد استفاده در این آزمایش آلیاژ زیرکونیوم و نیوبیوم بوده که عمده درصد وزنی آن را (۰.۹۸/۴) زیرکونیوم، مقدار کمی نیوبیوم (۰.۱/۳۷) و الباقی را عناصری مانند نیکل، سیلیسیوم و تیتانیوم تشکیل می‌دهد، به همین دلیل آن را به عنوان آلیاژ زیرکونیوم-یک درصد نیوبیوم^۱ نیز می‌شناسند.

میل‌گرد مورد استفاده در این آزمایش به روش اکستروژن تولید شده و به منظور همگنی ساختار تحت عملیات آنیلینگ قرار گرفته است. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و منحنی تنش-کرنش مهندسی Zr-1%Nb در جدول ۱-۲ و شکل ۲-۲ نشان داده شده است.

جدول ۱-۲- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی Zr-1%Nb

ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (GPa)	چگالی (kg/m ³)
۰/۳۴	۵۷۰	۹۴/۵	۶۵۳۰



شکل ۲-۲- منحنی تنش-کرنش مهندسی آلیاژ Zr-1%Nb

جدول ۲-۲ ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده در این فرایند را نشان می دهد.

جدول ۲-۲ ترکیب شیمیایی آلیاژ Zr-1%Nb مورد استفاده در فرایند ECAP [۳۶]

شماره	عناصر تشکیل دهنده	درصد وزنی
۱	N	۰/۰۰۴۹
۲	Fe	۰/۰۱۲
۳	Si	۰/۰۲۳
۴	Ni	۰/۰۰۲۴
۵	Ti	۰/۰۵۸
۶	Cl	۰/۰۰۸۶
۷	Nb	۱/۳۷
۸	Zr	۹۸/۴

۲-۳- روش المان محدود و معرفی نرم افزار شبیه سازی

امروزه با توسعه روز افزون قابلیت های نرم افزارهای محاسبات مهندسی، این نرم افزارها تقریباً در تمامی شرکت هایی که محصولات صنعتی تولید می نمایند، چه پیش از ساخت محصول و چه در فرایند توسعه آن، به منظور شبیه سازی عملکرد محصول مورد استفاده قرار می گیرند. این شبیه سازی ها در واحدهایی به نام محاسبات مهندسی یا مهندسی به کمک کامپیوتر انجام می شود. شبیه سازی محصول با کاهش تعداد آزمایش ها و تست هایی که بر روی نمونه ها انجام می شود، سبب کاهش هزینه تولید و توسعه محصول نهایی می شود. آباکوس قابلیت حل مسایل از تحلیل خطی ساده تا پیچیده ترین مدل سازی غیر خطی را دارا می باشد. آباکوس شامل سه محصول اصلی است که در زیر به هر کدام اشاره می شود:

۱- **ABAQUS/Standard**: یکی از حل گرهای چند منظوره آباکوس است که از روش انتگرال گیری

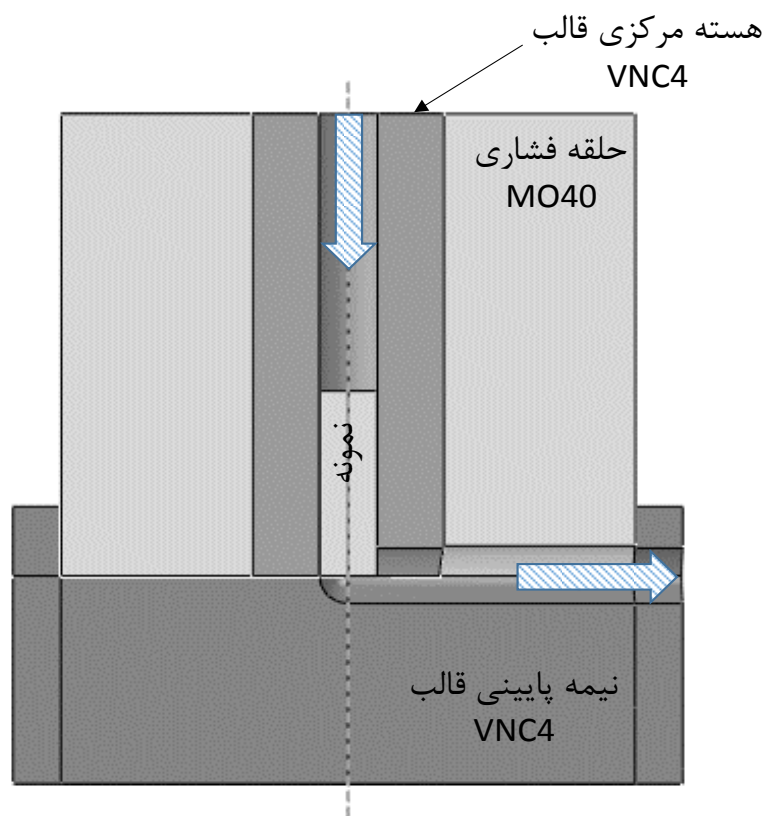
غیر صریح به منظور حل مسایلی نظیر مسایل استاتیکی، تحلیل های مودال و انتقال حرارت استفاده می کند. در حقیقت این حل گر به منظور حل مسایل شبه استاتیکی، مسایلی که اینرسی دارای سهم اندک و قابل صرف نظر هستند، استفاده می شود.

۲- **ABAQUS/Explicit**: در این حل‌گر از روش‌های انتگرال‌گیری صریح برای حل مسایل با درجه غیر خطی بالا که می‌توانند در خود دارای اندرکنش‌های تماسی پیچیده و بارهای گذرا باشند، استفاده می‌شود.

۳- **ABAQUS/CAE**: از آن برای مدل‌سازی اجزای مکانیکی و مجموعه‌های مونتاژی و نشان دادن نتایج تحلیل المان محدود استفاده می‌شود.

۲-۳-۱ ایجاد مدل هندسی

در این پژوهش از مدل سه بعدی اجزای قالب استفاده شد. به دلیل تقارن صفحه‌ای اجزای قالب، نیمی از قالب مدل شد. تمامی اجزای قالب از نوع شکل پذیر انتخاب شد. در شبیه‌سازی ابعاد نمونه برابر اندازه واقعی یعنی طول ۴۰ mm و قطر ۱۲ mm انتخاب شد. در شکل ۲-۳ مدل اجزای قالب نشان داده شده است.



شکل ۲-۳ مدل ترسیم شده اجزای قالب

۲-۳-۲ تعیین خصوصیات ماده خام و اجزای قالب

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه و اجزای قالب شامل چگالی، مدول یانگ، تنش تسلیم و ضریب پواسون مطابق جدول ۲-۳ انتخاب شد. برای بررسی کارایی قالب تنش تسلیم نمونه به صورت عمدی حدود دو برابر مقدار واقعی آن در نظر گرفته شد.

جدول ۲-۳ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه و قالب

ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (GPa)	چگالی (kg/m ³)	
۰/۳۴	۱۰۰۰	۹۴	۶۵۳۰	نمونه
۰/۳	۲۰۰۰	۲۱۰	۷۸۵۰	VNC4
۰/۳	۹۲۰	۲۰۵	۷۸۰۰	M040

۲-۳-۳ تعیین تعداد گام و نوع حل مسئله

تحلیل تنش‌های اعمالی به قالب در دو گام انجام شد. در گام اول مسئله انطباق پرسی هسته مرکزی و حلقه فشاری در آباکوس استاندارد در یک مرحله حل می‌شود. در گام دوم قطعه به اندازه ۳۵ mm به سمت پایین حرکت کرده و شکل‌دهی درون قالب با استفاده از حل گر صریح، در زمان ۰/۰۲ ثانیه انجام می‌شود. در حل این مسئله ضریب اصطکاک کلمبی معادل ۰/۱۵ در نظر گرفته شد.

۲-۳-۴ شبکه بندی

نوع المان‌ها باید به صورتی در نظر گرفته شود که در کتابخانه هر دو نوع حل گر استاندارد و صریح نرم‌افزار موجود باشد، به همین دلیل در این تحلیل المان‌ها از نوع C3D8R^۱ که یک المان سه بعدی هشت گره‌ای با انتگرال کاهش یافته است مشخص می‌شود.

۲-۴-۲ قالب ECAP

به منظور انجام پرس کاری در کانال‌های همسان زاویه‌دار احتیاج به قالبی برای انجام فرایند است، که هم بتواند تنش‌های اعمالی در حین اجرای عملیات را تحمل نماید و هم از مقاومت بالایی در برابر سایش برخوردار باشد

^۱ Continuum, 3D, 8node, reduced integration

تا پس از چندین مرحله شکل دهی مداوم مستهلک نشود. قالب ساخته شده از مقاومت بالایی برخوردار است بطوری که پس از چندین مرحله شکل دهی آلیاژهای مختلف در دماهای بالا مشکل عمده‌ای در آن ایجاد نشد. در هنگام سوار کردن اجزای قالب که توسط سه پیچ آلن ۱۲ انجام می‌شود ابتدا یک سنبه با قطر ۱۲ mm را داخل کانال افقی قرار داده تا دو نیمه قالب نسبت به هم جفت شوند سپس پیچ‌ها در جای خود محکم شده و دو نیمه نسبت به هم ثابت می‌شوند.



شکل ۲-۴ قالب، المان‌های حرارتی و مدار کنترل دمای فرایند.

۲-۵- اجرای ECAP

برای اعمال نیروی یکنواخت شکل دهی در فرایند ECAP از پرس‌های هیدرولیک با قابلیت تنظیم سرعت رم، به منظور تغییر در نرخ کرنش اعمالی استفاده می‌شود. برای تأمین نیروی مورد نیاز فرایند از یک دستگاه پرس هیدرولیک ژاوا آریا^۱ با ظرفیت اسمی ۱۵۰ تن که در آن چهار میل راهنما مطابق شکل ۲-۵ به منظور هم راستایی فک بالا و پایین به کار برده شده است استفاده شد.

برای انجام فرایند ابتدا قالب را روی قسمت پایینی پرس به وسیله روبنده‌ها محکم کرده و سپس سنبه را داخل کانال عمودی قالب قرار می‌دهیم، با حرکت سینه پرس به سمت بالا سنبه را به سنبه گیر نزدیک کرده و پس از در یک امتداد قرار گرفتن سنبه و کانال عمودی سنبه گیر را سفت می‌کنیم.

^۱ Jav Aria



شکل ۲-۵ پرس هیدرولیک ۱۵۰ تن ژاو آریا

برای افزایش دمای فرایند از شش المان حرارتی که داخل حلقه فشاری جا زده می‌شوند، استفاده شد. با روشن شدن مدار کنترلی المان‌های حرارتی، پس از گذشت دو ساعت دمای قالب به 200°C رسید. برای جلوگیری از افزایش یا کاهش بیش از حد دما از یک ترموکوپل که به مدار کنترل متصل شده و در هر لحظه دمای قالب را اندازه‌گیری می‌کند استفاده شد. در صورت کم بودن دما با روشن شدن المان‌ها دما افزایش یافته و در صورت زیاد بودن، با خاموش شدن آن‌ها دما ثابت نگه داشته می‌شود. برای جلوگیری از انتقال حرارت بین قالب و سینه پرس از صفحه‌ای با جنس میکا که در شکل ۲-۴ نشان داده شده استفاده شد.

حال که دمای فرایند به حد مطلوب رسید و قالب و سنبه در یک امتداد قرار گرفتند با حرکت به سمت پایین پرس قالب را از سنبه دور می‌کنیم تا فضای کافی برای قرار دادن نمونه در کانال ورودی ایجاد شود. قطر اولیه نمونه 14 mm بوده که به وسیله ماشینکاری به 12 mm رسید. به منظور اینکه اندازه نمونه‌ها برای ایجاد نمونه آزمون کشش کافی باشد آن‌ها را عمود بر محور طولی‌شان با اندازه 100 mm برش داده و پس از مسطح کردن ابتدا و انتهای آن‌ها، آماده قرارگیری در قالب می‌شوند.

در این مرحله نمونه‌های ماشین‌کاری شده را درون یک فویل مسی با ضخامت 0.5 mm که به عنوان روان‌کار فلزی استفاده می‌شود، پیچیده و پس از آغشته کردن سر نمونه‌ها به گریس مولی اسلیپ^۱ که به منظور کاهش

^۱ Moly Slip EHT

اصطکاک در دمای بالا طراحی شده است، آن‌ها را در کانال ورودی قالب قرار می‌دهیم، شکل ۲-۶ گریس مورد استفاده در فرایند را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۶ گریس مورد استفاده در فرایند

فرایند با سرعت رم پرس 0.35 mm/s آغاز شد و این نرخ تقریباً در تمام فرایند ثابت ماند. خارج کردن اولین نمونه به وسیله ورود دومین نمونه و اعمال نیرو به نمونه اولیه انجام می‌شود. پس از خروج اولین نمونه دوباره مراحل پیچیدن فویل مسی و آغشته سازی آن به گریس انجام می‌شود و با چرخش 90° درجه‌ای در امتداد محور طولی دوباره برای مرحله دوم وارد قالب می‌شود، پس از پایان هر مرحله نمونه‌ها از نظر ایجاد ترک کنترل می‌شود تا در صورت معیوب شدن اجرای فرایند متوقف و چاره‌ای اندیشیده شود. روند عبور نمونه از داخل قالب تا ۸ مرحله تحت مسیر BC که بهترین مسیر از نظر افزایش خواص مکانیکی است ادامه می‌یابد. نیروی شکل‌دهی در اولین مرحله از ۸ تن آغاز و در هشتمین مرحله به ۱۱ تن رسید.

۲-۵-۱ آماده سازی نمونه‌های سختی سنجی

برای اندازه‌گیری میکروسختی نمونه‌ها باید سطح آن‌ها کاملاً صاف، صیقلی و شبه‌آینه‌ای باشد، که این موارد به وسیله پولیش نمونه‌ها انجام می‌شود. برای پولیش نمونه‌ها در صورتی که امکان گرفتن آن‌ها با دست مهیا باشد احتیاجی به مانت کردن آن‌ها نیست، اما در صورت کوچک بودن باید مانت شوند، در این آزمایش نمونه‌ها به وسیله مقاطع تفلونی که با کف تراشی دو سطح آن‌ها کاملاً موازی شده بود، در جای خود ثابت شدند و نمونه‌ای که امکان قرارگیری آن در این مقاطع وجود نداشت مانت سرد شد، به این صورت که نمونه را داخل یک لوله پلاستیکی که به وسیله گریس چرب شده بود قرار داده و ماده مانت (نسبت ۱ به ۲ از سخت کننده و رزین) را روی نمونه ریخته، پس از ۱۰-۱۲ ساعت نمونه مانت شد. شکل ۲-۷ نمونه‌های مانت شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۷ نمونه‌های مانت شده

پس از ثابت کردن نمونه‌ها به وسیله دستگاه پولیش نشان داده شده در شکل ۲-۸ عملیات پولیش نمونه‌ها آغاز شد، به این صورت که ابتدا به وسیله سنباده‌های ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰ سطح نمونه‌ها پرداخت شد، البته در حین مراحل سنباده زنی سطح نمونه و سنباده‌ها به وسیله جریان آب از ذرات جدا شده تمیز می‌شد. پس از پایان سنباده زنی عملیات پولیش کاری با خمیر آلومینا انجام شد که پس از این مرحله سطح نمونه‌ها کاملاً پرداخت شده بود.

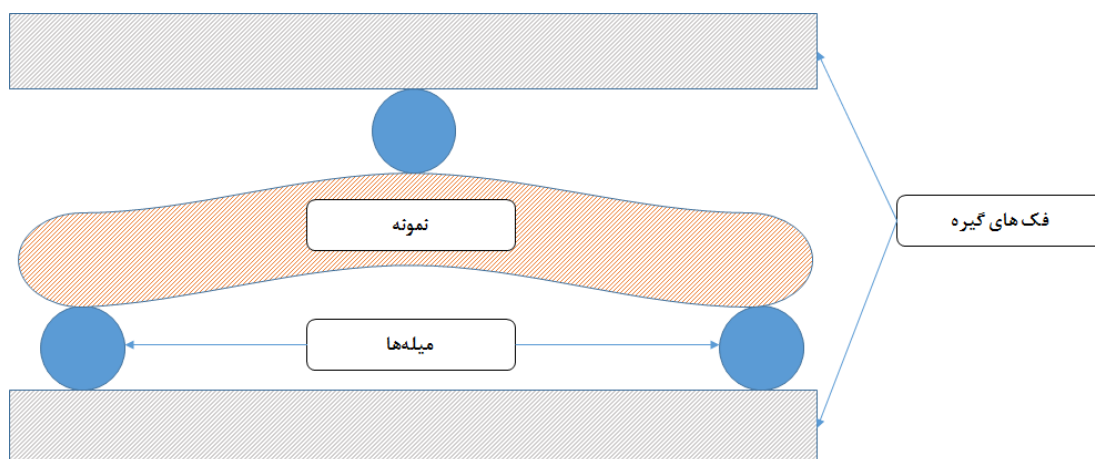


شکل ۲-۸ دستگاه پولیش متکو

۲-۵-۲ آماده سازی نمونه‌های آزمون کشش

برای به دست آوردن نمودارهای تنش، کرنش و استحکام ماده، نمونه‌ها بایستی تحت آزمون کشش قرار گیرند. برای آماده سازی نمونه‌های آزمون کشش ابتدا باید آن‌ها را تاب‌گیری کرد که در شکل ۲-۹ به صورت شماتیک نمایش داده شده است. روند کار به این صورت است که بین نمونه و فک‌های گیره سه عدد میله تقریباً هم قطر نمونه قرار داده و شروع به سفت کردن گیره و در نتیجه اعمال نیرو از طریق فک‌ها به میله‌ها و سپس صاف کردن نمونه می‌کنیم، البته باید توجه داشت که به دلیل برگشت فنری^۱ جابجایی نمونه بیش از حد معمول باشد.

^۱ Spring Back



شکل ۲-۹ شماتیک تاب گیری نمونه‌ها

پس از تاب گیری نمونه‌ها به وسیله عملیات ماشین کاری ابعاد آن‌ها را طبق استاندارد ASTM-E8M آماده می‌کنیم. باید توجه داشت در آماده سازی نمونه‌ها دقت فراوانی شود تا شعاع گوشه‌ها و کیفیت سطح ماشین کاری شده در حدود اشاره شده در استاندارد باشد. شکل ۲-۱۰ نمونه آماده شده آزمون کشش را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۱۰ نمونه آماده شده آزمون کشش

۲-۶- اندازه گیری سختی

برای اندازه گیری سختی از دستگاه میکرو سختی سنج باریز^۱ مدل D-89610 استفاده شد. اساس کار این دستگاه به این صورت است که به وسیله یک فرورونده که از نوع هرم مربع القاعده با زاویه رأس 136° است بار ۱ Kg در مدت زمان ۱۰ ثانیه به سطح نمونه اعمال می‌شود، پس از پایان اعمال نیرو، به وسیله میکروسکوپ دستگاه محل اثر اعمال نیرو که از بالا به شکل مربعی است اندازه گیری شده و بر مبنای آن سختی ویکرز نمونه‌ها به دست می‌آید. شکل ۲-۱۱ دستگاه میکرو سختی سنج را نشان می‌دهد.

^۱ Bareiss D-89610



شکل ۲-۱۱ دستگاه اندازه‌گیری میکرو سختی

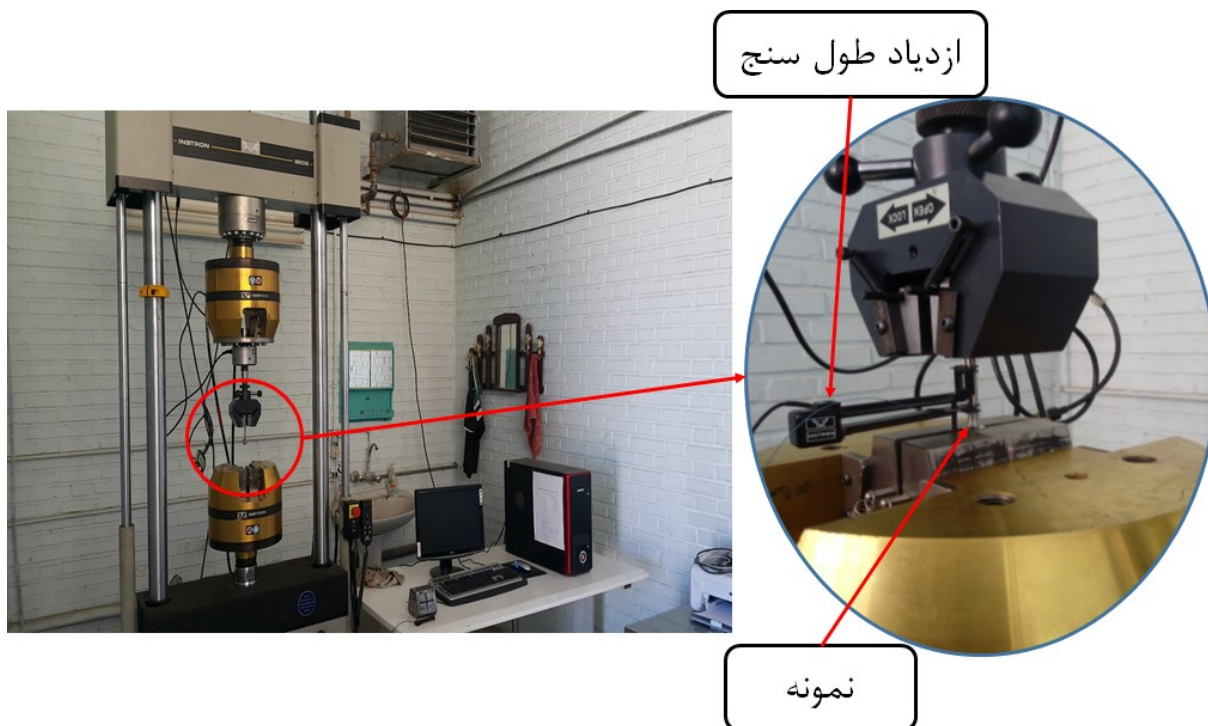
۲-۷- آزمون کشش

برای آزمون کشش^۱ از دستگاه INSTRON 8802 استفاده شد. مطابق شکل ۲-۱۲ این دستگاه دارای دو فک بوده که به فک بالایی آن نیروسنج^۲ متصل است. مکانیزم گرفتن نمونه در یکی از فک‌ها به صورت مکانیکی و در فک دیگر به صورت هیدرولیکی است. پس از بستن نمونه با دور شدن فک‌ها از یکدیگر نمونه کاملاً محکم می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است از دیاد طول سنج^۳ برای اندازه‌گیری تغییرات طول به وسیله دو عدد کشش به نمونه متصل شده است.

^۱ Tensile test

^۲ Load cell

^۳ Extensometer



شکل ۲-۱۲ آزمون کشش با دستگاه اینسترون ۸۸۰۲

پس از انجام اقدامات اولیه دستگاه شروع به اعمال نیرو با نرخ کرنش 0.0025 s^{-1} می‌کند. از طریق رایانه متصل به دستگاه میزان نیروی اعمالی و تغییرات طول در فایل اکسل ذخیره می‌شود که برای به دست آوردن منحنی تنش-کرنش استفاده می‌شود.

۲-۷-۱ آماده سازی نمونه‌های متالوگرافی

معمولاً در نمونه متالوگرافی ساختار دانه‌ها پس از پایان عملیات پرداخت نهایی در زیر میکروسکوپ مشخص نیست. ضخامت مرز دانه‌های یک فلز در بهترین حالت در حد ضخامت چند اتم است درحالی‌که توان آشکار سازی یک میکروسکوپ بسیار کمتر از حد لازم برای تشخیص آنهاست. تنها در فلزی که بلورهای با رنگ‌های مختلف در تماس با یکدیگر باشند، قابل رویت ساختن مرز دانه‌ها امکان‌پذیر است. لذا نمونه‌های متالوگرافی اچ می‌شوند که این عملیات با فروردن سطح نمونه پولیش شده در یک محلول اچ ضعیف اسیدی یا قلیایی انجام می‌شود رایج‌ترین محلول مورد استفاده برای زیرکونیوم محتوی $(10\% \text{HF}, 40\% \text{HNO}_3, 50\% \text{H}_2\text{O})$ است. در بعضی حالات می‌توان عمل اچ را توسط مالش ملایم یک تکه پنبه آغشته به محلول اچ بر روی سطح نمونه انجام داد، به هر حال در نتیجه این عمل مقداری از سطح فلز حل می‌شود و از سطح خارج می‌شود. چنانچه

۱ Hydrofluoric Acid

محلول اچ مورد استفاده مناسب باشد، سطح فلز به صورت یکنواخت حل نمی‌شود. گاهی عامل اچ کننده به مرز دانه‌ها سریع تر از سطح دانه‌ها حمله می‌کند سایر محلول‌های اچ، دانه‌های مختلف را بر اساس جهت‌گیری آن‌ها حل خواهند کرد. پس از اچ کردن، مرزها به صورت پله‌هایی کم عمق در سطح ظاهر می‌شوند جداره‌های عمودی این پله‌ها نور را همانند سطوح بلوری نسبتاً صاف به عدسی‌های شیئی میکروسکوپ منعکس نمی‌کنند و در نتیجه محل مرز دانه‌ها در زیر میکروسکوپ قابل رویت می‌شود. بررسی ساختار نمونه خام به وسیله میکروسکوپ شکل ۲-۱۱ و ساختار نمونه‌های یک و چهار مرحله ECAP شده به دلیل اندازه دانه نانومتری به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۱ TESCANA MIRA3 که در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است انجام شد.



شکل ۲-۱۳ میکروسکوپ FESEM

^۱ Field emission scanning electron microscop (FESEM)

فصل ۳ نتایج و بحث

در این فصل نتایج تنش‌های اعمالی و ابعاد بهینه قالب، متالوگرافی سطح شکست، تعیین اندازه دانه، میکرو سختی و نمودارهای تنش- کرنش نمایش داده شده است. همچنین در مورد نتایج به دست آمده از این آزمون و دیگر موارد بحث شده است.

۳-۱- طراحی قالب

در این قسمت تنش‌های اعمالی به قالب در سه بخش بررسی می‌شود: ابتدا تنش‌های ایجاد شده در اثر انطباق پرسی هسته مرکزی در حلقه فشاری بررسی می‌شود. سپس تنش‌های ایجاد شده به وسیله اعمال فشارهای مختلف روی سطح داخلی قالب و در نهایت صحت نتایج از طریق انجام شکل‌دهی نمونه بررسی شد.

۳-۱-۱ تحلیل تنش‌های ایجاد شده در اثر انطباق پرسی

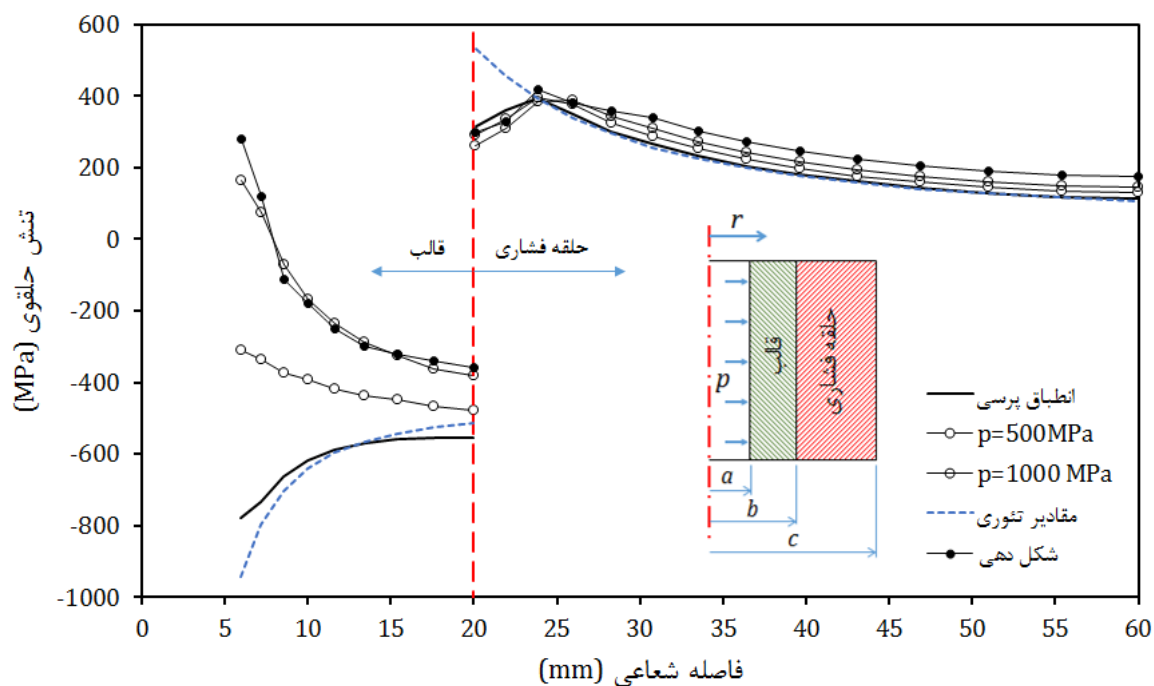
در هنگام شکل‌دهی، اعمال تنش فشاری بالا روی سطح قالب، باعث ایجاد تنش حلقوی σ_{θ} کششی می‌شود. این تنش کششی می‌تواند منجر به شکست ناگهانی قالب شود. از این رو، کانال عمودی قالب به صورت دو تکه با انطباق پرسی طراحی شد. این انطباق پرسی باعث ایجاد تنش حلقوی فشاری نسبتاً بالا روی سطح داخلی قالب و تنش حلقوی کششی در حلقه‌ی فشاری می‌شود. برای دو استوانه‌ی کشسان از جنس یکسان با انطباق پرسی، توزیع تنش حلقوی در استوانه‌ی داخلی و خارجی به ترتیب با معادله‌های (۳-۱) و (۳-۲) بیان می‌شود [۳۷]:

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{2b(c^2 - a^2)} [-p(2a^2b)(1 + \frac{c^2}{r^2}) - eE(c^2 - b^2)(1 + \frac{a^2}{r^2})] \quad (۱-۳)$$

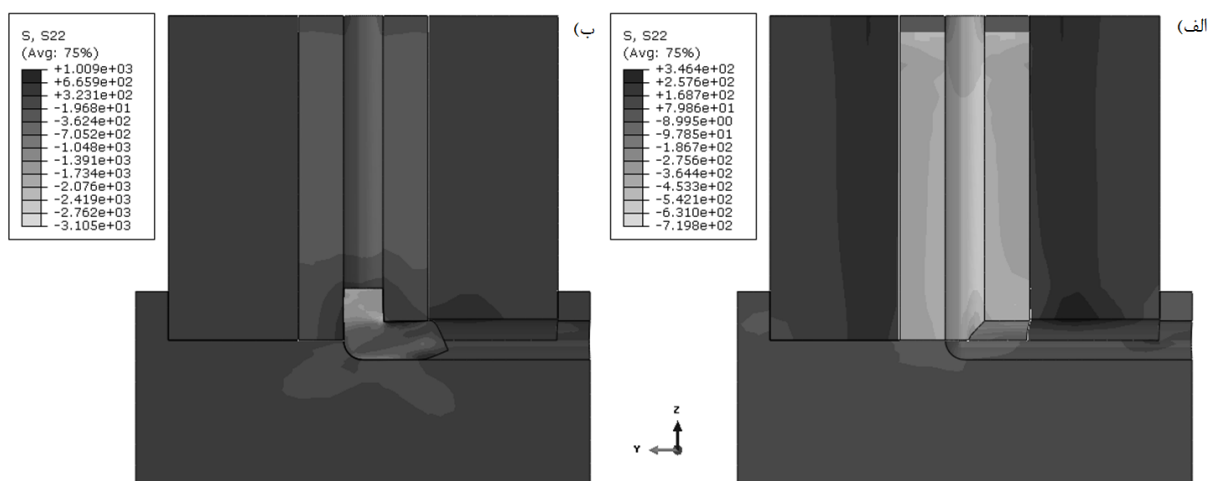
$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{2b(c^2 - a^2)} [-p(2a^2b)(1 + \frac{c^2}{r^2}) + eE(b^2 - a^2)(1 + \frac{c^2}{r^2})] \quad (۲-۳)$$

در ساخت قالب، استوانه داخلی از فولاد ابزار سخت کاری شده 100MnCrW4 با استحکام فشاری ۲۰۰۰ MPa و حلقه‌ی فشاری از فولاد آلیاژی 42CrMo4 در حالت آنیل با تنش تسلیم ۶۳۰ MPa استفاده شد [۳۸]. در قالب طراحی و ساخته شده $a = ۶$ mm، $b = ۲۰$ mm، $c = ۶۰$ mm، $E = ۲۱۰$ GPa و $e = ۰/۱$ mm در نظر گرفته شد.

شکل ۱-۳ نتایج به دست آمده از تحلیل اجزای محدود برای توزیع تنش حلقوی در قالب را نشان می‌دهد. برای مقایسه، منحنی حاصل از معادلات (۱-۳) و (۲-۳) نیز برای مجموعه مونتاژ شده بدون فشار داخلی نشان داده شده است. در نتیجه‌ی انطباق پرسی در نظر گرفته شده، تنش فشاری $\sigma_{\theta} = ۸۰۰$ MPa روی سطح داخلی قالب ایجاد می‌شود. اثر فرایند شکل‌دهی بر روی توزیع تنش حلقوی با اعمال فشار داخلی p شبیه‌سازی شده است. این فشار بسته به جنس ماده شکل‌دهی و پارامترهای قالب تغییر می‌کند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با اعمال فشار $p = ۵۰۰$ MPa، تنش روی سطح همچنان فشاری باقی می‌ماند. با افزایش فشار به $p = ۱۰۰۰$ MPa تنش روی سطح داخلی قالب کششی با مقدار $\sigma_{\theta} = ۲۰۰$ MPa می‌شود. همچنین با افزایش فشار p ، تنش در حلقه‌ی فشاری تغییر قابل توجهی ندارد. برای بررسی صحت نتایج، مقادیر تنش‌های ایجاد شده در اثر شکل‌دهی نیز در نمودار شکل ۱-۳ آمده است که نشان می‌دهد با شروع فرآیند ECAP حداکثر تنش‌های ایجاد شده روی سطح قالب کششی و به میزان $\sigma_{\theta} = ۲۸۰$ MPa خواهد بود و این مقدار تنش منجر به شکست قالب نخواهد شد.



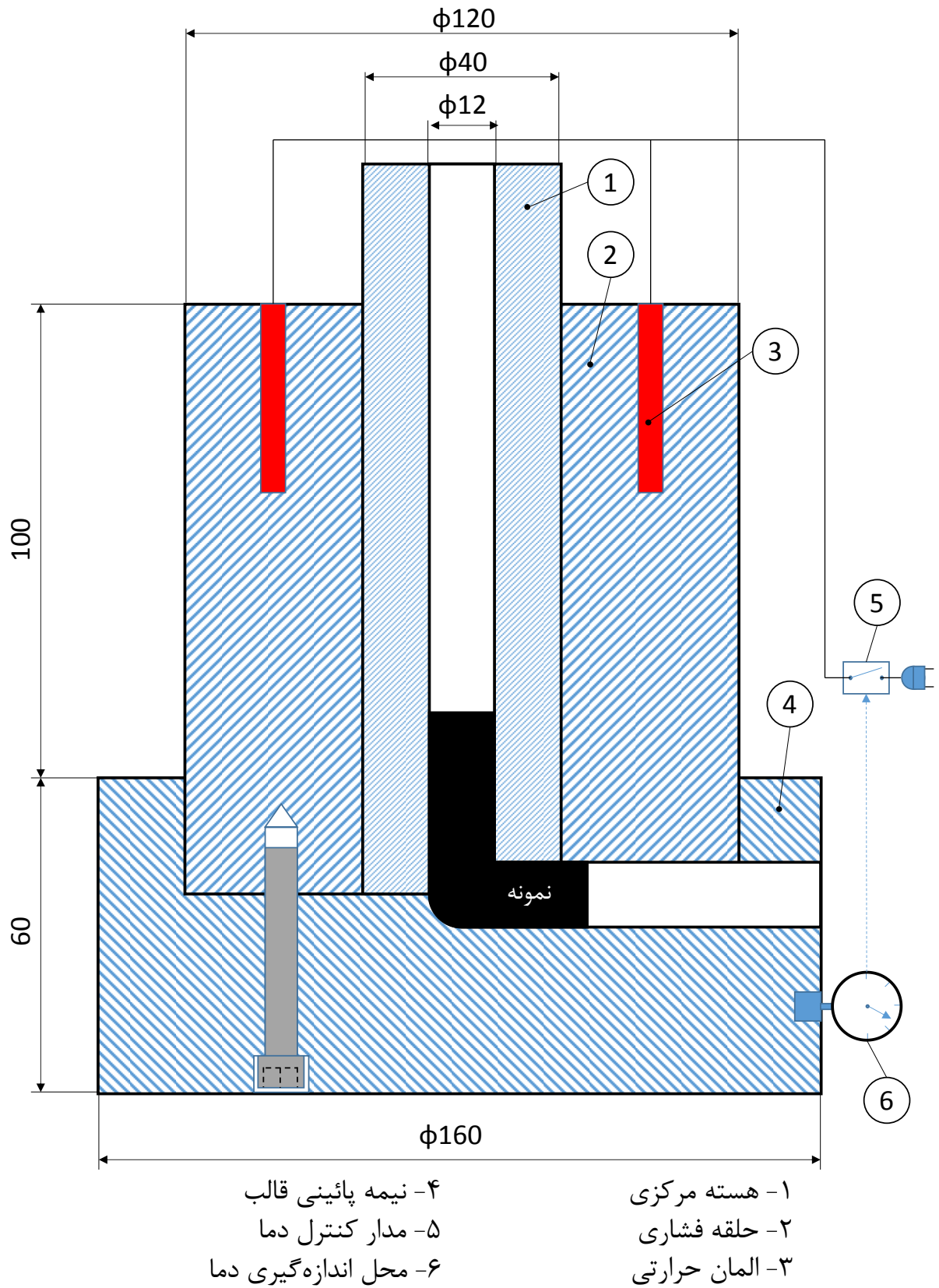
شکل ۱-۳ تنش‌های اعمالی به قالب



شکل ۲-۳ تنش‌های اعمالی به قالب در اثر (الف) انطباق پرسی و (ب) شکل‌دهی

۳-۱-۲ ابعاد بهینه قالب

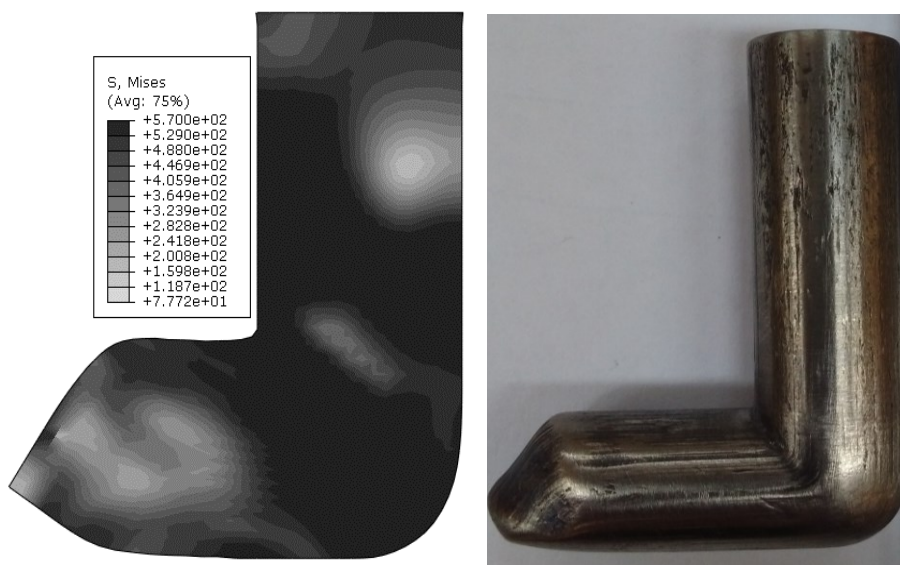
با توجه به تحلیل تنش‌ها ابعاد نشان داده شده در شکل ۳-۳ برای ساخت قالب ارائه شد. برای بهینه کردن ابعاد قالب، ابتدا قالبی با ابعاد بزرگتر از موارد اشاره شده در مراجع انتخاب شد [۳۹]. سپس با توجه به تنش‌های به دست آمده از نمودار شکل ۱-۳ ابعاد قالب کوچک شد تا در نهایت قالبی با ابعاد نشان داده شده در شکل ۳-۳ ساخته شد که ضمن مقاومت در برابر تنش‌های اعمالی از طرف نمونه، از ابعاد بهینه‌ای به منظور عدم افزایش هزینه‌های مواد اولیه در اثر انتخاب ابعاد بزرگ برخوردار است.



شکل ۳-۳ قالب، اندازه‌ها و اجزای تشکیل دهنده آن

۲-۳- نتایج تجربی

در شکل ۳-۵ و ۳-۴ نمونه پس از دو بار عبور از قالب نشان داده شده است. این نمونه پس از اینکه یکبار تحت فرایند ECAP قرار گرفت برای دومین عبور آماده شد و پس از گذشت نیمی از طول نمونه از کانال افقی و منطقه تغییر شکل، نیمه پایینی قالب باز و به وسیله اعمال نیروی پرس از طریق سنبه نمونه از کانال عمودی قالب خارج می‌شود. در شکل ۳-۴ میزان تنش‌ها در نمونه مشخص شده است که حداکثر به میزان 570 MPa است.

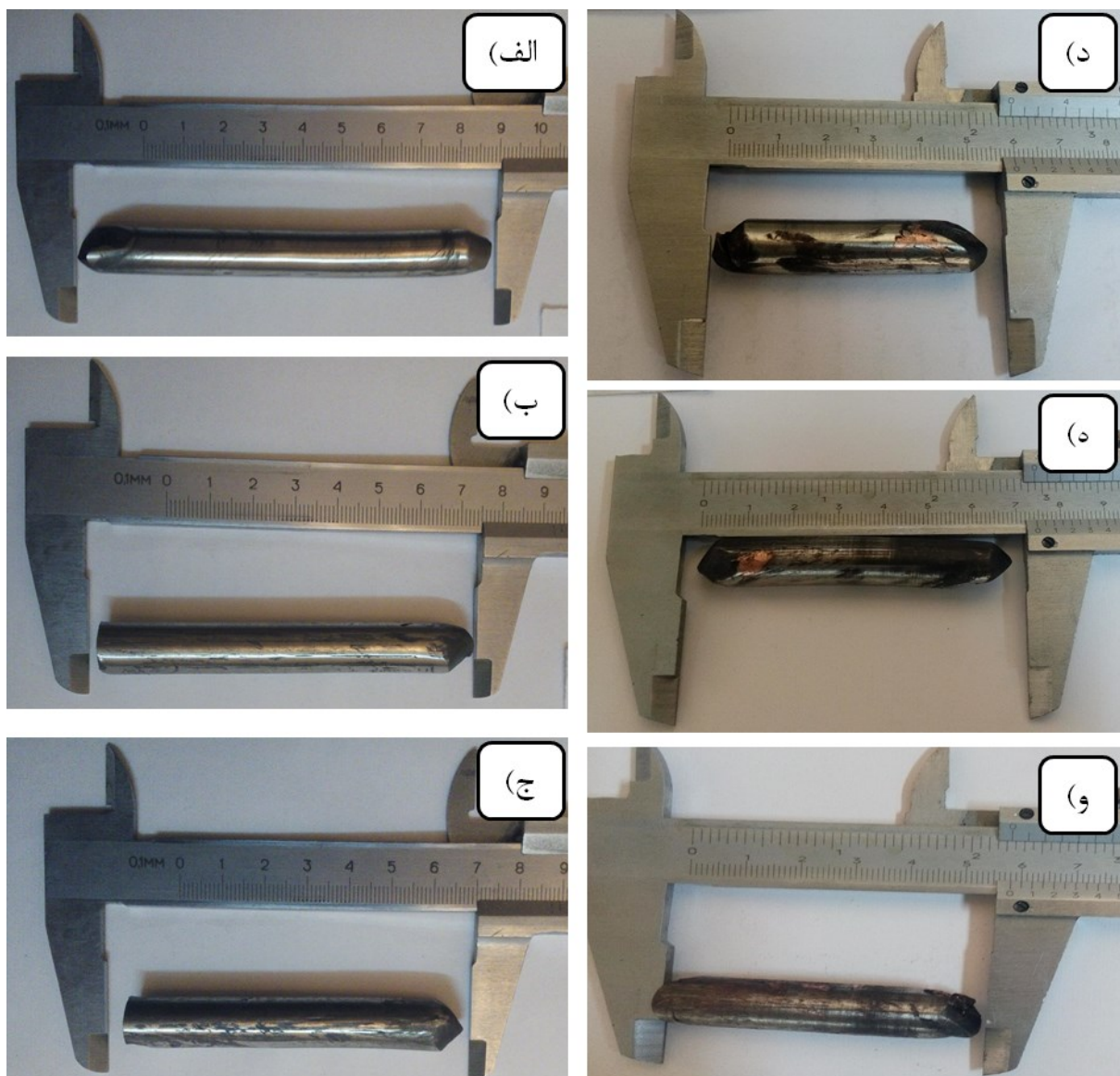


شکل ۳-۴ مقایسه هندسه تغییر شکل در شبیه‌سازی و آزمون تجربی



شکل ۳-۵ نمونه ECAP شده

ECAP نمونه‌ها پس از ۸ مرحله پی‌درپی در دمای 200°C موفقیت‌آمیز بود و با بررسی سطح نمونه‌ها نشانه‌ای مبتنی بر معیوب شدن آن‌ها مشاهده نشد. شکل ۳-۶ نمونه‌ها را پس از هر با خروج از قالب نشان می‌دهد.

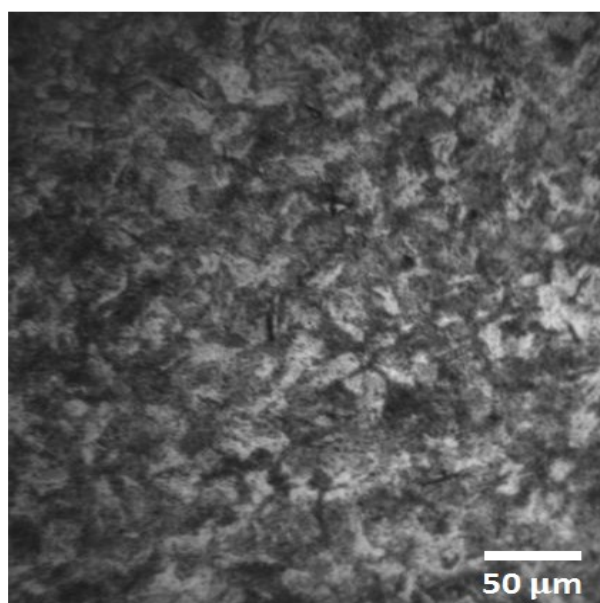


شکل ۳-۶ نمونه‌های خروجی از قالب پس از الف) یک، ب) سه، ج) پنج، د) شش، ه) هفت و و) هشت مرحله ECAP

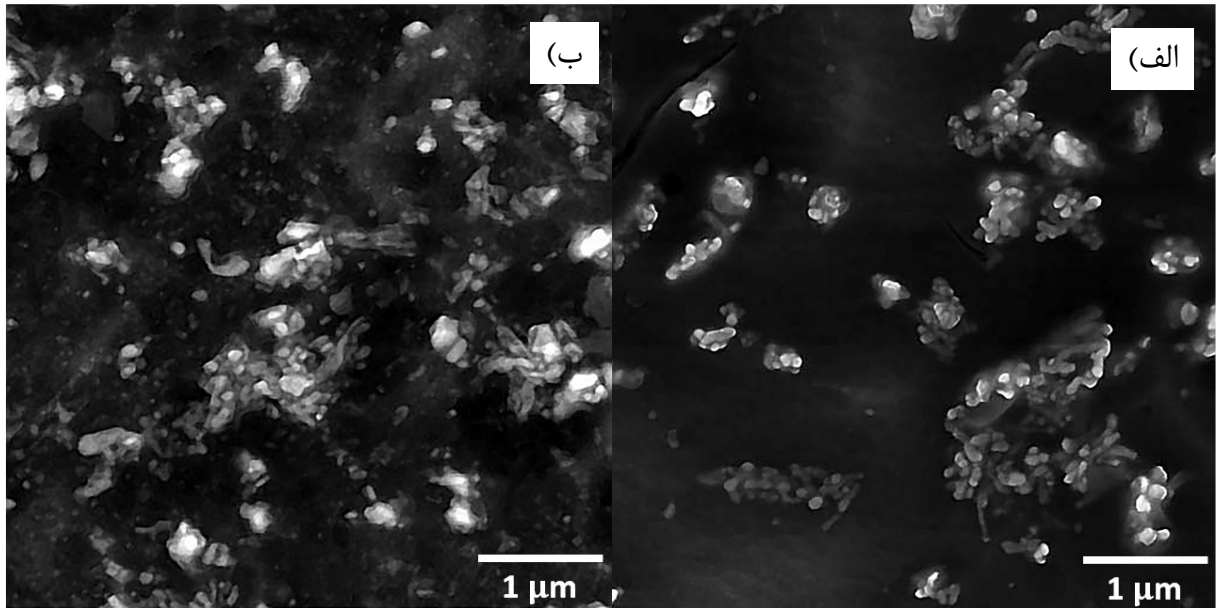
۳-۲-۱ متالوگرافی ماده

به منظور مشخص نمودن تأثیر فرایند بر اندازه دانه، نمونه‌ها پس از حکاکی متالوگرافی شدند. نمونه صفر توسط میکروسکوپ نوری و نمونه‌های مراحل ۱ و ۴ به وسیله میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی متالوگرافی و ریز ساختار آن‌ها مشاهده شد. شکل ۳-۷ ریز ساختار نمونه خام اولیه را نشان می‌دهد. به علت اینکه اندازه دانه‌ها با کاهش چشمگیری همراه بود ریز ساختار نمونه‌های مرحله اول به بعد به وسیله میکروسکوپ نوری مشاهده نشد، شکل ۳-۸ و ۳-۹ تصاویر به دست آمده از FESEM را نشان می‌دهد. همان گونه که مشخص است با

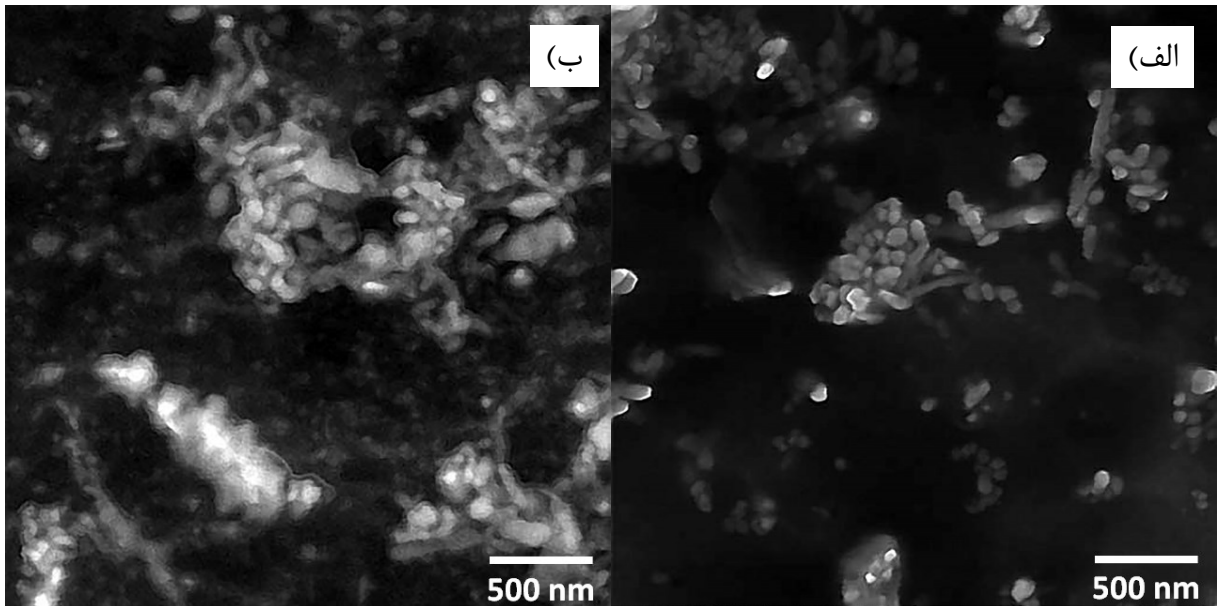
افزایش تعداد مراحل ECAP اندازه دانه کاهش یافته است و انتظار می‌رود پس از چهار مرحله اندازه دانه از $40\ \mu\text{m}$ در نمونه اولیه به حدود $200\ \text{nm}$ رسیده باشد. البته به دلیل عدم وضوح کامل تصاویر نمی‌توان به قطعیت در مورد اندازه دانه اظهار نظر کرد، اما مقایسه با نتایج مطالعه‌ی دیگری که بر روی آلیاژ زیرکونیوم نیوبیوم به وسیله TEM انجام شده است، نشان دهنده کاهش اندازه دانه از مقدار اولیه $40\ \mu\text{m}$ به $500\ \text{nm}$ پس از چهار مرحله ECAP در قالبی با زاویه کانال $\varphi=135^\circ$ است [۲۹]. مطالعه‌ای دیگر روی زیرکونیوم نشان می‌دهد اندازه دانه در قالبی با $\varphi=90^\circ$ پس از دو مرحله به $330\ \text{nm}$ رسیده است [۳۰]. پژوهشی دیگر روی زیرکونیوم حکایت از کاهش اندازه دانه از $20\ \mu\text{m}$ به $25\ \text{nm}$ دارد [۴۲].



شکل ۳-۷ تصویر متالوگرافی نمونه ماده خام اولیه با بزرگنمایی ۲۰ برابر



شکل ۳-۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی ۳۰۰۰۰ برابر الف) یک و ب) چهار مرحله ECAP

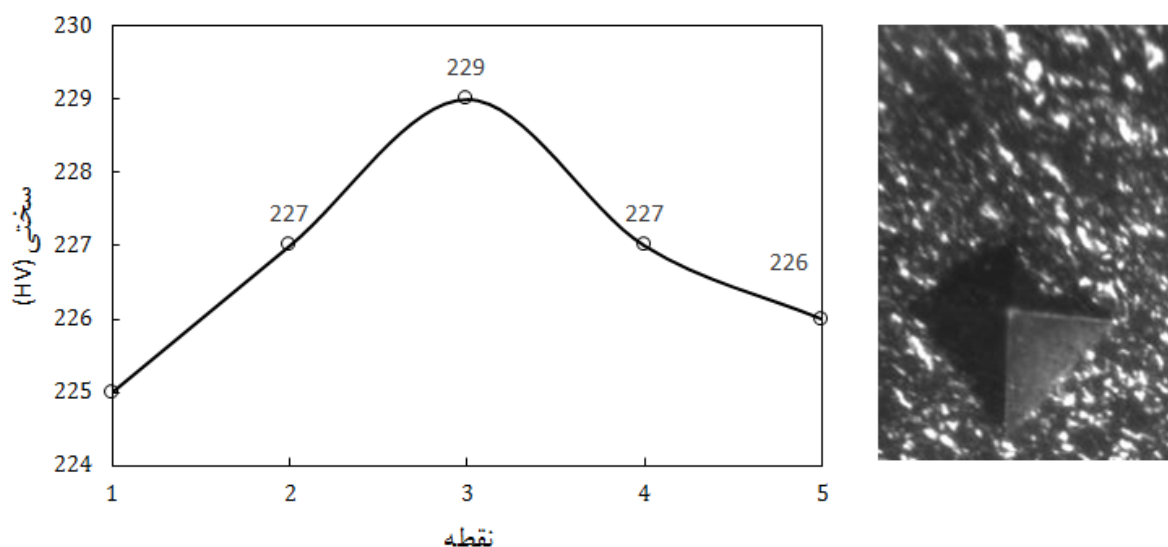


شکل ۳-۹ تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی ۵۰۰۰۰ برابر الف) یک و ب) چهار مرحله ECAP

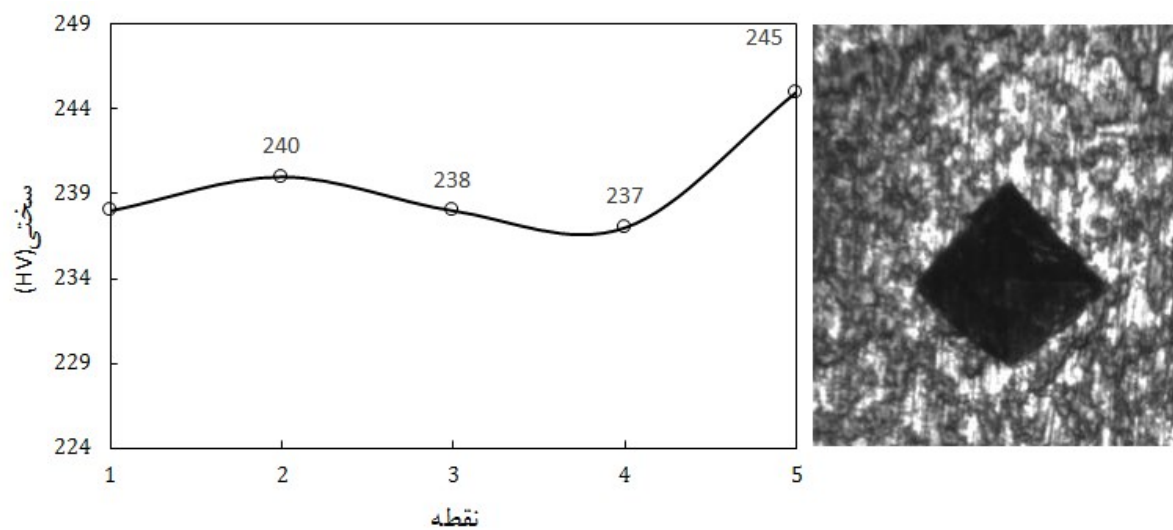
۳-۳- نتایج سختی سنجی

میزان بار اعمال شده برای هر نمونه ۱ Kg در مدت زمان ۱۰ ثانیه بود. مقادیر میکرو سختی مطابق استاندارد ASTM-E384-11e1 برای هفت نقطه از هر نمونه اندازه‌گیری شد. سپس بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین مقادیر حذف شده و از پنج مقدار باقی‌مانده میانگین گرفته شد. این نقاط بر اساس فاصله آن‌ها از لبه نمونه انتخاب شدند به این صورت که سومین نقطه در مرکز نمونه و نقاط یک و سه در نزدیکی لبه نمونه قرار گرفته‌اند.

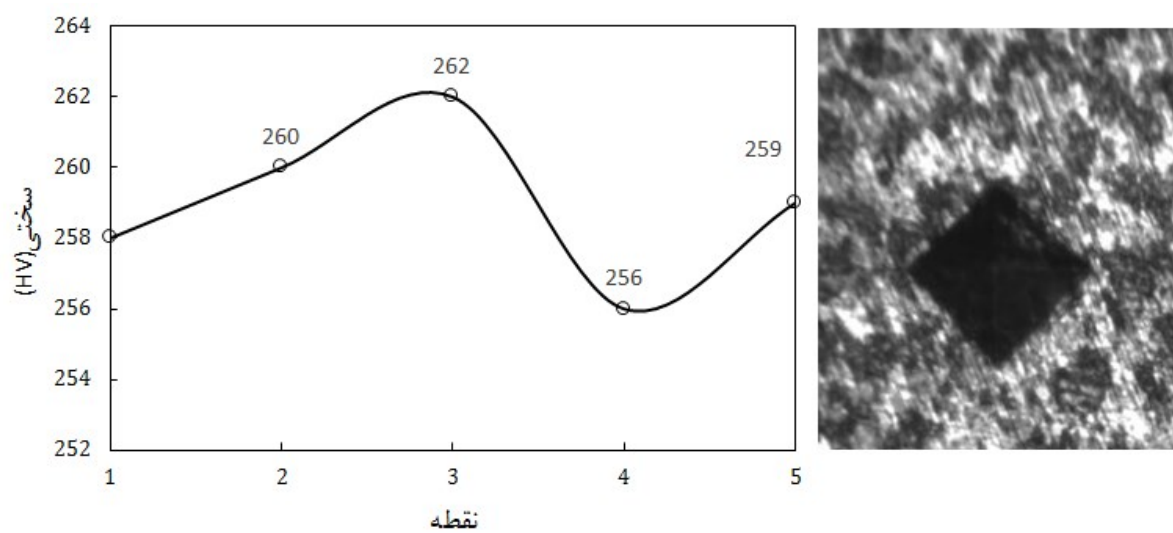
برای نمونه خام اولیه این مقادیر عبارت بود از: ۱۹۲، ۱۷۴، ۱۸۲، ۱۸۳، ۱۸۰ و ۱۸۸ ویکرز که مقدار میانگین برای نمونه صفر ۱۸۱/۵ ویکرز ثبت شد.



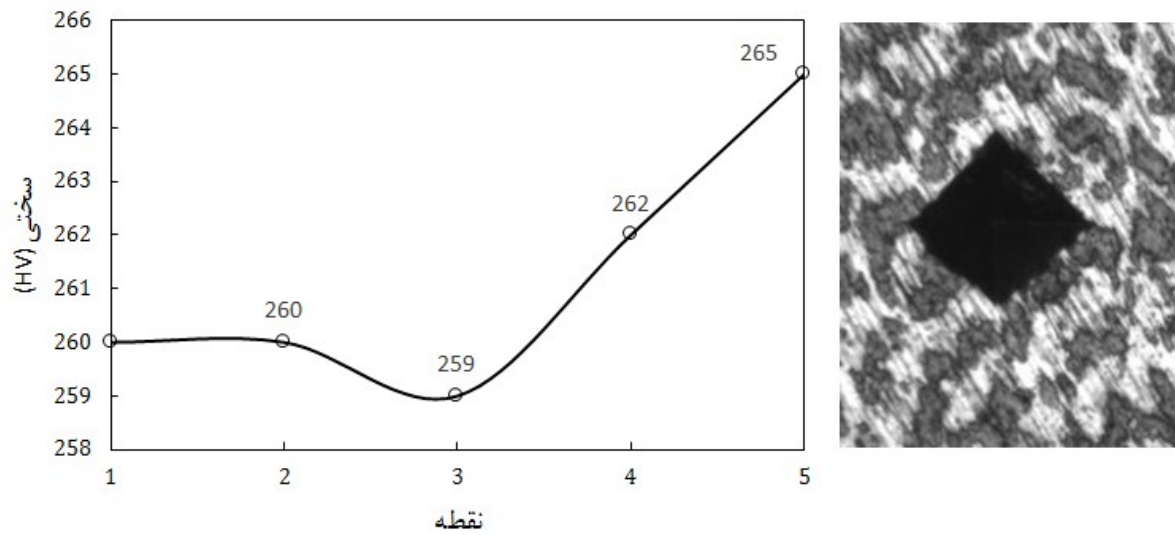
شکل ۳-۱۰ اثر فرورونده ویکرز و میزان میکرو سختی به ازای نقاط مختلف برای نمونه اولین مرحله ECAP



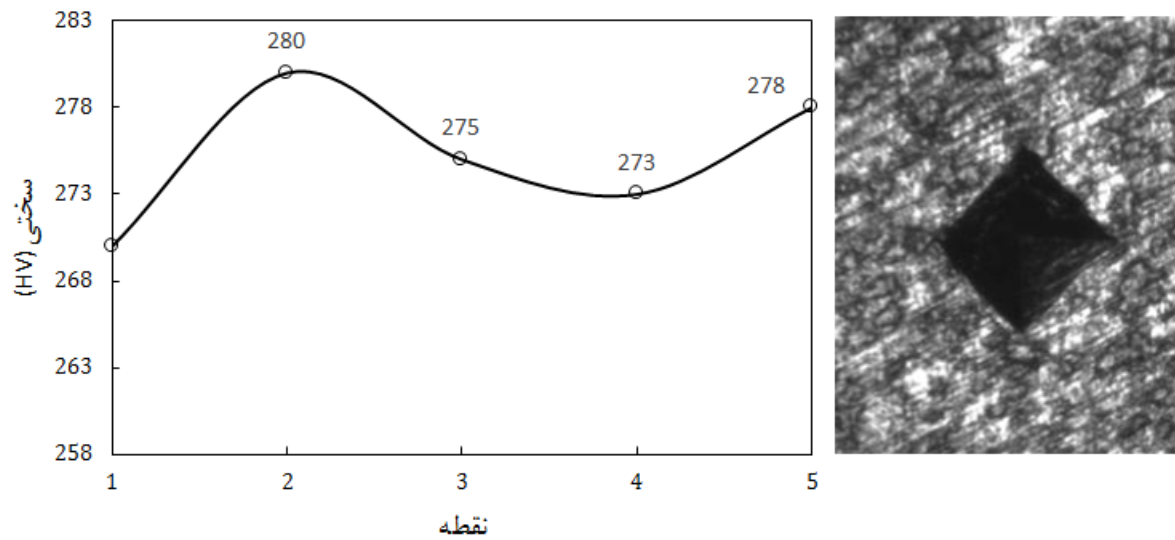
شکل ۱۱-۳ اثر فرورونده ویکرز و میزان میکرو سختی به ازای نقاط مختلف برای نمونه دومین مرحله ECAP



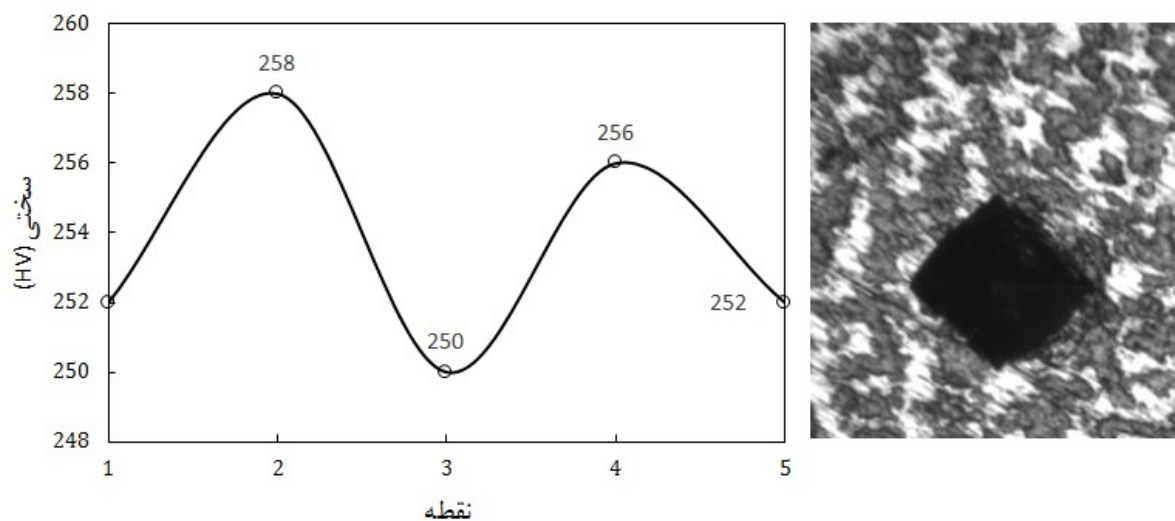
شکل ۱۲-۳ اثر فرورونده ویکرز و میزان میکرو سختی به ازای نقاط مختلف برای نمونه سومین مرحله ECAP



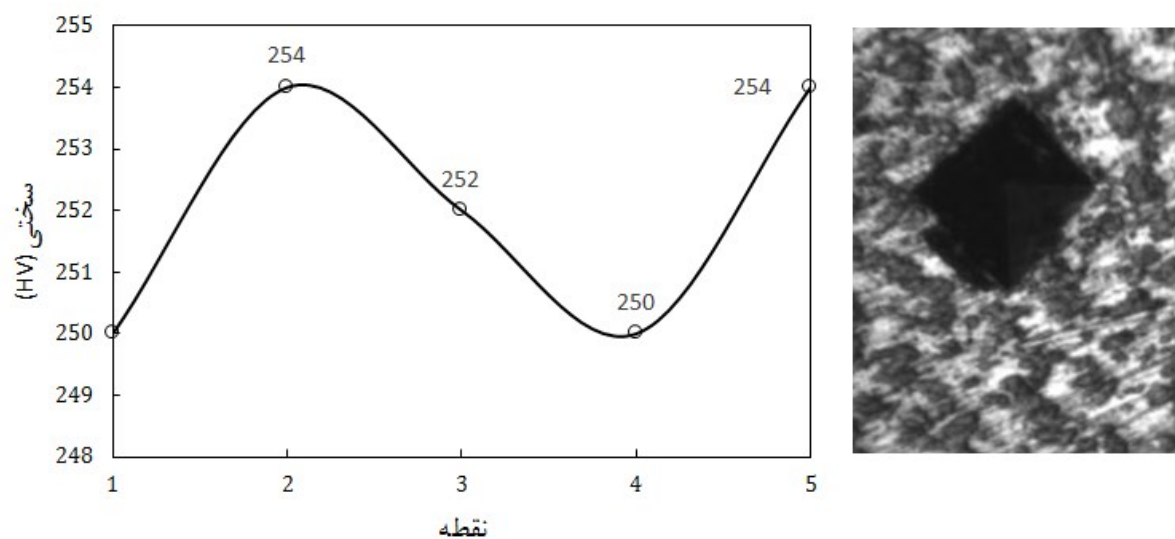
شکل ۳-۱۳ اثر فرورونده ویکرز و میزان میکرو سختی به ازای نقاط مختلف برای نمونه چهارمین مرحله ECAP



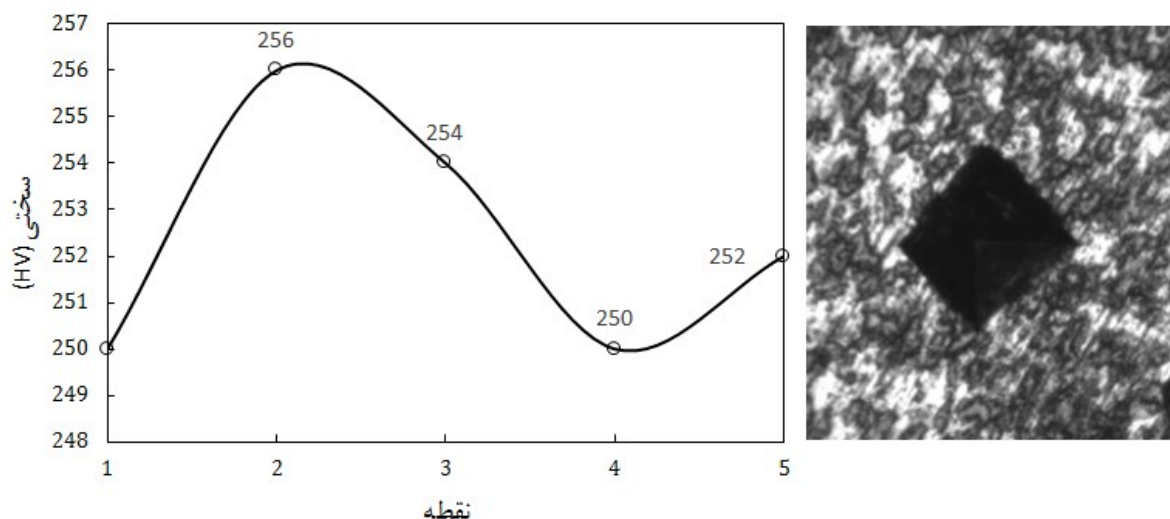
شکل ۳-۱۴ اثر فرورونده ویکرز و میزان میکرو سختی به ازای نقاط مختلف برای نمونه با پنج مرحله ECAP



شکل ۳-۱۵ اثر فرورونده ویکرز و میزان میکرو سختی به ازای نقاط مختلف برای نمونه با شش مرحله ECAP



شکل ۳-۱۶ اثر فرورونده ویکرز و میزان میکرو سختی به ازای نقاط مختلف برای نمونه با هفت مرحله ECAP

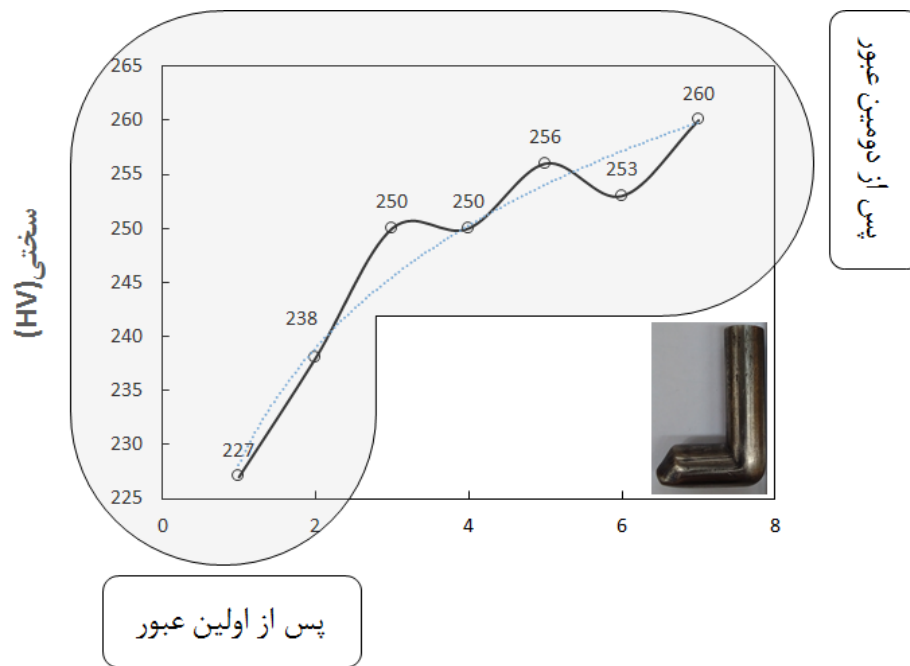


شکل ۳-۱۷ اثر فرورونده ویکرز و میزان میکرو سختی به ازای نقاط مختلف برای نمونه با هشت مرحله ECAP

همان طور که ملاحظه می‌شود با افزایش تعداد دفعات عبور نمونه از داخل کانال‌های قالب سختی افزایش می‌یابد، این افزایش سختی تا پنجمین عبور در اثر باز آرایشی، افزایش چگالی و کاهش اندازه دانه است. از عبور پنجم به بعد به علت آنیلینگ نابجایی‌ها در اثر دمای انجام فرآیند و اینکه اندازه دانه‌ها فوق‌العاده ریز می‌شود و این ریزدانه‌گی بر کرنش سختی غلبه می‌کند، سختی نمونه‌ها با کاهش نسبی همراه خواهد بود.

۳-۳-۱ توزیع سختی در امتداد محور نمونه

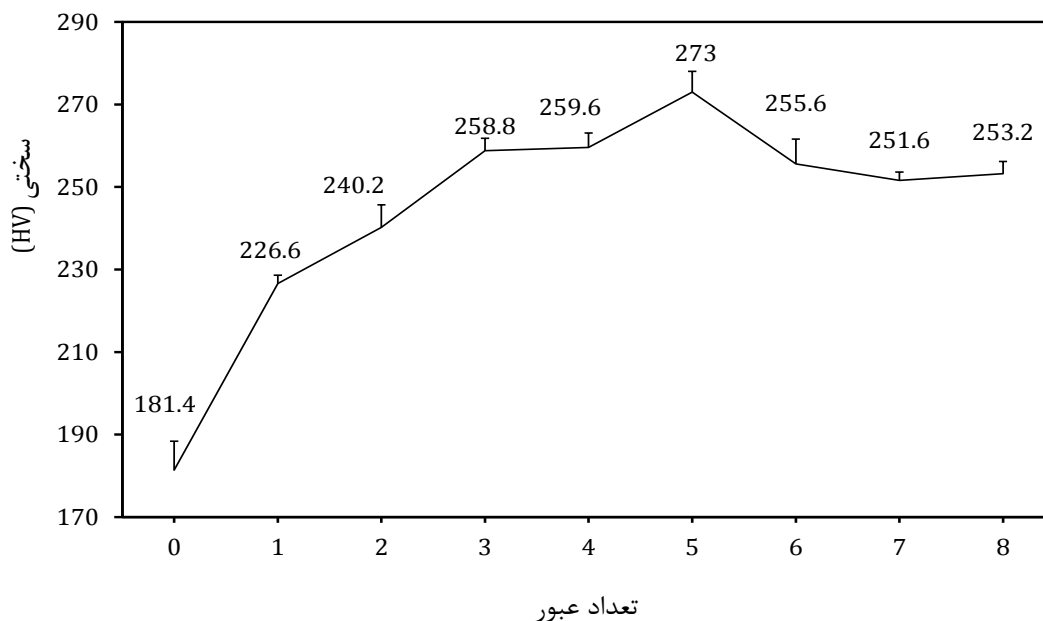
در شکل ۳-۱۸ توزیع سختی در امتداد محور طولی نمونه‌ای که مرحله اول ECAP به صورت کامل و قسمتی از آن تحت مرحله دوم قرار گرفته است نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود با حرکت از اولین عبور به سمت عبور دوم میکرو سختی نمونه افزایش چشمگیری می‌یابد.



شکل ۳-۱۸ توزیع سختی روی نمونه با یک و دو مرحله ECAP

۳-۳-۲ توزیع سختی نهایی نمونه‌ها

در نمودار شکل ۳-۱۹ میزان سختی پس از میانگین‌گیری از مقادیر سختی به ازای هر مرحله به دست آمده است و میزان خطا روی آن با میانگین‌گیری از اختلاف بزرگترین و کوچکترین مقدار نشان داده شده است. در مرحله اول ECAP سختی نمونه‌ها از ۱۸۱ HV با افزایش ۲۵٪ به ۲۲۶ HV رسیده است و با افزایش تعداد مراحل اعمال کرنش به پنج مرحله سختی نمونه به حالت اشباع خود یعنی ۲۷۳ HV رسیده است. افزایش سختی آلیاژ زیرکونیوم را می‌توان در مراحل اولیه به وسیله افزایش نابجایی‌ها با توجه به ایجاد کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد و کاهش فاصله مرز دانه‌ها در اثر ایجاد دانه‌های جدید در ماده توجیه کرد. از پنجمین مرحله ECAP به بعد، با شکل‌گیری دانه‌های فوق‌العاده ریز و در حد نانومتر، نقش نابجایی‌ها در افزایش سختی کاهش می‌یابد. تشکیل دانه‌های بسیار ریز با مرزهای بزرگ زاویه از حرکت نابجایی‌ها جلوگیری کرده و موجب قفل شدن آن‌ها در یکدیگر می‌شود. این عامل باعث کاهش سهم نابجایی‌ها در سختی ماده می‌شود. در حالی که سهم مرز دانه‌ها با توجه به کاهش تدریجی اندازه دانه ثابت می‌ماند. در نتیجه سختی از پنجمین مرحله به بعد کاهش می‌یابد [۴۱]. در این نمودار میزان خطا مشخص شده است. با توجه به درصد پایین خطا می‌توان استنباط کرد که مقادیر از صحت خوبی برخوردار است.



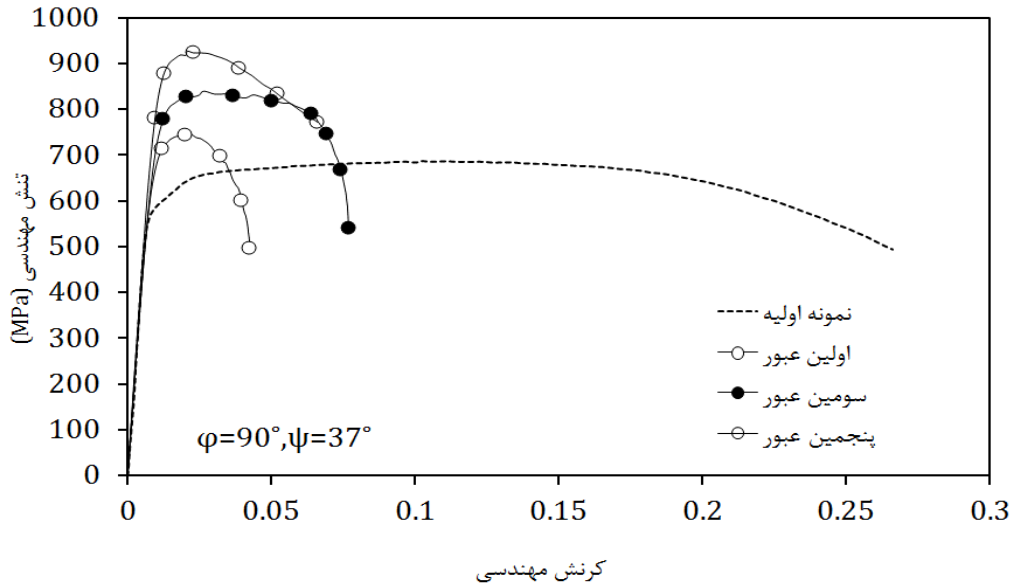
شکل ۳-۱۹ توزیع سختی همراه با میزان خطا برای نمونه‌ها

۴-۳- نتایج تست کشش

نتایج تست کشش در نمودار شکل ۳-۲۰ نشان داده شده است. همان طور که مشخص است نمونه بدون عبور دارای تنش تسلیم پایین و شکل‌پذیری بالایی می‌باشد اما پس از یک‌بار عبور نمونه از داخل قالب استحکام تسلیم و نهایی آن افزایش یافته درحالی‌که ازدیاد طول آن در اولین عبور بیش‌ترین کاهش را داشته، در سومین عبور مقداری از این کاهش طول به دلیل وضعیت قرارگیری نابعایی‌ها جبران می‌شود. نمونه با چهار مرحله ECAP بیش‌ترین ازدیاد طول را خواهد داشت و دوباره در پنجمین مرحله شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. از علل آن می‌توان به تغییر شکل کمتر ساختارهای ریز دانه تحت نیرو نسبت به مواد درشت‌دانه اشاره کرد که باعث کاهش نرخ کار سختی و باندهای برشی در اثر کم بودن فعالیت نابعایی‌ها می‌شود. همچنین می‌توان این نرم‌شوندگی را در اثر افزایش دمای تغییر شکل پلاستیک در مراحل بالا با توجه به افزایش استحکام و ایجاد شرایط تبلور مجدد دینامیکی^۱ دانست [۴۳]. مقایسه با سایر پژوهش‌ها نشان می‌دهد انطباق خوبی میان نتایج وجود دارد. مطالعه خواص مکانیکی آلیاژ زیرکونیوم-۲/۵٪ نیوبیوم نشان می‌دهد که تنش تسلیم ماده ۳۳۷ MPa بوده است و پس از یک مرحله ECAP این مقدار به ۶۲۲ MPa افزایش یافته است در حالی که درصد ازدیاد طول آن از ۲۶٪ با کاهش به ۹٪ رسیده است [۳۷]. پژوهش دیگری که روی آلیاژ زیرکونیوم نیوبیوم انجام شده است نشان دهنده افزایش ۷۰٪ تنش تسلیم از مقدار اولیه ۲۵۰ MPa پس از یک مرحله ECAP به

^۱ Dynamic recrystallization

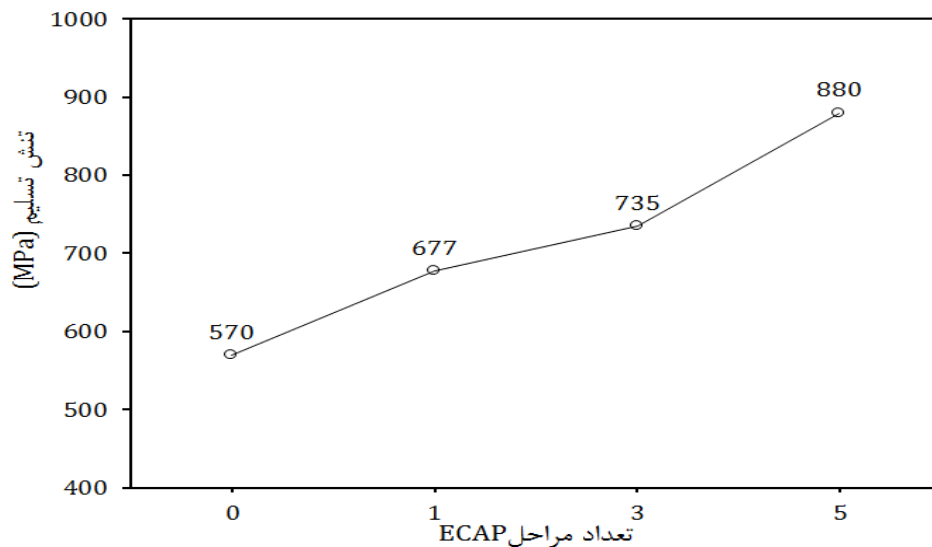
۴۵۰ MPa و ادامه این روند البته با شیب کمتر و رسیدن تنش تسلیم به ۵۵۰ MPa پس از چهار مرحله تحت مسیر Bc است [۲۹].



شکل ۳-۲۰ تنش- کرنش مهندسی نمونه به ازای مراحل مختلف ECAP

۳-۵- تنش تسلیم

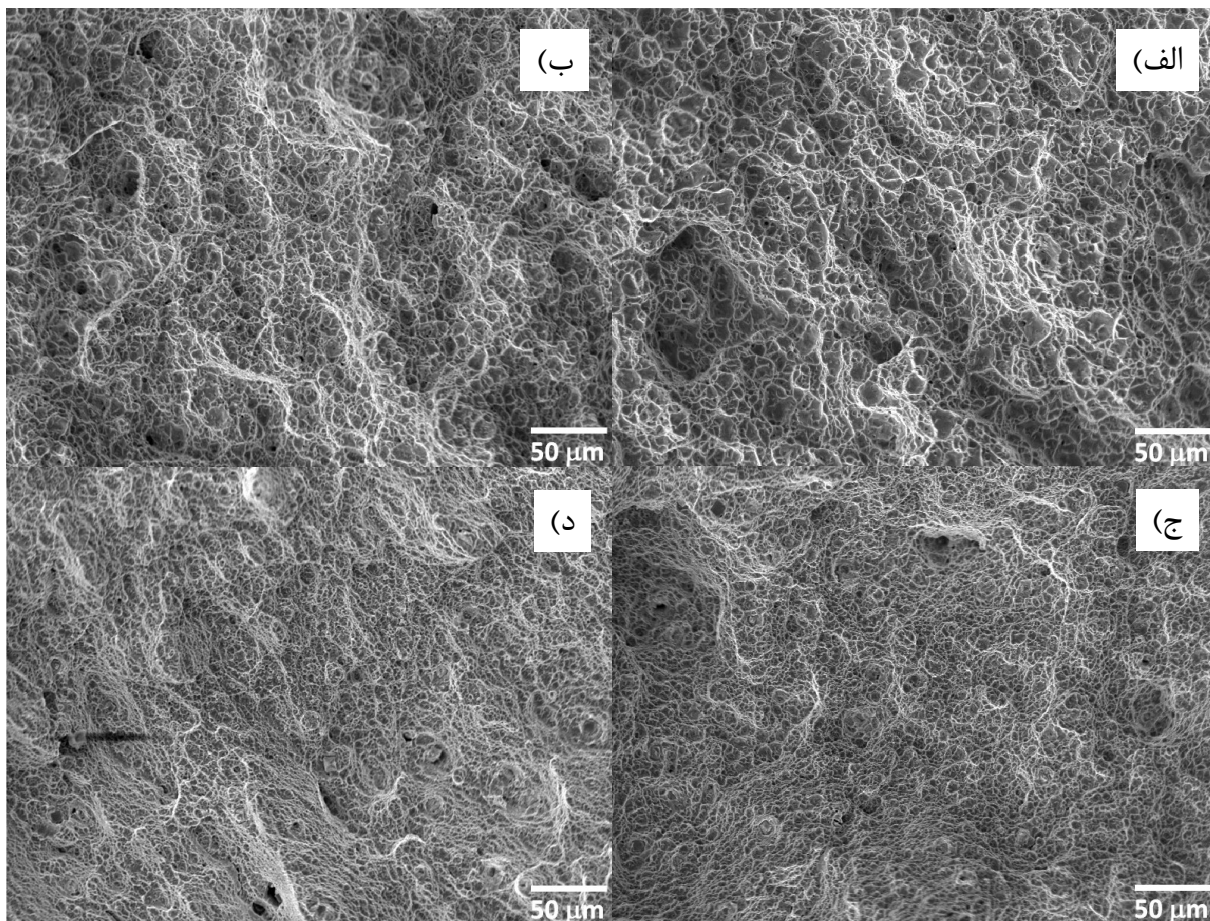
شکل ۳-۲۱ میزان تنش تسلیم بر اساس قانون $\sigma = k\epsilon^n$ درصد را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است تنش تسلیم نمونه پس از عبور اولیه از داخل قالب تحت مسیر Bc ۳۰٪ افزایش پیدا کرده است و پس از پنجمین عبور ۵۰٪ به مقدار اولیه افزوده شده است.



شکل ۳-۲۱ میزان تنش تسلیم برای نمونه اولیه و به ازای یک، سه و پنج مرحله ECAP

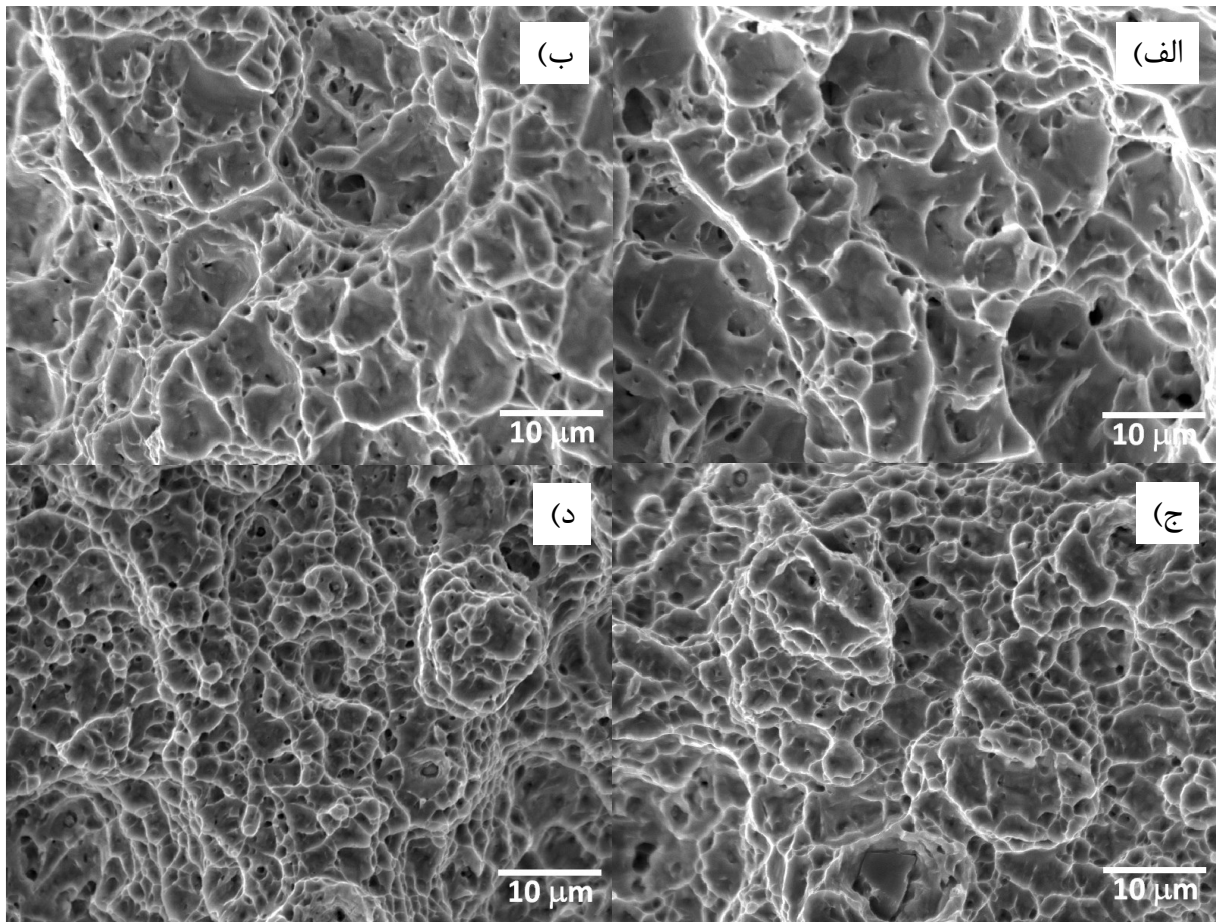
۳-۶- نتایج شکست نگاری

از بررسی میکروسکوپی سطح شکست اطلاعات مهمی درباره ماهیت شکست به دست می‌آید. شیوه‌های شکستی که معمولاً در مقیاس میکروسکوپی مشاهده می‌شوند عبارتند از رخ برگی، شبه رخ برگی و گسیختگی گود شده. نتایج به دست آمده از SEM نشان می‌دهد شکست ایجاد شده در نمونه‌ها از نوع گود شده است. این نوع شکست با فرورفتگی‌های فنجان‌ی شکل که بسته به حالت تنش ممکن است متساوی‌المحور، سهمی یا بیضوی باشند، مشخص می‌شود. شکست نشان داده شده در شکل ۳-۲۲ و ۳-۲۳ معرف شکست نرم است. این نوع شکست در اثر رشد ریز حفره‌ها و شکست دیواره بین حفره‌ها ایجاد می‌شود. همانطور که از تصاویر مشخص است عمق فرورفتگی‌ها^۱ در نمونه‌های ECAP شده به مراتب کمتر از نمونه اولیه است و این روند با افزایش تعداد مراحل شکل‌دهی ادامه می‌یابد، که نشان دهنده کاهش ازدیاد طول می‌باشد [۴۰].



شکل ۳-۲۲ سطح شکست زیرکونیوم برای نمونه الف) اولیه، ب) یک، ج) سه و د) پنج مرحله ECAP (بزرگنمایی ۶۰۰)

^۱ Dimples



شکل ۳-۲۳ سطح شکست زیرکونیوم برای نمونه الف) اولیه، ب) یک، ج) سه و د) پنج مرحله ECAP (بزرگنمایی ۴۰۰۰)

فصل ۴ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این فصل نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی، شامل میکرو سختی، تست کشش و متالوگرافی ماده مورد آزمایش به صورت مختصر بیان شده است.

۴-۱- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا قالب فرایند از نظر تنش‌های اعمالی به آن در نرم‌افزار المان محدود آباکوس^۱ بررسی شد. تحلیل تنش قالب شامل دو مرحله است. در مرحله نخست میزان تنش‌های اعمالی در اثر انطباق پرسی ایجاد شده بین هسته مرکزی و حلقه فشاری مشخص می‌شود و سپس تحلیل تنش‌های ایجادشده در حین اجرای فرایند ECAP انجام می‌شود. پس از به دست آوردن میزان تنش‌ها قالب طراحی شد، برای به دست آوردن ابعاد بهینه قالب، ابتدا قالبی با اندازه‌های بزرگ‌تر از ابعاد ارائه شده در مراجع در نظر گرفته‌شد و سپس با توجه به تنش‌ها ابعاد قالب بهینه شد، و در نهایت بر مبنای ابعاد به دست آمده قالب ساخته شد. از جمله مزایای طرح ایجادشده می‌توان به چند نکته اشاره کرد: پس از یکصد مرحله ECAP برای مواد گوناگون چه در حالت سرد و یا گرم هیچ‌گونه خرابی در قالب مشاهده نشد. از نظر ایجاد مخاطره جانی برای آزمایش‌کننده فرایند، قالب کاملاً ایمن بوده چرا که هسته سخت کاری شده قالب به وسیله حلقه فشاری که از سختی به مراتب پایین

^۱ Abaqus

تری برخوردار است احاطه شده است. به دلیل جا زدنی^۱ ساخته‌شدن هسته اصلی، در هنگام خرابی کانال عمودی می‌توان به راحتی و با صرف هزینه اندک نسبت به تعویض آن به جای تعویض کل قالب اقدام کرد. پس از ساخت قالب، فرایند ECAP در دمای 200°C بر اساس مسیر Bc که در آن نمونه‌ها پس از هر مرحله به اندازه ۹۰ درجه در یک جهت چرخانده می‌شوند، انجام و نمونه‌ها تحت ۸ مرحله مداوم پرس کاری شدند. نمونه‌ها برای سه منظور آماده سازی شدند، نمونه‌های آزمون کشش، متالوگرافی و میکرو سختی که پس از برش، پولیش کاری و حکاکی شدند، در نهایت میزان سختی، استحکام و اندازه دانه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. استحکام قطعات پس از اولین عبور افزایش چشمگیر داشت درحالی که درصد ازدیاد طول با کاهش همراه بود. میزان تنش تسلیم پس از پنج مرحله ECAP با افزایش ۵۵٪ نسبت به مقدار اولیه به 880 MPa رسید. مقادیر سختی نمونه‌ها در پنجمین مرحله بیش‌ترین افزایش را داشته به طوری که از 181 HV در مرحله اول به 273 HV رسیده و پس از آن به دلیل فوق ریزدانه شدن و غلبه این پدیده بر کرنش سختی با کاهش نسبی همراه بود.

نتایج متالوگرافی ماده در نمونه خام اولیه نشان می‌داد اندازه دانه‌ها $40\text{ }\mu\text{m}$ بوده که پس از چهار مرحله اندازه آن‌ها به 200 nm کاهش یافته بود.

نتایج به دست آمده از سطح شکست نشان می‌دهد که با افزایش تعداد مراحل ECAP اندازه فرورفتگی‌های سطح کاهش یافته است و در نتیجه ازدیاد طول کاهش یافته است.

۴-۲- پیشنهادها

به منظور ادامه‌ی پژوهش در این زمینه، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود.

۱- از فشار پشتی^۲ در فرایند ECAP به منظور دستیابی به استحکام، سختی بالاتر و همگنی بیشتر ساختار استفاده شود.

۲- برای کاهش هرچه بیشتر اندازه دانه‌ها سعی شود فرایند ECAP در حالت سرد (دمای محیط) انجام و یا اثر دماهای مختلف بر ریز ساختار و خواص مکانیکی ماده بررسی شود.

^۱ Insert

^۲ Back pressure

۳- اثر زاویه بین کانال‌های قالب بر میکرو ساختار و خواص مکانیکی بررسی شود.

۴- فرایند ECAP با نرخ کرنش‌های مختلف اجرا شود و تأثیر سرعت رم پرس بر فرایند مشخص شود.

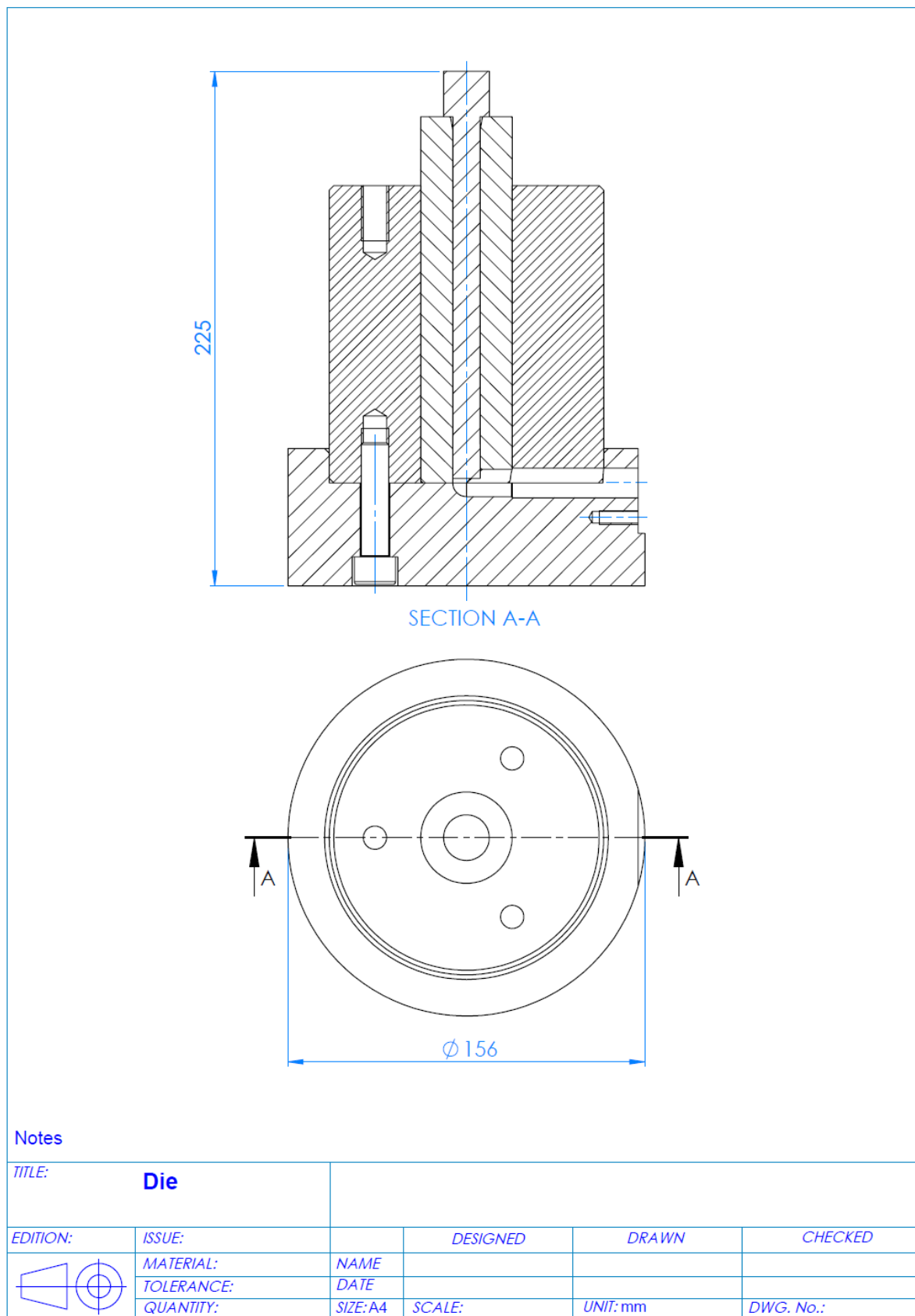
منبعها

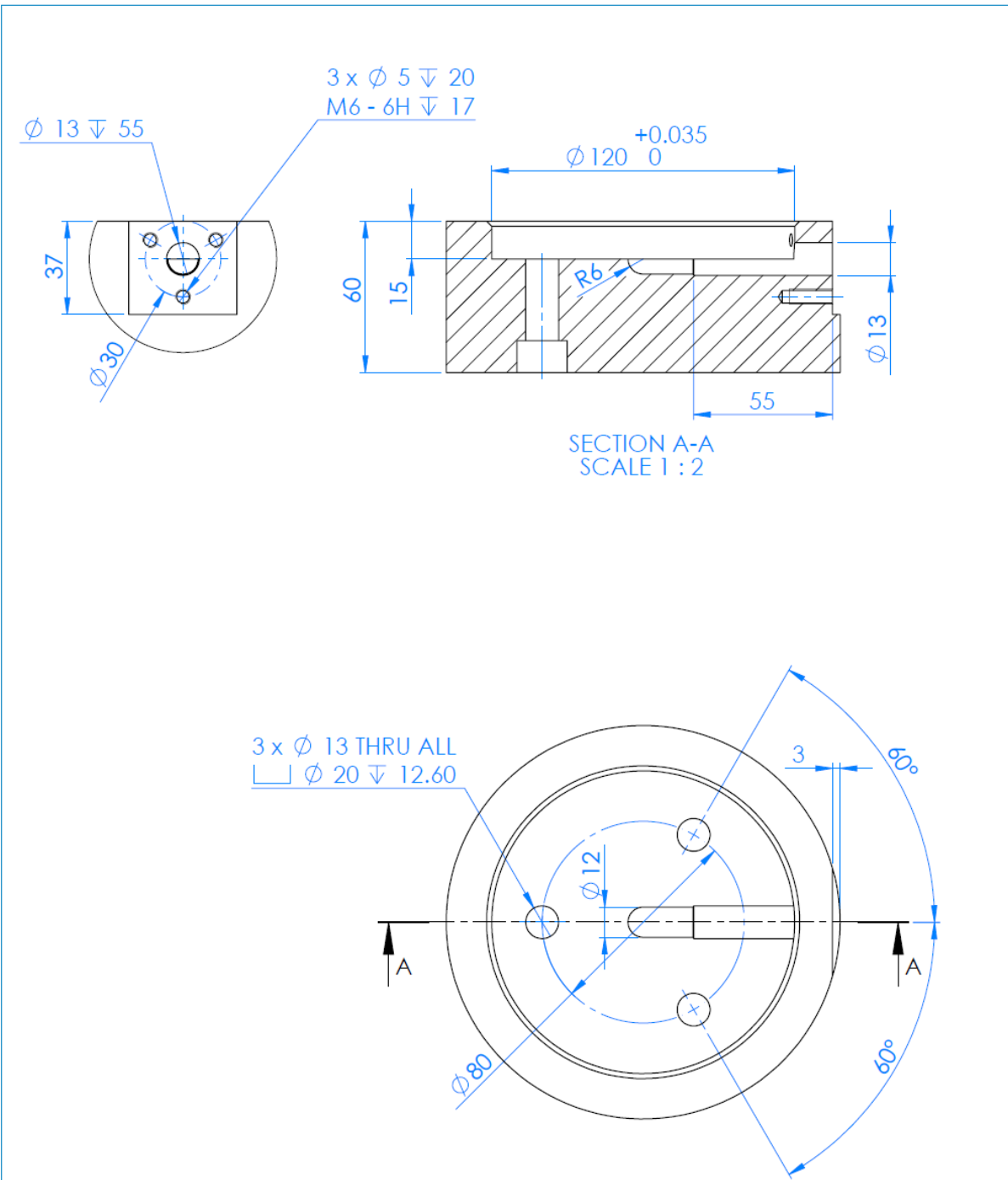
- [1] T. G. Langdon, "The processing of ultrafine-grained materials through the application of severe plastic deformation," *Journal of materials science*, vol. 42, no. 10, pp. 3388-3397, 2007.
- [2] R. Z. Valiev, and T. G. Langdon, "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement," *Progress in Materials Science*, vol. 51, no. 7, pp. 881-981, 2006.
- [3] V. Segal, "Materials processing by simple shear," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 197, no. 2, pp. 157-164, 1995.
- [4] T. G. Langdon, M. Furukawa, M. Nemoto, and Z. Horita, "Using equal-channel angular pressing for refining grain size," *Jom*, vol. 52, no. 4, pp. 30-33, 2000.
- [5] T. G. Langdon, Processing of Metal Matrix Composites through Severe Plastic Deformation, DTIC Document, 2003.
- [6] Y. Nishida, H. Arima, J.-C. Kim, and T. Ando, "Rotary-die equal-channel angular pressing of an Al-7 mass% Si-0.35 mass% Mg alloy," *Scripta Materialia*, vol. 45, no. 3, pp. 261-266, 2001.
- [7] A. Azushima, and K. Aoki, "Properties of ultrafine-grained steel by repeated shear deformation of side extrusion process," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 337, no. 1, pp. 45-49, 2002.
- [8] K. Nakashima, Z. Horita, M. Nemoto, and T. G. Langdon, "Development of a multi-pass facility for equal-channel angular pressing to high total strains," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 281, no. 1, pp. 82-87, 2000.
- [9] G. Raab, "Plastic flow at equal channel angular processing in parallel channels," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 410, pp. 230-233, 2005.
- [10] R. Valiev, and T. Langdon, "Developments in the use of ECAP processing for grain refinement," *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 13, no. 1, pp. 15-26, 2006.
- [11] Y. Saito, H. Utsunomiya, H. Suzuki, and T. Sakai, "Improvement in the r-value of aluminum strip by a continuous shear deformation process," *Scripta Materialia*, vol. 42, no. 12, pp. 1139-1144, 2000.
- [12] H. Utsunomiya, Y. Saito, T. Hayashi, and T. Sakai, "Rolling of T-shaped profiled strip by the satellite mill," *Journal of materials engineering and performance*, vol. 6, no. 3, pp. 319-325, 1997.
- [13] H. Utsunomiya, K. Hatsuda, T. Sakai, and Y. Saito, "Continuous grain refinement of aluminum strip by conshearing," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 372, no. 1, pp. 199-206, 2004.
- [14] F. Barlat, Y. Maeda, K. Chung, M. Yanagawa, J. Brem, Y. Hayashida, D. Lege, K. Matsui, S. Murtha, and S. Hattori, "Yield function development for aluminum alloy sheets," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 45, no. 11, pp. 1727-1763, 1997.
- [15] G. J. Raab, R. Z. Valiev, T. C. Lowe, and Y. T. Zhu, "Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAP-Conform," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 382, no. 1, pp. 30-34, 2004.
- [16] K. Matsuki, T. Aida, T. Takeuchi, J. Kusui, and K. Yokoe, "Microstructural characteristics and superplastic-like behavior in aluminum powder alloy consolidated by equal-channel angular pressing," *Acta Materialia*, vol. 48, no. 10, pp. 2625-2632, 2000.

- [17] S. Xiang, K. Matsuki, N. Takatsuji, T. Yokote, J. Kusui, and K. Yokoe, "An investigation of the age hardening behavior of PM 2024Al-Fe-Ni alloys and the effect of consolidation conditions," *Journal of materials science*, vol. 34, no. 8, pp. 1953-1958, 1999.
- [18] S. Semiatin, D. Delo, and E. Shell, "The effect of material properties and tooling design on deformation and fracture during equal channel angular extrusion," *Acta Materialia*, vol. 48, no. 8, pp. 1841-1851, 2000.
- [19] A. Shan, I.-G. Moon, and J.-W. Park, "Estimation of friction during equal channel angular (ECA) pressing of aluminum alloys," *Journal of materials processing technology*, vol. 122, no. 2, pp. 255-259, 2002.
- [20] C. Xu, and T. G. Langdon, "Influence of a round corner die on flow homogeneity in ECA pressing," *Scripta materialia*, vol. 48, no. 1, pp. 1-4, 2003.
- [21] Y. Wu, and I. Baker, "An experimental study of equal channel angular extrusion," *Scripta Materialia*, vol. 37, no. 4, pp. 437-442, 1997.
- [22] A. Shan, I.-G. Moon, H.-S. Ko, and J.-W. Park, "Direct observation of shear deformation during equal channel angular pressing of pure aluminum," *Scripta Materialia*, vol. 41, no. 4, pp. 353-357, 1999.
- [23] S. C. Baik, R. J. Hellmig, Y. Estrin, and H. S. Kim, "Modeling of deformation behavior of copper under equal channel angular pressing," *Zeitschrift Fuer Metallkunde*, vol. 94, no. 6, pp. 754-760, 2003.
- [24] S. Chung, H. Somekawa, T. Kinoshita, W. Kim, and K. Higashi, "The non-uniform behavior during ECAE process by 3-D FVM simulation," *Scripta Materialia*, vol. 50, no. 7, pp. 1079-1083, 2004.
- [25] S. Lee, S. Ha, K. Kim, S. Hwang, L. Huh, and H. Chung, "Finite element analysis for deformation behavior of an aluminum alloy composite containing SiC particles and porosities during ECAP," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 371, no. 1, pp. 306-312, 2004.
- [26] P. B. Berbon, M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, and T. G. Langdon, "Influence of pressing speed on microstructural development in equal-channel angular pressing," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 30, no. 8, pp. 1989-1997, 1999.
- [27] D. Yamaguchi, Z. Horita, M. Nemoto, and T. G. Langdon, "Significance of adiabatic heating in equal-channel angular pressing," *Scripta materialia*, vol. 41, no. 8, pp. 791-796, 1999.
- [28] A. Yamashita, D. Yamaguchi, Z. Horita, and T. G. Langdon, "Influence of pressing temperature on microstructural development in equal-channel angular pressing," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 287, no. 1, pp. 100-106, 2000.
- [29] B. Lee, and M. Kim, "Deformation behavior in Zr702 processed by equal-channel angular pressing at room temperature," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 423, no. 1, pp. 180-183, 2006.
- [30] W. Cao, S. H. Yu, S. K. Hwang, and B. Bacroix, "Microstructure, texture and deformation mechanism of Zr702 processed by Equal Channel Angular Pressing (ECAP)." pp. 533-538.
- [31] X. Zhao, X. Yang, X. Liu, X. Wang, and T. G. Langdon, "The processing of pure titanium through multiple passes of ECAP at room temperature," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 23, pp. 6335-6339, 2010.
- [32] V. Terent'ev, S. Dobatkin, S. Nikulin, V. Kopylov, D. Prosvirin, S. Rogachev, and I. Bannykh, "Effect of equal-channel angular pressing on the fatigue strength of titanium and a zirconium alloy," *Russian Metallurgy (Metally)*, vol. 2011, no. 10, pp. 981-988, 2011.

- [33] Y. Zhang, R. B. Figueiredo, S. N. Alhajeri, J. T. Wang, N. Gao, and T. G. Langdon, "Structure and mechanical properties of commercial purity titanium processed by ECAP at room temperature," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 25, pp. 7708-7714, 2011.
- [34] S. Nikulin, A. Rozhnov, S. Rogachev, V. Khatkevich, V. Turchenko, and E. Khotulev, "Investigation of structure, phase composition, and mechanical properties of Zr-2.5% Nb alloy after ECAP," *Materials Letters*, vol. 169, pp. 223-226, 2016.
- [35] M. S. R. Naseri, M. Kadkhodayan, "Effect of work-piece cross section on the mechanical properties of commercially pure titanium produced by Equal Channel Angular Pressing," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 15, pp. 157-166, 2015.
- [۳۶] قندهاری، ح؛ "مطالعه‌ی تجربی و عددی فرآیند تاب‌گیری لوله‌های بدون درز فلزی"؛ ۱۳۹۴؛ دانشکده مکانیک؛ دانشگاه شاهرود.
- [37] P. Pedersen, "On shrink fit analysis and design," *Computational Mechanics*, vol. 37, no. 2, pp. 121-130, 2006.
- [38] U. Fischer, R. Gomeringer, M. Heinzler, R. Kilgus, F. Näher, S. Oesterle, H. Paetzold, and A. Stephan, *Mechanical and metal trades handbook: Europa Lehrmittel*, 2010.
- [39] H. Erol Akata, "Application of Separated Die Design To Production of Ecap Dies," pp. 120-124.
- [40] E. Maburri, and I. Gede, "Fractographic Analysis of 5052 Al-Mg Alloys Processed by Equal Channel Angular Pressing," pp. 621-625.
- [41] R. Valiev, I. Alexandrov, Y. Zhu, and T. Lowe, "Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation," *Journal of Materials Research*, vol. 17, no. 01, pp. 5-8, 2002.
- [42] W. Cao, S. H. Yu, Y. Chun, Y. C. Yoo, C. Lee, D. H. Shin, and S. K. Hwang, "Strain path effects on the microstructure evolution and mechanical properties of Zr702," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 395, no. 1, pp. 77-86, 2005.
- [43] T. Sakai, A. Belyakov, R. Kaibyshev, H. Miura, and J. J. Jonas, "Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions," *Progress in Materials Science*, vol. 60, pp. 130-207, 2014.

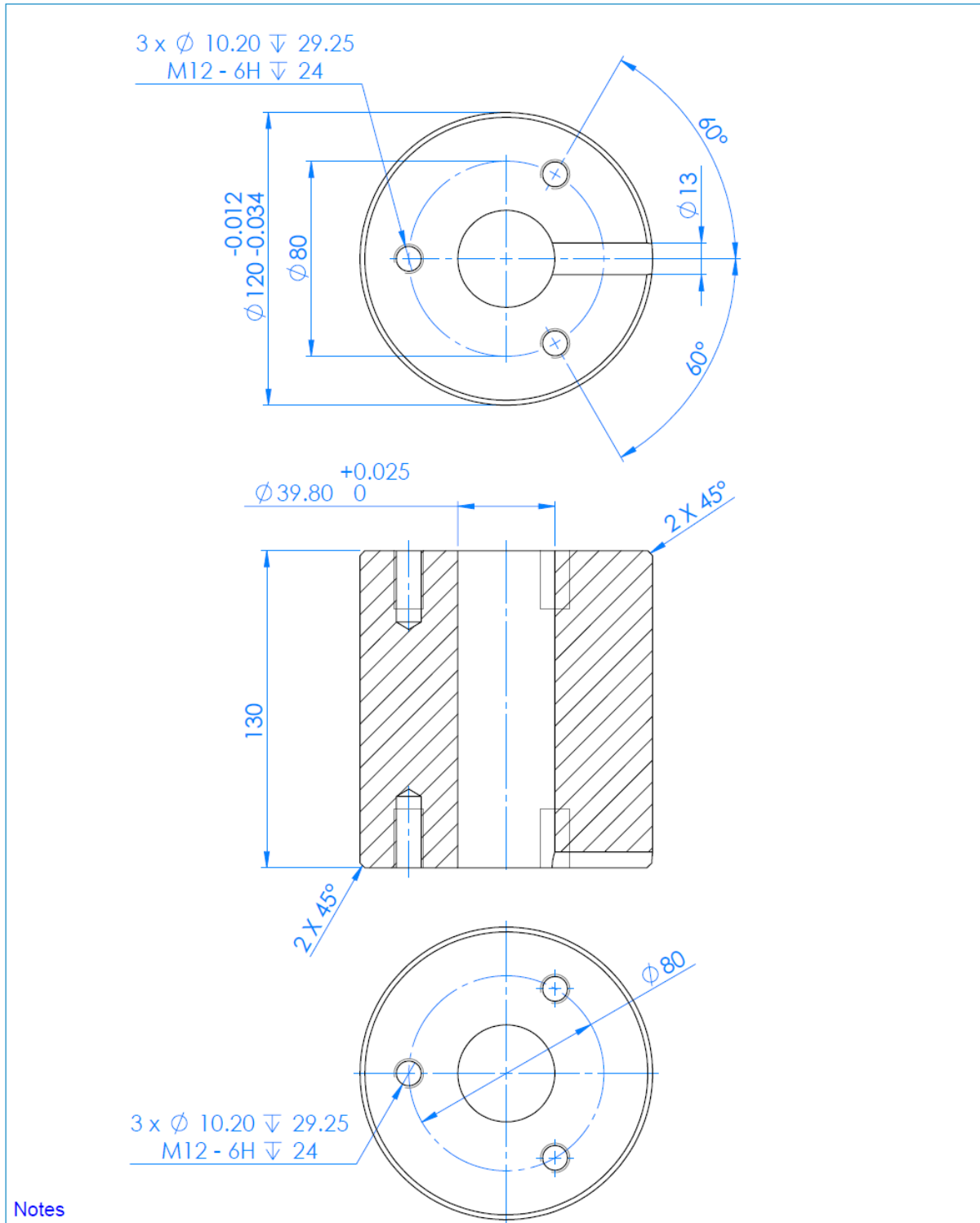
پیوست ۱- نقشه‌های قالب ECAP





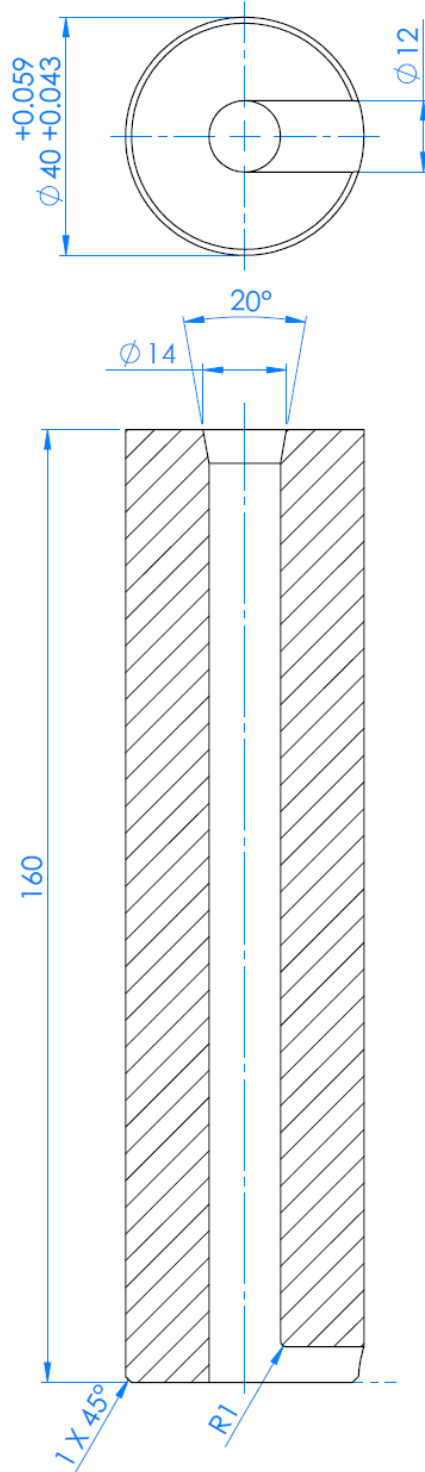
Notes

TITLE: Die					
EDITION:	ISSUE:	DESIGNED	DRAWN	CHECKED	
	MATERIAL:	NAME			
	TOLERANCE:	DATE			
	QUANTITY:	SIZE: A4	SCALE:	UNIT: mm	DWG. No.:



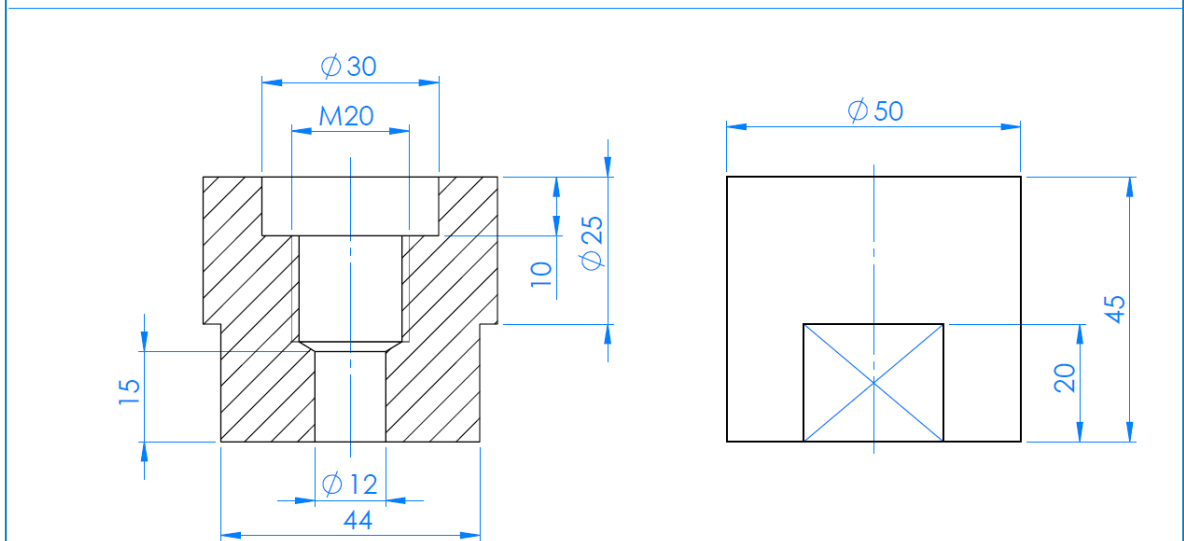
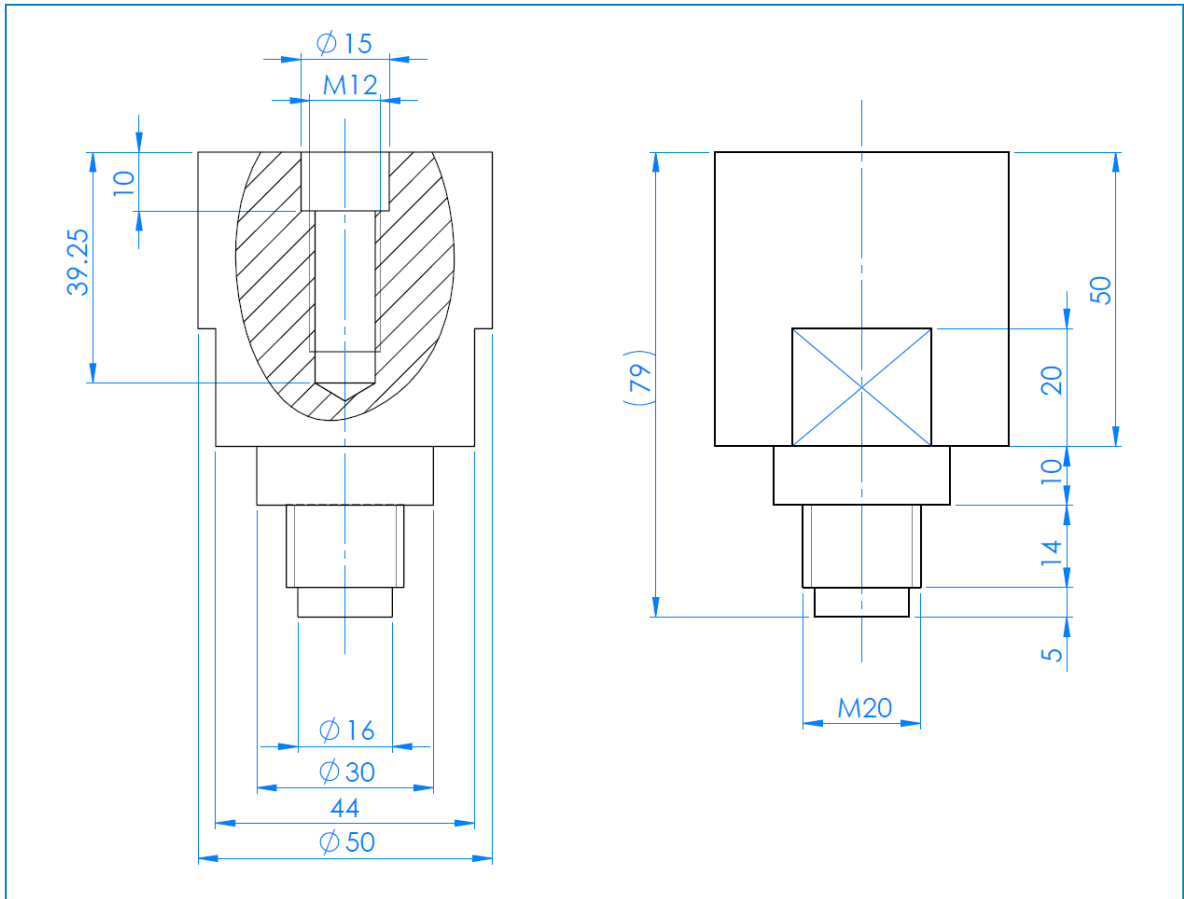
Notes

TITLE: Die					
EDITION:	ISSUE:	DESIGNED	DRAWN	CHECKED	
	MATERIAL:	NAME			
	TOLERANCE:	DATE			
	QUANTITY:	SIZE:A4	SCALE:	UNIT: mm	DWG. No.:



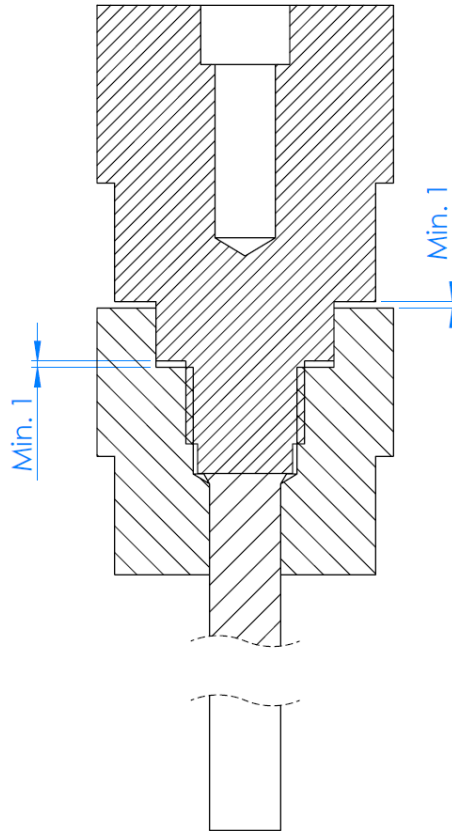
Notes

TITLE:		Die			
EDITION:	ISSUE:	DESIGNED	DRAWN	CHECKED	
	MATERIAL:	NAME			
	TOLERANCE:	DATE			
	QUANTITY:	SIZE: A4	SCALE:	UNIT: mm	DWG. No.:



Notes

TITLE: Die					
EDITION:	ISSUE:	DESIGNED	DRAWN	CHECKED	
	MATERIAL:	NAME			
	TOLERANCE:	DATE			
	QUANTITY:	SIZE: A4	SCALE:	UNIT: mm	DWG. No.:



Notes

TITLE: Die					
EDITION:	ISSUE:	DESIGNED	DRAWN	CHECKED	
	MATERIAL:	NAME			
	TOLERANCE:	DATE			
	QUANTITY:	SIZE: A4	SCALE:	UNIT: mm	DWG. No.:

Abstract

The severe plastic deformation methods have been developed in largely different industries. Use this method high level of strains can be applied to the material. Equal channel angular pressing (ECAP) is one of these methods. In which, the sample can be pressed for many times since the cross section of it does not change. The aim of the process is achieving ultra-fine grained structure and increase the strength and hardness by increasing the density of dislocations. It is the aim of this thesis to study the severe plastic deformation of zirconium niobium alloy using ECAP. Therefore first the ECAP die was designed and analyzed. Analysis of stresses applied to the die components was performed in two steps using finite element method in Abaqus software. In first step analyzed residual stresses that are caused by press shrink fitting the die in a pressure ring calculated. It was founded that use this pressing created hoop stress of $\sigma_{\theta}=800\text{MPa}$ in die. In the second step ECAP process is simulated and it is identified the hoop stress of $\sigma_{\theta}=280\text{ MPa}$ is induced on the wall of the vertical channel of die. This induced stress is lower than the fracture strength of die. The strain applied at each stage, depends on the angle between the two channels. In die design this angle should have the lowest possible amount so that the greatest amount of strain is applied to sample in each pass and also die does not fail. For this reason, the angle between the two channels was selected to $\varphi=90^{\circ}$. ECAP was carried out at a temperture of 200°C via route Bc in which the sample was rotated 90° in the same sense in each pass. The zirconium niobium alloy was succssesfully ecaped up to 8 passes. Determined micro-hardness and mechanical properties of the sample. The results of fracture shows that dimples size and elongation is reduced. The results of micro hardening and yield stress shows rise 50% after five passes of ECAP.

Keywords: Equal channel angular pressing (ECAP), Ultra-fine grained material, Severe plastic deformation, ECAP die design.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Manufacturing and Production Engineering

Title

**Experimental study of severe plastic deformation of zirconium
niobium alloy using equal channel angular pressing**

Presented for Master of Science in Mechanical Engineering

by

Mohammad Moradi Oftadeh

Supervisor

Dr. Seyed Hadi Ghaderi

February 2017