١٠١٨٤٥

۸۷/۱/۱۵۲۹۱
۸۷/۱۱/۱۳

دانشگاه مازندران

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی مکانیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک-ساخت و تولید

بررسی تجربی فاکتورهای موثر بر اکستروژن آلومینیم ۶۰۶۳ در کانالهای هم مقطع زاویه دار(ECAP)

حسن کلانتری

۱۳۸۷/۹/۳۰

اساتید راهنما:

دکتر سید جمال حسینی پور

دکتر سلمان نوروزی

استاد مشاور:

مهندس عبدالحمید گرجی

شهریور ۸۷

۱۰۱۲۵۴۵

باسمه تعالی

دانشگاه صنعتی
نوشیروانی بابل

تحصیلات تکمیلی

ارزشیابی پایان نامه در جلسه دفاعیه

نام و نام خانوادگی دانشجو : *حسن کلانتری*

شماره دانشجوئی : ۸۴۵۱۳۸۸۰۰۵

رشته تحصیلی : *مهندسی مکانیک – ساخت و تولید*

مقطع : **کارشناسی ارشد**

سال تحصیلی : *نیمسال دوم ۸۷-۱۳۸۶*

عنوان پایان نامه :

«بررسی تجربی پارامترهای موثر در فرآیند ECAP»

تاریخ دفاع : ۸۷/۶/۲۶

نمره پایان نامه (به عدد) : ۱۸/ —

نمره پایان نامه (به حروف) : هجده

هیات داوران :

استاد راهنما : دکتر سید جمال حسینی پور — امضا

استاد راهنما : دکتر سلمان نوروزی — امضا

استاد مشاور: مهندس عبدالحمید گرجی — امضا

استاد مدعو: دکتر سید محمود ربیعی — امضا

استاد مدعو: دکتر محمد بخشی — امضا

نماینده کمیته تحصیلات تکمیلی : دکتر داود دومیری گنجی — امضا

تقدیم به روح پر فتوح پدرم

و

همه کسانی که در مراحل تحصیل یاریم کردند

سپاسگزاری

پژوهش حاضر حاصل تلاش مداوم و پیوسته نگارنده بوده است که جز با عنایت پروردگار مهربان دستیابی به اهداف آن ممکن نبود.

از اساتید محترم جناب آقای دکتر سید جمال حسینی پور و دکتر سلمان نوروزی اساتید محترم راهنما و جناب آقای مهندس عبدالحمید گرجی استاد مشاور به خاطر راهنمایی‌های صمیمانه و کمک‌های دلسوزانه، کمال تشکر و قدردانی را دارم. و از ایزد یکتا سلامتی و خرسندی همه این عزیزان را خواستارم.

چکیده

فرایند پرسکاری در کانالهای هم مقطع زاویه دار(ECAP)[1] یک فرایند با هدف ریز نمودن دانه بندی فلزات است که درآن مکانیزم برش صفحه ای و هم محور شدن کریستالی، افزایش دانسیته نابجاییها را به دنبال دارد که نتیجه آن بالارفتن استحکام، سختی و عمر خستگی فلزات و آلیاژهای صنعتی است. این روش دارای مشخصات ویژه ای است که آن را از دیگر فرایندها متمایز می سازد و بارز ترین آنها بهبود خصوصیات مکانیکی در مقایسه با روشهای معمول است.

ترکیب فرایند مذکور با عملیات حرارتی تاثیر مضاعفی بر خواص مکانیکی فلزات دارد. در این پژوهش تاثیر ECAP وعملیات حرارتی محلول سازی و پیرکردن بر آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳ بررسی گردید. برای این منظورپس ازساخت یک قالب لغزان فولادی واعمال فرایند به تنهایی و یا با توام کردن آن با عملیات حرارتی پیر سازی، سختی و استحکام کششی نمونه ها اندازه گیری و ریز ساختار آنها از نظر توزیع فاز ثانویه با نمونه های خام و نمونه های حاصل از فرایند مورد ارزیابی و مقایسه قرارگرفتند.نتایج نشان داد که با اعمال فرایند، خواص مکانیکی آلیاژ به نحو چشمگیری بهبود یافت، همچنین مشخص گردید که همراه نمودن عملیات حرارتی با فرایند موجب بهبود بیشتر خصوصیات مکانیکی فلز شده است و با افزایش تعداد پاس توزیع سختی روی نمونه ها یکنواخت تر گردید.

واژگان کلیدی: پرسکاری در کانالهای هم مقطع زاویه دار ECAP، قالبهای لغزان،پیرسازی،آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳

۱-Equal channel Angular Pressing

فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه
فصل ۱ ..... ۱۲
۱-۱ استحکام بخشی مواد و ارتباط اندازه دانه با استحکام مواد ۱۳
۱-۲ روشهای ایجاد مواد بادانه بندی بسیار ریز UFG ۱۴
۱-۲-۱ انواع روشهای SPD ۱۶
۱-۳ معرفی فرایند ECAP ۱۶
۱-۳-۲ کاربردهای ECAP، مزایا و معایب آن ۲۱
۱-۴ معرفی پارامترهای موثر در فرایند ECAP ۲۴
۱-۴-۱ کرنش در ECAP ۲۵
۱-۴-۲ نوع چرخش ها در ECAP ۲۶
۱-۴-۳ تاثیر زاویه کانال قالب، Φ ۲۷
۱-۴-۴ زاویه قوس Ψ ۲۷
۱-۴-۵ سرعت پرسکاری ۲۷
۱-۴-۶ دمای پرسکاری ۲۷
۱-۴-۷ فشار معکوس در فرایند ECAP ۲۸
۱-۴-۸ انواع قالبهایی که برای ECAP استفاده می شوند و مزایا و معایب آنها ۳۰
۱-۵ مروری بر کارهای دیگران ۳۲
۱-۶ شرح مسئله و هدف از پژوهش ۳۷
فصل ۲ ..... ۳۸
۲-۱ طراحی روش تحقیق ۳۹
۲-۱-۱ طراحی مکانیزم قالب ۳۹
۲-۱-۲ روغنکاری ۴۲
۲-۱-۳ آماده سازی نمونه ها ۴۲
۲-۲ انجام آزمایش ECAP ۴۴
۲-۳ آزمونهای پس از عملیات ۴۶
۲-۳-۱ سختی سنجی از نمونه ها ۴۶
۲-۳-۲ آزمایش کشش ۴۷
۲-۳-۳ متالوگرافی از مقاطع نمونه ها و تهیه عکس از توزیع ریز ساختار ۴۹
فصل ۳ ..... ۵۰
۳-۱ ارائه نتایج حاصل از آزمایش و بررسی خواص مکانیکی ماده ۵۱
۳-۱-۱ نتایج حاصل از آزمایش ECAP (نمودارهای نیرو-جابجایی) ۵۱
۳-۱-۲ نتایج آزمایش سختی ۵۶

۳-۱-۳ نتایج آزمایش کشش ۵۸
۴-۱-۳ نتایج متالوگرافی ۶۰
فصل ۴ ..... ۶۵
۱-۴ نتیجه گیری ۶۶
۲-۴ پیشنهادات ۶۷

فهرست شکل‌ها

عنوان.....صفحه
شکل ۱-۱) شمای ساده یک کانال ECAP و سه سطح مهم نمونه[۱]..... ۱۸
شکل ۱-۲) اعمال برش ساده و فعال شدن سیستمهای لغزشی در حین عبور نمونه از مقطع کانال[۱] ۱۹
شکل ۱-۳) انواع چرخش یا در ECAP[۱]..... ۲۰
شکل ۱-۴) بکاربردن فرایند ECAP برای استحکام بخشی به مفتول فلزی، یک چرخ با شیار مربعی، مفتول با مقطع گرد را به دور چرخ و درون شیار پیچانده و با فشار به یک کانال زاویه دار هدایت می نماید[۲۲]..... ۲۱
شکل ۱-۵) شماتیک فرایند ECAP ممتدبرای ورق به ابعاد۲m*۱۹mm*mm ۲ به همراه قالب و تجهیزات آن[۲۳]..... ۲۲
شکل ۱-۶) ریز ساختار ورق شکل قبل که در ۱ الی ۴ پاس از چپ به راست ECAP شده است و تغییرات ساختاری درون آن کاملا نشان از روند بهبود ساختار دارد. [۲۳]..... ۲۲
شکل ۱-۷ نمونه های فورج، سمت چپ : ماده اولیه ECAP شده و دمای آهنگری ۳۶۰سمت راست : ماده اولیه خام بدون ECAP و دمای آهنگری ۴۱۰ [۲۴]..... ۲۴
شکل ۱-۸ : اصول پرس کاری در کانال های هم مقطع با زاویه Φ میان دو کانال و زاویه Ψ، قوس بیرونی دو کانال متقاطع. [۱]..... ۲۵
شکل ۱-۹: نمودار مربوط به معادله ۲-۱[۱]..... ۲۶
شکل ۱-۱۰) (بالا) : استفاده ازیک سنبه با فشار اعمالی p_2 و (پایین) : یک ماده ویسکوز داکتیل متوسط، برای اعمال فشار از پشت بر نمونه[۱]..... ۲۹
شکل ۱-۱۱ سه نوع طرح کانال اصلی، (الف) نوع معمولی که در آن بیلت با تمام سطوح کانال در تماس و در معرض اصطکاک است. (ب) نوع بستر همراه که درآن اصطکاک میان کف کانال و نمونه که بیشترین عامل مقاوم است حذف می شود و سنبه از دو طرف نمونه را در بر می گیرد. (ج) نوع سنبه همراه که در آن سه سطح بیلت بدون اصطکاک با دیواره کانال است و استحکام سنبه هم زیاد است[۲۵]..... ۳۱
شکل ۱-۱۲ اندازه تعادلی دانه ها در دماهای متفاوت ECAP، برای سه نوع ماده مختلف [۲۶]..... ۳۳
شکل ۱-۱۳ مقایسه میان زوایای کانال و قوس بیرونی مختلف در قالب و تاثیر آنها بر ریز ساختار [۲۷]۳۳
شکل ۱-۱۴ : نتایج میکروسکوپی بدست آمده ازآلیاژ آلومینیم پرس شده درون کانالهای با زوایای شکل ۱-۱۳[۲۷]..... ۳۴
شکل ۱-۱۵ تغییرات تنش سیلان بر اثر سرعت های اعمال شده بر آلیاژ Al-%۱Mg. در دمای اتاق و در پاسهای چهارتایی[۲۸]..... ۳۵
شکل ۲-۱ (الف) مونتاژ قالب با ابعاد کلی و (ب) قسمتهای داخلی و اجزای قالب..... ۴۰

شکل ۲-۲ قطعه اصلی A که در بر دارنده کانال خروجی در حالت باز شده وقوس ایجاد شده روی آن دیده می شود. ۴۱
شکل ۲-۳ نحوه قرارگیری سنبه درون قالب و اکستروژن آلومینیم که نمونه پس از پرس کاری به راحتی از سمت دیواره باز کانال خارج می شود. ۴۲
شکل ۲-۴ تهیه نمونه از پروفیلهای اولیه خام. ۴۳
شکل ۲-۵) نمودار روند آزمایش ECAP بدون هیچ عملیات حرارتی را نشان می دهد. خروجی آزمایش ۵ نمونه با کدهای مشخص شده است که در شکل از N۰ تا N۴ مشخص است. ۴۴
شکل ۲-۶)نمودار روند ECAP و پیرسازی ۳ نمونه و ترتیب کار را نشان می دهد. ۴۵
شکل ۲-۷ دستگاه پرس استفاده شده با کامپیوتر متصل به آن ۴۶
شکل ۲-۸) نقاط آزمایش سختی را نشان می دهد: A,B,C به ترتیب وجوه سه گانه اندازه گیری بر روی نمونه را نشان می دهد بر روی هر سطح سه نقطه سختی سنجی شد. ۴۷
شکل ۲-۹) نمونه های آماده شده برای تست کشش. ۴۸
شکل ۲-۱۰) نمونه کششی و قطعات الحاقی (فیکسچر) برای بسته شدن به دستگاه کشش ۴۸
شکل ۲-۱۱) نمونه و فیکسچر بسته شده به دستگاه کشش ۴۹
شکل ۳-۱) نمودار نیرو جابجایی نمونه N۱ ۵۱
شکل ۳-۲) نمودار نیرو –جابجایی نمونه N۲ ۵۲
شکل ۳-۳) نمودار نیرو- جابجایی نمونه N۳ ۵۲
شکل ۳-۴) نمودار نیرو- جابجایی نمونه ۴ N ۵۳
شکل ۳-۵) نمودار نیرو- جابجایی نمونه WQE ۵۳
شکل ۳-۶) نمودار نیرو-جابجایی نمونه PO1 ۵۴
شکل ۳-۷) نمودار نیرو- جابجای نمونه PO۲ ۵۴
شکل ۳-۸) مقایسه سختی نمونه های ECAP شده،ECAP به همراه پیرسازی و نمونه حل سازی شده به همراه ECAP ۵۶
شکل ۳-۹) نمودار توزیع سختی نمونه های فقط ECAP شده روی نقاط مشخص شده در شکل ۲-۷۹
شکل ۳-۱۰) نمودار توزیع سختی نمونه های عملیات حرارتی و ECAP شده روی نقاط مشخص شده در شکل ۲-۹ ۵۷
شکل ۳-۱۱ نمودارهای حاصل از تست کشش و مقایسه آنها با نمونه خام. ۵۸
شکل ۳-۱۲) نمونه خام – رسوبات به صورت مجتمع و غیریکنواخت هستند. ۶۰
شکل ۳-۱۳) نمونه N ۱ - تجمع رسوبات تا حدی شکسته شده است . ۶۰
شکل ۳-۱۴) نمونه N۲- ذرات رسوبی ازنمونه N۱ بیشتر پخش شده اند. ۶۱
شکل ۳-۱۵) نمونه N3-توزیع رسوب از نمونه N۲ بهتر است . ۶۱
شکل ۳-۱۶) نمونه N۴،توزیع رسوب بهتر شده است ولی هنوز آثاری از تجمعات قبلی دیده می شود. ۶۲
شکل ۳-۱۷) نمونه WQ+ECAP توزیع رسوبات به نحو واضحی بهتر شده است. ۶۲
شکل ۳-۱۸) نمونه Po۱توزیع رسوب همگن تر از N1 است و نقاط تجمع کمتر دیده می شوند. ۶۳

شکل ۳-۱۹ نمونه Po۲ توزیع رسوب همگن تر ،ذرات ریزتر و تجمع رسوبات کمتر از قبل دیده می شـود. ۶۳.....

فهرست جدول‌ها

عنوان.....صفحه
جدول ۱-۱) تغییرات خواص مکانیکی مفتول آلومینیمی پس از ECAP[۲۲] ۲۱
جدول ۲-۱ در صد عناصر آلیاژ ۴۳
جدول ۳-۱ مقادیر منتج از نمودارهای آزمایش ECAP ۵۵

فصل ۱

مقدمه

۱-۱ استحکام بخشی مواد و ارتباط اندازه دانه با استحکام مواد

اگر چه خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مواد کریستالی تحت تاثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرد، اندازه متوسط دانه ها معمولا نقش مهمی در این زمینه دارد. بنابراین استحکام تمام فلزات چند کریستالی به اندازه دانه d وابسته است به طوریکه این اثر توسط رابطه Hall-Petch به روشنی بیان شده است :[۱]

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \qquad (۱-۱)$$

در این رابطه، σ_0 مربوط به تنش اصطکاکی و k_y یک ثابت سیلان است و σ_y استحکام تسلیم ماده است. مشاهده می شود که هر چه اندازه دانه کوچکتر گردد استحکام افزایش می یابد. این موضوع باعث می شود سعی درتولید موادی داشته باشیم که دانه هایشان تا حد امکان کوچک باشند. روشهای عملیات حرارتی برای حصول این هدف با اعمال آزمایشهای مکانیکی و حرارتی بکار رفته اند، اگر چه از این راه نمی‌توان برای تولید دانه های ریزتر از میکرومتر استفاده نمود. برای تعیین یک دید کلی ضرورت دارد تعریف مشخصی از مواد بادانه بندی بسیار ریز[۱] یا (UFG) داشته باشیم. با مراجعه به مشخصات مواد چند کریستالی، مواد بادانه بندی بسیار ریز موادی هستند که اندازه دانه ای کمتر از ۱ میکرون داشته باشند. برای مواد UFG، دو مشخصه همگنی و هم محوری قابل قبول، ریز ساختار و اصولا دارا بودن زاویه مرزدانه بزرگ بارزترین مشخصه ای است که باید دارا باشند تا خصوصیات مفید و یکسانی داشته باشند[۱].

۱-Ultra fine grined

۱-۲ روشهای ایجاد مواد بادانه بندی بسیار ریز UFG

دو روش ایجاد مواد UFG تاکنون توسعه یافته است. روشهای میکروسکوپیک یا ایجاد از مقیاسهای ابعاد ریز تا تشکیل ساختارماکروسکوپیک نهایی(از پایین به بالا)(BOTTOM_UP). و روشهای ماکروسکوپیک یا ایجاد ازطریق اعمال راههای معمول و تشکیل ساختار ریز در درون مواد (از بالا به پایین)(TOP_DOWN) [۱]. در روش اول مواد با کنار هم قرار دادن اتمها به صورت تک تک یا یکی کردن (کنار هم قرار دادن) نانو ذرات جامد ایجاد می‌شوند، مانند روش متراکم کردن گاز خنثی و رسوب دهی روی الکترود. این شیوه مستلزم تولید ذرات ریز است که در نتیجه محدودیت تولید قطعات بزرگتر و استفاده از دستگاههای الکترونیکی را الزامی می‌نماید و همچنین عیب وجود تخلخل همواره موجب محدودیت در کیفیت نهایی قطعات خواهد بود. تحقیقات اخیر نشان داده که این نوع مواد را می‌توان با روش رسوب دادن و فشار ایزوستاتیک داغ به همراه عملیات اکستروژن بعدی تولید نمود ولی این عملیات پر هزینه بوده و برای کاربرد های صنعتی روی ساختمان آلیاژی مواد و در مقیاس بزرگ ساده و مناسب نیست.

روش - بالا به پایین- یک شیوه متفاوتی است زیرا در آن ریز ساختار یک ماده درشت دانه از طریق کرنش سنگین یا شوک بار (نیرو) ایجاد می‌گردد. در این روش برخلاف روش اول از آلودگی ها و ناخالصیهای مضر در ساختار جلوگیری شده و بعلاوه این روش برای تعداد وسیعی از آلیاژها بکار می‌رود. اولین تحقیقات و مقالات در زمینه انجام انواع عملیات بالا به پایین در سالهای ۱۹۹۰ در زمینه مواد خالص و آلیاژی گزارش شده است. ابتدا این تحقیقات بر موضوع قابلیت اعمال کرنش خیلی زیاد متمرکز بودند که برای تولید مواد بیلت، با خصوصیات ریز ساختار همگن و هم محوربا اندازه دانه های کمتر از میکرومتر اعمال می‌شود [۱].

برای تبدیل یک ماده فلزی با دانه های درشت به دانه بسیار ریز، توجه به دو مساله مهم، ضروری است که عبارتند از: اعمال کرنش بسیار زیاد جهت افزایش دانسیته نابجایی و متعاقب آن افزایش تعداد نابجاییها و تشکیل مرزدانه های جدید. در عمل، روشهای معمول مانند نورد و اکستروژن

محدودیت در ایجاد ریز ساختار دارند که به دو دلیل است: اول اینکه این روشها در میزان کرنش اعمال شده به دلیل کاهش مقطع ماده محدود می‌باشند، دوم اینکه میزان کرنشهای اعمالی در روشهای معمول، به دلیل پایین بودن قابلیت تحمل کرنش در دمای پایین، کم می‌باشد. به دلیل این محدودیتها توجه ها بر آن بوده که از روشهایی استفاده نمود که بر پایه تغییر فرم شدید یا SPD[1] باشند. به طوریکه می توان کرنشهای شدید بر ماده در دماهای پایین اعمال نمود بدون اینکه ماده متحمل آسیب گردد.

استفاده از اعمال تغییر شکل سنگین برای بدست آوردن مواد با خصوصیات بالا سابقه تاریخی دارد که به چین باستان برمی گردد. تولید محصولات آهنگری فولاد با کیفیت بالا در دمشق در خاور میانه وتولید فولاد افسانه ای در هند باستان نیز سابقه تاریخی این روشها را نشان می دهند. با اینحال از دیدگاه علم مدرن توسعه وسیع و حساس در زمینه SPD در پنجاه سال اخیر در ایالات متحده آمریکا به وسیله بریجمن اتفاق افتاده است [۱]. در این آزمایشها فلزات در اثر اعمال فشار بالا در معرض تغییر شکل زیاد قرارگرفتند تا خصوصیات مکانیکی موادی که نسبتا شکننده هستند به طور پایدار بهبود یابد. برای مثال در کارهای انجام یافته، بریجمن دیسکهای فلزی رابرای متمایز کردن فشارهای بالا و برای همزمان کردن کرنش پیچشی با استفاده از یک روش که اکنون از آن بعنوان عملیات SPD کلاسیک بحث می گردد، بکار برد. با اینحال، اگر چه بریجمن عامل بالقوه ای را برای بدست آوردن تغییر شکل بهتر از راه اعمال فشارهای زیادارائه داد، ولی بیشترین فشار بکار رفته GP ۰/۲ بود که برای تولید خصوصیات استثنایی ناکافی بود. از اینرو، این کار دلیلی برای گرایش به کارهایی در این زمینه در قدمهای اولیه گردید[۱].

---

۱. Sever Plastic Deformation

۱-۲-۱ انواع روشهای SPD

پس از این کارهای ابتدایی، روشهای بسیاری برای SPD ارایه شده وتوسعه یافته اند[۲]. این روشها شامل:

- پرسکاری در کانالهای هم مقطع زاویه دار (ECAP) ،
- پیچش تحت کرنش بالا(HPT) [۱]،
- اکستروژن پیچدار یا پیچشی ،
- فشرده سازی و اکستروژن چرخه ای یا سیکلی،
- خم و راست کردن مکرر(RCS)[۲]،
- اکستروژن رفت و برگشتی (CEC) [۳]،
- آهنگری چند جهتی (MF) [۴] و
- نورد تجمعی پیوسته (ARB) [۵].

تمام این روشها قادر به ارائه کرنش پلاستیک زیاد و مشخصا ریز دانه نمودن جامدات کریستالی به شکل بیلت می باشند. برخی از این روشها مانند ECAP, HPT وARB ، در واقع برای تولید دانه های فوق ریز شناخته شده اند، ریزساختار ایجاد شده اندازه دانه ای در محدوده تقریبی ۵۰۰-۷۰ نانو متر دارد. روشهای دیگر هم برای این هدف درحال توسعه می باشند.

۱-۳ معرفی فرایند ECAP

از میان روشهای فوق،ECAP به دلایل زیر یک تکنیک جذاب است :

---

۱ -high-pressure torsion
۲ -repetitive corrugation and straightening
۳- Cyclic extrusion-Compression
٤ -*Multi axial Forging*
٥ -Accumulative Roll- Bonding

۱- برای بیلتهای نسبتا بزرگ قابل استفاده بوده وبرای فلزاتی باکاربردهای ساختمانی می تواند بکار رود.

۲ -یک فرآیند نسبتا ساده است که بر روی محدوده وسیعی از آلیاژها بکار می رود و به استثنای برخی محدودیتهای قالب، تجهیزات مورد استفاده آن در بیشتر آزمایشگاهها قابل دسترسی می‌باشد.

۲- برای مواد با ساختار کریستالی مختلف و مواد مختلف از آلیاژهای سختی رسوبی شونده تا مواد بین فلزی و کامپوزیتهای زمینه فلزی می تواند استفاده گردد.

۳- یکنواختی قابل قبولی از کل بیلت آماده شده با کرنش زیاد بدست می آید.

۴- فرآیند می تواند برای مواد با مقیاس بزرگتر بکار رفته و قابلیت توسعه برای تبدیل به یک فرایند تولید فلز تجاری را دارد.

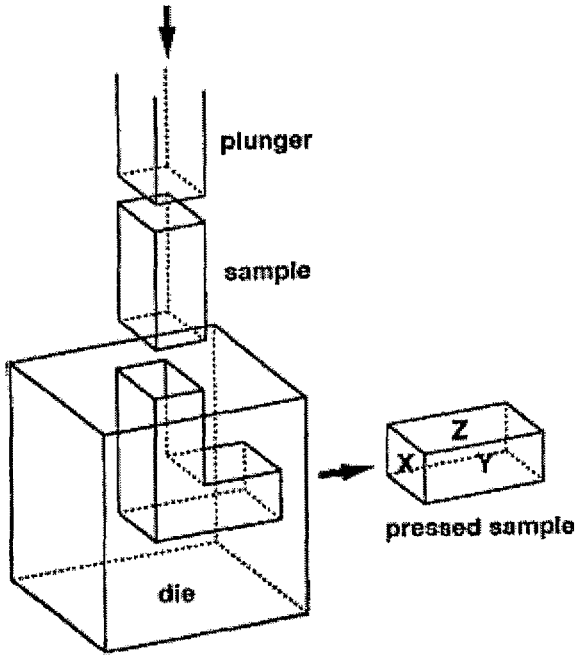
این فرایند که با نام اکستروژن در کانالهای هم مقطع زاویه دار هم خوانده شده(ECAE)[۱]، اولین بار به وسیله سگال و همکاران [۳] او در دهه های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ در انستیتو مینسک معرفی شد. هدف اصلی در آن زمان توسعه یک فرآیند شکل دهی بود که بیلت های فلزی را تحت برش ساده با کرنش بالا تولید نماید. این هدف اگر چه با موفقیت بدست آمده بود ولی نتایج ابتدایی بدست آمده تنها محدود به ارائه در مجامع علمی بود. این وضعیت در دهه ۱۹۹۰ هنگامی که گزارشهایی از استفاده از فرآیند ECAP و تولید فلزات ریزدانه با خصوصیات جدید و یکنواخت ارائه شد، تغییر یافت و این روند درحال پیشرفت تحقیقاتی و علمی بوده و در جهت کاربری صنعتی نیز رو به پیشرفت می باشد.

در بسیاری از تحقیقات انجام شده مبانی جاری شدن فلز در حین فرآیند توضیح داده شده است. با توجه به شکل(۱-۱) که کانال داخل قالب را نشان می دهد، نمونه ای که می تواند به شکل میله ای یا

---

۱ Equal Channel Angular Extrusion

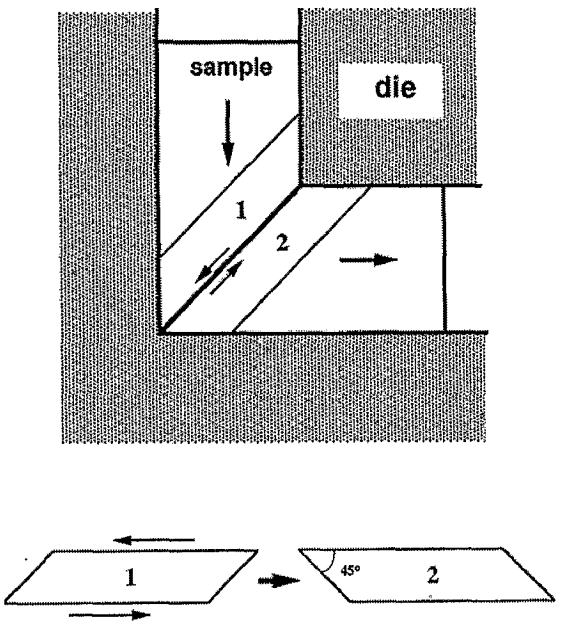
چهار گوش باشد، با فشار یک سنبه از داخل کانال عبور می کند. طبیعت تغییر شکلی که بر نمونه اعمال می گردد برش ساده ای است که اتفاق می افتد که در شکل (۱-۲)نشان داده شده است. برای سادگی، زاویه قالب در شکل(۱-۲)، ۹۰ درجه نشان داده شده است، دو المان داخل نمونه با یک صفحه برشی که نشان داده شده جدا شده اند و نمونه با عبور از کانال و ایجاد برش در امتداد این صفحه به قسمت پایین منتقل می گردد.



شکل ۱-۱) شمای ساده یک کانال *ECAP* و سه سطح مهم نمونه*[۴]*

با وجود اعمال کرنش برشی شدید در هنگام عبور از کانال، نمونه ابعاد مقطع و شکل اولیه خود را حفظ می کند[۴]. همچنین در شکل(۱-۱) سه صفحه متعامد نمایش داده شده است، صفحات X یا صفحه عرضی که عمود بر جهت جریان فلز است، صفحات Y یا صفحه جریان که موازی دیواره جانبی کانال خروجی است و صفحه Z یا صفحه طولی که موازی با سطح بالایی کانال خروجی است، همانطور که قبلا هم اشاره شد عدم تغییر ابعاد در مقطع نمونه در هنگام عبور از کانال، مشخصه ویژه فرآیند ECAP است و این فرآیند را از دیگر انواع آن مانند نورد و اکستروژن متمایز می سازد. به همین دلیل نمونه می‌تواند مکررا از داخل کانال عبور داده شود تا مقادیر کرنش بالایی بدون اینکه از

شکل اولیه خارج گردد حاصل شود. بعنوان مثال با پرسکاری مکرر، سیستمهای لغزشی متعددی در هر پاس متوالی ظاهر می‌شود. در عمل تحقیقات زیادی بر روی نمونه هاي با مقاطع مربع انجام شده است[۱].



شکل ۱-۲) اعمال برش ساده و فعال شدن سیستمهای لغزشی در حین عبور نمونه از مقطع کانال*[1]*

برای این نمونه ها چرخش ۹۰ درجه نمونه ها بین هر پاس ساده می باشد. همچنین نمونه های گرد نیز می توانند تحت ECAP قرار گیرند. در کل ۴ نوع عبور دادن (Route) نمونه ها از کانال وجود دارد که از این پس به آن چرخش می گوییم(شکل۱-۳)

- چرخش A _ که در آن نمونه بدون چرخش و پشت سر هم در کانال پرس می شود. یعنی نمونه پس از هربار در آمدن از کانال بدون اینکه حول محور خود دوران داده شود دوباره به داخل همان کانال پرس می شود.
- چرخشB_A_که نمونه ها پس از هربار بیرون آمدن از کانال با زاویه ۹۰ در جه در دو جهت گردش عقربه های ساعت یا خلاف آن حول محور خود چرخانده و داخل کانال پرس می شوند.