



دانشگاه مازندران

مجتمع آموزش عالی و فنی مهندسی نوشیروانی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک-ساخت و تولید

شبیه سازی فرآیند اکستروژن در کانالهای هم مقطع زاویه دار (ECAP) و بهینه سازی پارامترهای آن

امید ابراهیمی کهریز سنگی

اساتید راهنما:

دکتر سید جمال حسینی پور

دکتر محمد بخشی جویباری

استاد مشاور:

دکتر سلمان نوروزی

شهریور ۸۷



ملکا ذکر تو گویم که تو پاکی و خدایی
همه درگاه تو جویم همه از فضل تو پویم

نروم جز به همان ره که توام راهنمایی
همه توحید تو گویم که به توحید سزایی
(حکیم سنایی غزنوی)

تقدیم به بهترین نعمتهای زندگی،

پدر و مادر مهربانم

خانواده عزیزم و

همه کسانی که دوستشان دارم.

سپاس‌گزاری

بر خود واجب می‌دانم از اساتید محترم جناب آقای دکتر سید جمال حسینی پور و جناب آقای دکتر محمد بخشی جویباری اساتید محترم راهنما و جناب آقای دکتر نوروزی استاد مشاور به خاطر راهنمایی‌های صمیمانه و کمک‌های دلسوزانه ایشان در طول مدت انجام این پژوهش، کمال تشکر و قدردانی را بنمایم. همچنین از همیاری و همفکری‌های خانم مهندس تقوا دانشجوی دانشگاه صنعتی اصفهان سپاسگزارم و از ایزد یکتا سلامتی و خرسندی همه این عزیزان را خواستارم.

چکیده

با پیشرفت علم و تکنولوژی و با ساخت تجهیزات و ماشین آلات جدید، نیاز به موادی با خواص بهتر و بالاتر از مواد معمولی روز به روز بیشتر می‌شود. تحقیقات نشان داده است که مواد با ساختار ریز و در حد نانومتر خواص فوق العاده ای از خود نشان می‌دهند که جوابگوی نیازهای جدید صنعت می‌باشد، از این رو تلاشهای زیادی برای تولید صنعتی و اقتصادی مواد ریز ساختار و نانو ساختار در حال انجام می‌باشد. یکی از روش‌هایی که به این منظور در چند دهه اخیر ابداع شده، روش اکستروژن در کانالهای هم مقطع زاویه دار است که اصول کار آن اعمال کرنش‌های برشی شدید به ماده است. موفقیت این روش بستگی به انتخاب صحیح پارامترهای آن و طراحی مناسب قالب دارد که این امر میسر نمی‌گردد مگر با تجربه وسیعی و خطای بسیار و یا با استفاده از شبیه سازی کامپیوتری که در سالهای اخیر کارایی خود را ثابت کرده است.

در این پژوهش با ایجاد یک مدل کامپیوتری متشکل از شبیه سازی المان محدود و مدلسازی ریزساختار، تاثیر پارامترهای مختلف روی فرایند و ریزساختار حاصل بررسی شده است. همچنین بهترین شرایط برای انجام فرایند روی آلومینیم خالص تجاری جهت دستیابی به ساختار نانویی مشخص شده است. صحت کلیه مراحل شبیه سازی و مدلسازی با مقایسه نتایج با آزمایشات عملی دیگران به اثبات رسیده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مهمترین فاکتور در این فرایند میزان کرنش اعمالی به قطعه کار و چگونگی توزیع آن می‌باشد که زاویه کانال بیشترین تاثیر را روی آن دارد و افزایش آن باعث کاهش کرنش اعمالی و نهایتاً درشت تر شدن اندازه دانه می‌شود، زاویه گوشه روی نیروی شکل دهی و یکنواختی خواص تاثیر دارد و بایستی کوچک انتخاب گردد، اصطکاک فقط روی نیروی شکل دهی تاثیر دارد و همچنین بهترین مسیر انجام فرایند مسیر Bc می‌باشد، در مورد تعداد مراحل انجام فرایند نیز نقطه بهینه ای وجود دارد که در مورد آلومینیم مورد مطالعه، ۸ مرحله بدست آمد. نهایتاً ریزساختار و اندازه دانه حاصل از فرآیند و عملیات حرارتی آن مشخص گردید.

واژگان کلیدی: فرآیند اکستروژن در کانالهای هم مقطع زاویه دار^۱، شبیه سازی المان محدود،

مدلسازی ریزساختار^۲، تبلور مجدد استاتیکی^۳. نانوفلزات

¹ Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

² Microstructural Modeling

³ Static Recrystallization

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل ۱ مقدمه	۱۳
۱-۱ مقدمه	۱۴
۲-۱ فرآیند اکستروژن در کانالهای هم مقطع زاویه دار	۱۵
۳-۱ پارامترهای مؤثر در فرآیند	۱۷
۱-۱-۱ تأثیر زاویه کانال	۱۸
۲-۳-۱ - تأثیر زاویه گوشه (زاویه انحناء)	۲۰
۳-۳-۱ تأثیر سرعت اعمال بار (سرعت شکل دهی)	۲۰
۴-۳-۱ تأثیر فشار معکوس	۲۱
۵-۳-۱ نوع مسیر انجام فرآیند ECAP و تأثیر آن بر فرآیند	۲۱
۴-۱ - خواص و ریز ساختار حاصل پس از ECAP	۲۲
۵-۱ انواع ECAP	۲۴
۱-۵-۱ ECAP سنتی یا معمولی	۲۵
۲-۵-۱ ECAP با استفاده از قالب چرخان	۲۵
۳-۵-۱ ECAP با استفاده از قالب های چند کاناله	۲۵
۴-۵-۱ ECAP پیوسته	۲۵
۶-۱ مدلسازی ریز ساختار و مکانیزمهای مؤثر بر ریز شدن ساختار	۲۷
۱-۶-۱ فرایندهای ترمیم در ECAP	۲۷
۲-۶-۱ تئوری فرآیند تبلور مجدد و اصول تبلور مجدد استاتیکی [۲۵]	۲۸
۳-۶-۱ قوانین تبلور مجدد	۲۹
۴-۶-۱ مدل JMAK در سینتیک تبلور مجدد اولیه	۳۰
۵-۶-۱ مدلسازی کامپیوتری ریز ساختار	۳۲
۷-۱ تحقیقات انجام شده روی ECAP با استفاده از شبیه سازی	۳۳
۸-۱ شرح مسئله و هدف از انجام پژوهش	۳۶
فصل ۲ شبیه سازی اجزای محدود و مدلسازی ریز ساختار	۳۸
۱-۲ مقدمه	۳۹
۲-۲ خصوصیات و فرضیات صورت گرفته	۴۰
۱-۲-۲ خواص مکانیکی قطعه کار	۴۰
۲-۲-۲ ابعاد قطعه کار:	۴۱
۳-۲-۲ فرضیات و مشخصات کلی	۴۱
۴-۲-۲ نوع و تعداد بهینه المان	۴۱
۵-۲-۲ شبیه سازی شرایط تماس	۴۳

۴۳	.....انتخاب مقدار مناسب ضریب افزایش جرمی
۴۴	.....۷-۲-۲ المان بندی مجدد
۴۵	.....۳-۲ مراحل مختلف شبیه سازی
۴۵	.....۱-۳-۲ مرحله اول، شبیه سازی اولیه و پایه
۴۶	.....۲-۳-۲ مرحله دوم، شبیه سازی تاثیر زاویه کانال
۴۸	.....۳-۳-۲ مرحله سوم، شبیه سازی تاثیر زاویه گوشه
۴۸	.....۴-۳-۲ مرحله چهارم، بررسی تاثیر شعاع لبه کانال
۴۹	.....۵-۳-۲ مرحله چهارم، بررسی اثر اصطکاک
۵۰	.....۶-۳-۲ مرحله پنجم، شبیه سازی تاثیر نوع مسیر انجام فرآیند
۵۳	.....۷-۳-۲ مرحله ششم، شبیه سازی تاثیر تعداد پاس انجام فرآیند
۵۳	.....۴-۲ مدلسازی ریزساختار در فرآیند ECAP
	.....۱-۴-۲ مدل ریزساختار مناسب برای فرآیند ECAP (ضرائب مناسب رابطه اورامی برای
۵۳	.....فرآیند ECAP)
۵۳	.....۲-۴-۲ وارد کردن مدل پیش بینی ریز ساختار در نرم افزار ABAQUS
۵۸	.....فصل ۳ نتایج و بحث
۵۹	.....۱-۳ بررسی توزیع کرنش
۶۱	.....۲-۳ بررسی اثر زاویه کانال
۶۳	.....۳-۳ بررسی اثر زاویه گوشه
۶۴	.....۴-۳ تاثیر ایجاد فیلت در لبه کانال
۶۵	.....۵-۳ بررسی تاثیر اصطکاک
۶۶	.....۶-۳ بررسی تاثیر نوع مسیر
۶۶	.....۷-۳ بررسی تاثیر تعداد پاس
۶۷	.....۸-۳ نتایج مدلسازی ریز ساختار
۶۷	.....۱-۸-۳ بررسی صحت مدل
۶۸	.....۲-۸-۳ بررسی تاثیر پارامترهای مختلف روی اندازه دانه و توزیع آن
۷۴	.....فصل ۴ نتیجه گیری و پیشنهادات
۷۵	.....۱-۴ نتیجه گیری
۷۶	.....۲-۴ پیشنهادات
۷۷	.....مراجع
۸۱	.....پیوست الف

فهرست شکل‌ها

عنوان.....	صفحه.....
شکل ۱-۱ شمای کلی از یک قالب ECAP [۹]	۱۶
شکل ۲-۱ چگونگی تغییر شکل یک المان مربعی از قطعه کار در قالب ECAP [۱۰]	۱۸
شکل ۳-۱ تغییرات کرنش ایجاد شده بر اساس زاویه کانال و زاویه گوشه طبق رابطه (۳-۱) [۱۱]	۱۹
شکل ۴-۱ بررسی تجربی تاثیر زاویه گوشه روی کرنش [۱۳]	۲۰
شکل ۵-۱ تنش تسلیم نمونه های ECAP شده در سرعت های مختلف و در تعداد پاسهای متفاوت [۱۴]	۲۱
شکل ۶-۱ مسیرهای متداول در انجام ECAP [۱۶]	۲۲
شکل ۷-۱ نمودارهای تنش کرنش مهندسی نمونه های مسی بدون عملیات شکل دهی، نورد شده و ECAP شده با ۱۶ و ۲ پاس [۱۷]	۲۳
شکل ۸-۱ حساسیت به نرخ کرنش سوپرپلاستیک Mg-9%Al نمونه معمولی، اکستروژن شده و اکستروژن و ECAP شده [۱۹]	۲۴
شکل ۹-۱ ECAP با استفاده از قالب چرخان الف) حالت اولیه ب) پاس اول ج) چرخش ۹۰ درجه قالب برای انجام پاس دوم [۲۰]	۲۵
شکل ۱۰-۱ اصول فرآیند DCAP برای انجام ECAP پیوسته ورق [۲۰]	۲۶
شکل ۱۱-۱ نمای شماتیک از فرآیند ECAP سیم [۲۳]	۲۶
شکل ۱۲-۱ تفکیک ساختار به دو بخش تبلور مجدد یافته و تبلور نیافته در حین تبلور مجدد الف) ساختار تغییر شکل یافته قبل از بازیابی ب) وقوع بازیابی و تشکیل زیرساختار سلولی ج) تشکیل اولین جوانه های تبلور مجدد د) تکمیل تبلور مجدد ه) رشد نرمال دانه و) رشد غیر نرمال دانه [۲۵]	۲۸
شکل ۱۳-۱ نمودار سینتیک تبلور مجدد [۲۴]	۲۹
شکل ۱۴-۱ نمودار تغییرات کرنش موثر با تغییر زاویه کانال، شبیه سازی و تئوری [۳۱]	۳۳
شکل ۱۵-۱ افزایش دمای قطعه کار در طول فرآیند ECAP در سرعت های مختلف شکل دهی [۳۳]	۳۴
شکل ۱۶-۱ تغییرات کرنش فشاری در سطح مقطع عرضی قطعه کار ECAP شده در مواد مختلف [۳۴]	۳۴
شکل ۱۷-۱ تغییرات کرنش بر حسب تغییر زاویه کانال، چپ) سطح مقطع طولی، راست) سطح مقطع عرضی قطعه کار [۳۵]	۳۵
شکل ۱۸-۱ مقادیر پارامتر شبکه پیش بینی شده و اندازه گیری شده بر حسب تغییرات کرنش معادل [۳۷]	۳۶
شکل ۱۹-۱ نمودار تغییرات کرنش پلاستیک حاصل از شبیه سازی بر اساس تعداد المان استفاده شده در شبیه سازی دوبعدی	۴۲
شکل ۲۰-۱ نمودار تغییرات کرنش پلاستیک حاصل از شبیه سازی بر اساس تعداد المان استفاده شده در شبیه سازی سه بعدی	۴۳

- شکل ۱-۲۱ استفاده از روش معدل گیری حجمی برای بهبود پیچیدگی المانها..... ۴۵
- شکل ۱-۲۲ مدل شبیه سازی شده قطعه کار و قالب قبل از تغییر شکل..... ۴۶
- شکل ۱-۲۳ توزیع کرنش در قطعه ECAP شده در قالب با زاویه کانال ۹۰ درجه و زاویه گوشه ۲۸ درجه..... ۴۶
- شکل ۱-۲۴ کرنش معادل پلاستیک در قالبهای با زاویه گوشه ۲۸ درجه و زاویه کانال ۸۰، ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰، ۱۲۰، ۱۳۰، ۱۴۰ و ۱۵۰ درجه..... ۴۷
- شکل ۱-۲۵ کرنش معادل پلاستیک در قالبهای با زاویه کانال ۹۰ درجه و زاویه گوشه ۰، ۱۳، ۲۸، ۳۷، ۴۶ و ۶۷ درجه..... ۴۸
- شکل ۱-۲۶ کرنش پلاستیک ایجاد شده در قالب دارای فیلت ۴ میلیمتر در لبه کانال..... ۴۹
- شکل ۱-۲۷ مقایسه شبیه سازی ECAP و توزیع کرنش الف) بدون در نظر گرفتن اصطکاک ب) با ضریب اصطکاک ۰/۲۵..... ۴۹
- شکل ۱-۲۸ مسیر A..... ۵۰
- شکل ۱-۲۹ مسیر Ba..... ۵۱
- شکل ۱-۳۰ مسیر Bc..... ۵۱
- شکل ۱-۳۱ مسیر C..... ۵۲
- شکل ۱-۳۲ قطعه ECAP شده در قالب با مسیر Bc پس از سه پاس به همراه نمایش مقدار کرنش و توزیع آن..... ۵۲
- شکل ۱-۳۳ معرفی رابطه مربوط به محاسبه پارامتر زرن هلومان به نرم افزار ABAQUS..... ۵۴
- شکل ۱-۳۴ معرفی رابطه محاسبه اندازه دانه به نرم افزار ABAQUS..... ۵۵
- شکل ۱-۳۵ فلوجارت چگونگی شبیه سازی و پیش بینی ریزساختار در فرآیند ECAP..... ۵۶
- شکل ۱-۳۶ مکانهای اندازه گیری کرنش در سطح مقطع طولی ab و عرضی cd در قطعه ECAP شده..... ۵۹
- شکل ۱-۳۷ توزیع کرنش در یک سطح مقطع طولی قطعه کار..... ۵۹
- شکل ۱-۳۸ توزیع کرنش در یک سطح مقطع عرضی قطعه کار..... ۶۰
- شکل ۱-۳۹ نیروی لازم در طول فرآیند..... ۶۱
- شکل ۱-۴۰ نمودار تغییرات کرنش بر اساس تغییرات زاویه کانال..... ۶۲
- شکل ۱-۴۱ نمودار تاثیر زاویه کانال روی نیروی پرس..... ۶۲
- شکل ۱-۴۲ تغییر یکنواختی توزیع کرنش با تغییر زاویه کانال..... ۶۳
- شکل ۱-۴۳ نمودار تغییرات کرنش بر حسب زاویه گوشه..... ۶۳
- شکل ۱-۴۴ نمودار تغییرات نیروی اعمالی به سنبه بر حسب زاویه گوشه..... ۶۴
- شکل ۱-۴۵ تغییر یکنواختی توزیع کرنش با تغییر زاویه گوشه..... ۶۴
- شکل ۱-۴۶ اثر اصطکاک روی کرنش..... ۶۵
- شکل ۱-۴۷ تغییرات نیروی لازم برای انجام فرآیند با تغییر مقدار ضریب اصطکاک..... ۶۵
- شکل ۱-۴۸ تاثیر تعداد پاس انجام فرآیند روی کرنش حاصل..... ۶۶
- شکل ۱-۴۹ اندازه دانه ایجاد شده پس از ECAP، شبیه سازی و تجربی..... ۶۷

- شکل ۵۰-۱ استحکام تسلیم قطعه ECAP شده بر حسب تعداد پاس انجام فرایند..... ۶۸
- شکل ۵۱-۱ اندازه دانه شبیه سازی شده روی نمونه ECAP شده با زاویه کانال ۹۰ درجه، بر حسب میکرومتر..... ۶۹
- شکل ۵۲-۱ اندازه دانه شبیه سازی شده روی نمونه ECAP شده با زاویه کانال ۱۱۰ درجه، بر حسب میکرومتر..... ۶۹
- شکل ۵۳-۱ اندازه دانه شبیه سازی شده روی نمونه ECAP شده با زاویه کانال ۱۵۰ درجه، بر حسب میکرومتر..... ۷۰
- شکل ۵۴-۱ تغییرات اندازه دانه نمونه ECAP شده در قالب های با زاویه کانال های مختلف و زاویه گوشه ۲۸ درجه، بدست آمده از مدلسازی ریزساختار..... ۷۱
- شکل ۵۵-۱ تغییرات اندازه دانه نمونه ECAP شده در قالب های با زاویه کانال ۹۰ درجه و زاویه گوشه متغییر، بدست آمده از مدلسازی ریزساختار..... ۷۱
- شکل ۵۶-۱ تاثیر تعداد پاس انجام فرآیند ECAP روی اندازه دانه نهایی با استفاده از مسیر Bc..... ۷۳

فهرست جداول

عنوان.....	صفحه.....
جدول ۱-۱ تغییرات اندازه دانه و تنش تسلیم آلیاژ آلومینیم با تغییر تعداد پاس انجام فرایند [۱۸]	۲۳
جدول ۲-۱ خواص مکانیکی Al%99.9 طبق DIN 1790	۴۰
جدول ۳-۱ ضرائب رابطه کار سختی آلومینیم AL99.9 [۱۳]	۴۰
جدول ۴-۱ ماکزیمم کرنش حاصل و یکنواختی آن در مسیرهای مختلف پس از سه پاس انجام فرآیند..	۶۶
جدول ۵-۱ مینیمم اندازه دانه حاصل پس از سه پاس ECAP نمونه در قالب های با مسیرهای مختلف و مقدار یکنواختی آن	۷۲

علائم اختصاری

نماد	عبارت
ECAP	Equal Channel Angular Pressing
UFG	Ultra Fin Grained
SPD	Sever Plastic Deformation
ARB	Accumulative Roll Bonding
HPT	High Pressure Torsion
RCS	repetitive corrugation and straightening
FSP	friction stir processing
SFSP	submerged friction stir processing
DCAP	Dissimilar channel Angular pressing
TEM	Transmission Electron Microscopy

فصل ۱

مقدمه

۱-۱ مقدمه

برای تولید مواد با خواص مکانیکی و فیزیکی ارتقایافته روشهای مختلفی استفاده می‌شود. مانند آلیاژ سازی عناصر مختلف که روش مرسوم می‌باشد که این روش علاوه بر هزینه بالای آن، دارای محدودیت در خواص محصول می‌باشد. این روشها معمولاً نمیتوانند خواص مورد نیاز ما را به خوبی بیشتر تأمین نمایند. عیب دیگر اینگونه روش ها آن است که با افزایش یکی از خواص ماده مثلاً استحکام، خواص دیگر مانند چقرمگی کاهش می‌یابد. راه حل دیگر استفاده از مواد با دانه بندی بسیار ریز (UFG^1) می‌باشد. همانطور که می‌دانیم با ریز شدن ساختار و دانه بندی مواد، خواص آنها به شدت تغییر می‌کند به عنوان مثال در مورد استحکام، طبق رابطه معروف Hall-petch هر چه قدر اندازه دانه (d) ریزتر باشد استحکام بالاتری حاصل می‌شود.

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

که σ_0 تنش اصطکاکی، k_y ثابت تسلیم و σ_y تنش تسلیم می‌باشد. [۱] بررسیهای مختلف نشان داده است که خواص مطلوب زمانی حاصل می‌شود که اندازه دانه مواد در حد میکرون و معمولاً زیر ۱ میکرون باشد به عبارت دیگر مواد حاصل در زیر مجموعه نانو مواد قرار می‌گیرند. [۲]

روشهای تولید مواد با دانه بندی بسیار ریز، به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول روشهایی که از ابتدا به تولید مواد با ساختار ریز و نانو می‌پردازد [۳]. روش کار آنها به این صورت است که از مونتاژ و ترکیب نانو ذرات، ماده مربوط ساخته می‌شود، در عمل این روشها قادر به تولید قطعات خیلی کوچک می‌باشند که فقط جوابگوی بعضی نیازهای صنعت الکترونیک است و قادر به تولید قطعات بزرگ صنعتی نمی‌باشد. همچنین هزینه قطعات تولیدی به این روش ها بسیار بالا می‌باشد. عیب دیگر این که فقط مواد خاصی قابل تولید هستند. دسته دوم روشهایی هستند، که با استفاده از اعمال کرنشهای خیلی سنگین و بارهای ضربه ای به مواد با دانه بندی معمولی، سبب ریز شدن ساختار و دانه بندی این مواد می‌شوند، مزیت عمده این روشها این است که هیچ محدودیتی در اندازه قطعه تولیدی وجود ندارد، از طرف دیگر توسط این روشها می‌توان دامنه زیادی از آلیاژهای مختلف را تولید کرد. اولین کارهای صورت گرفته در این زمینه مربوط به سالهای ۱۹۹۰ می‌باشد. [۴] این روشها به نام روشهای تغییر شکل پلاستیک خیلی شدید یا به اختصار SPD^۲ شناخته می‌شوند و هر روز روش جدید به این مجموعه اضافه می‌شود.

¹ Ultra fined grain

² Severe Plastic Deformation

در یک تقسیم بندی کلی می توان روشهای زیر را در این مجموعه قرار داد:

۱- فرآیند نورد تجمعی^۱ [۵]

۲- فرآیند اکستروژن در کانالهای هم مقطع زاویه دار [۶]

۳- پیچش فشاری^۲ [۷]

۴- فورج چند جهته^۳

۵- اکستروژن پیچشی^۴

۶- موج زنی و صافکاری تکرارشونده^۵

۷- فرآیند همزنی اصطکاکی^۶

۸- فرآیند همزنی اصطکاکی زیرپودری^۷

هر کدام از روشهای بالا دارای مزایا و معایب خاص خود هستند ولی همگی در حال گسترش و تحقیق می باشند و هیچ کدام منسوخ نشده اند، از بین روشها ی بالا، روش اکستروژن در کانالهای هم مقطع زاویه دار، (ECAP) مورد توجه زیادی قرار گرفته است که می توان بعضی مزایای آنرا نسبت به روشهای دیگر به شرح زیر بیان داشت :

- این روش را می توان بر بیلت ها و اشکال مختلف در اندازه های مختلف اعمال کرد و محدودیتی در شکل و اندازه قطعه کار ندارد.
- این روش را به دلیل سادگی فرآیند می توان به انواع مواد و آلیاژهای مختلف اعمال کرد.
- تجهیزات مورد استفاده در این روش بسیار ساده بوده و ساخت تجهیزات و قالبهای مورد استفاده آن راحت و ارزان می باشد.
- محصول بدست آمده از این روش دارای ساختاری نسبتاً همگن و یکسان در همه جای آن می باشد.
- این روش را می توان با دیگر روشهای مرسوم شکل دهی فلزات و پروسه های تولید ترکیب کرد. به عنوان مثال بسادگی می توان آنرا با فرآیند نورد ترکیب کرد.

۱-۲ فرآیند اکستروژن در کانالهای هم مقطع زاویه دار

فرآیند ECAP برای اولین بار توسط segal و همکارانش در دهه ۷۰ و ۸۰ میلادی معرفی شد. هدف آنها ابداع یک روش شکل دهی برای اعمال کرنش های زیاد به قطعه کار بود. ارزش و اهمیت

¹ Acomulative Roll bonding (ARB)

² high-pressure torsion (HPT)

³ multi-directional forging

⁴ twist extrusion

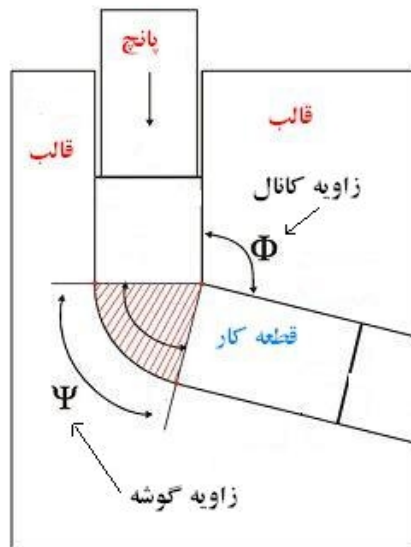
⁵ repetitive corrugation and straightening (RCS)

⁶ friction stir processing (FSP)

⁷ submerged friction stir processing (SFSP)

واقعی ECAP در دهه ۹۰ آشکار شد زمانی که محققان موفق به تولید آلیاژهای ریز دانه و نانو ساختار توسط این روش شدند و به دنبال آن باعث صنعتی شدن این فرایند شدند. [۸]

اصول ابتدایی و کلی روش ECAP همانطور که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است به این صورت می‌باشد که با عبور قطعه کار از یک کانال زاویه دار (معمولاً با زاویه نزدیک به ۹۰ درجه) باعث ایجاد کرنش برش بالایی در حدود یک در قطعه کار می‌شود. به دلیل این که ابعاد قطعه کار در طول فرایند تغییر نمی‌کند بنابراین می‌توان فرآیند را تکرار کرد به عبارت دیگر با تکرار فرآیند باعث انباشته شدن کرنش‌ها و نهایتاً دستیابی به کرنش‌های خیلی زیاد (معمولاً در حدود ۱۰) در قطعه کار می‌شود. که در مقایسه با دیگر روش‌های شکل دهی مثل نورد، فورج و... که کرنش‌ها در حدود (۰/۵ تا ۲) است، کرنش خیلی بالایی بدست می‌آید. این کرنش بالا آنچنان که در ادامه توضیح داده خواهد شد نقش اصلی را در ریز کردن ساختار ماده دارد.



شکل ۱-۱ شمای کلی از یک قالب ECAP [۹]

ریز شدن دانه‌ها پس از فرآیند ECAP با دو مکانیسم انجام می‌گردد، در مکانیسم اول که در زمان شکل دهی می‌باشد خود تغییر شکل برشی اعمال شده باعث خورد شدن و شکسته شدن دانه‌ها می‌شود، مکانیسم دیگر که از اهمیت بالایی نیز برخوردار است تشکیل دانه‌های بسیار ریز در مرحله عملیات حرارتی صورت گرفته پس از فرآیند می‌باشد. همانطور که می‌دانیم و در ادامه توضیح داده خواهد شد اندازه دانه ایجاد شده در فرآیند تبلور مجدد رابطه مستقیم با مقدار کرنش موجود در قطعه دارد و هر چه کرنش بیشتری داشته باشیم دانه ریزتری ایجاد خواهد شد. به عبارت دیگر با اعمال کرنش‌های برشی باعث افزایش چگالی نابجاییها در ماده و تجمع آنها در مرز دانه‌ها می‌شود، از طرف دیگر افزایش چگالی نابجاییها در ماده باعث افزایش انرژی داخلی ماده می‌شود، و ماده یک حالت

تقریباً ناپایدار پیدا می‌کند یا می‌توان گفت ماده از حالت تعادل انرژی خارج می‌شود. و به دنبال فرصتی برای رسیدن به تعادل می‌باشد که این فرصت در عملیات حرارتی، زمانی که دمای ماده به بالای دمای تبلور مجدد برده می‌شود ایجاد می‌گردد و این انرژی باعث ایجاد جوانه‌ها در ماده می‌شود و هر چه انرژی بیشتری در ماده موجود باشد چگالی جوانه ایجاد شده بیشتر شده و باعث ایجاد دانه‌های ریزتری می‌شود. البته باید مواظب رشد دانه‌های ایجاد شده بود و با یک سیکل کنترل شده از رشد بیش از اندازه آنها جلوگیری کرد. به همین دلیل عملیات حرارتی پس از فرآیند ECAP به اندازه خود فرآیند اهمیت دارد.

۳-۱ پارامترهای مؤثر در فرآیند

فرآیند ECAP نیز همانند دیگر فرآیندهای تولید دارای پارامترها و متغیرهایی می‌باشد به طور کلی پارامترهای مؤثر در فرآیند ECAP به سه دسته تقسیم می‌شوند الف) پارامترهای هندسی قالب که در شکل (۱-۱) نشان داده شده اند ب) پارامترهای فرآیند ج) پارامترهای دیگر مانند ترکیب اولیه ماده، ریزساختار اولیه و عملیات حرارتی قبل و بعد از فرآیند. که پارامترهای قالب شامل:

- زاویه کانال ϕ

- زاویه گوشه ψ

و پارامترهای فرآیند شامل:

- نوع مسیر انجام فرآیند شکل (۱-۶)

- تعداد پاس‌ها

- سرعت انجام فرآیند

- دمای انجام فرآیند

- روانکار مورد استفاده

- میزان فشار معکوس^۱

و پارامترهای دسته سوم، عملیات حرارتی و ریزساختار فرآیند است که هر کدام به تفصیل توضیح داده خواهند شد. برای بررسی تأثیر پارامترهای ذکر شده بهتر است ابتدا خود فرآیند بررسی شود، همانطور که اشاره شد هدف فرآیند ECAP اعمال کرنش در قطعه کار است پس با استفاده از روابط تئوری میزان کرنش اعمالی در طول فرآیند را محاسبه می‌کنیم.

شکل (۱-۲) یک نمای شماتیک از قالب ECAP را نشان می‌دهد. [۱۰] در این شکل ϕ زاویه کانال و ψ زاویه گوشه است، با صرف نظر کردن از اصطکاک، یک المان مربعی abcd را در نظر می‌گیریم که

^۱ back pressure

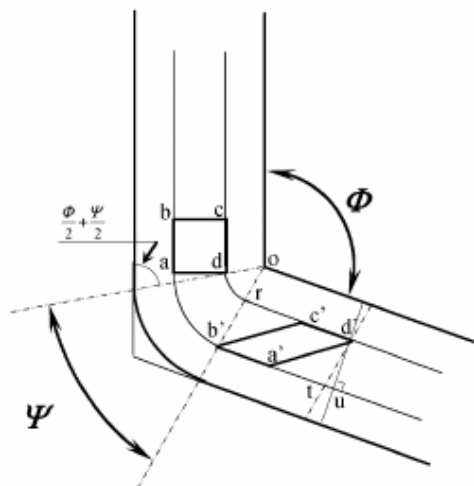
پس از عبور از مسیر فرآیند به صورت $a'b'c'd'$ در می‌آید، با استفاده از اصول اولیه و هندسی می‌توان گفت که مقدار کرنش اعمالی برابر است با:

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) + \psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) \quad (2-1)$$

و نهایتاً کرنش معادل پس از N بار تکرار فرآیند از معادله زیر بدست می‌آید [۱۰]

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{\varepsilon}} \left[2 \cot\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) + \psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) \right] \quad (3-1)$$

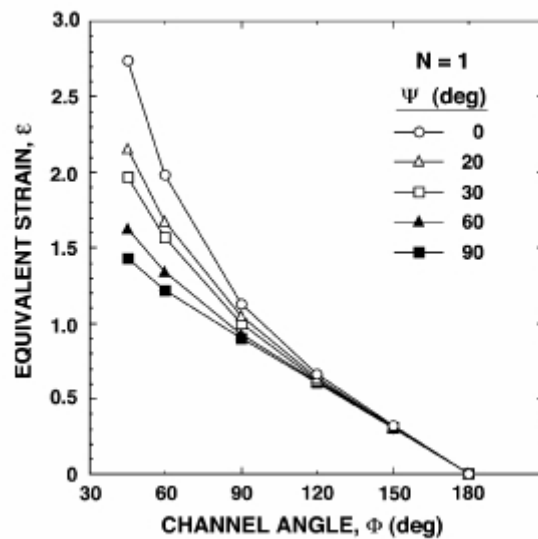
رابطه بالا در فرمتهای مختلف و از روشهای مختلفی توسط محققان بدست آمده و تأیید گردیده است.



شکل ۲-۱ چگونگی تغییرشکل یک المان مربعی از قطعه کار در قالب ECAP [۱۰]

۱-۱-۱ تأثیر زاویه کانال

مهمترین پارامتر ECAP زاویه کانال می‌باشد که کرنش کلی اعمالی به ماده را مشخص می‌کند همان طور که از رابطه (۳-۱) مشخص است زاویه کانال تأثیر معکوس روی کرنش اعمالی دارد و هر چه قدر این زاویه کمتر باشد مقدار کرنش حاصل بیشتر خواهد بود. البته از روی شکل قالب نیز مشخص است که با کاهش زاویه کانال ماده تحت تغییر شکل برشی بیشتری قرار می‌گیرد و کرنش بیشتری به آن اعمال می‌شود. در شکل (۳-۱) رابطه (۳-۱) به صورت نمودار آورده شده است که چگونگی تغییرات کرنش نسبت به تغییر زاویه کانال با زاویه گوشه‌های مختلف نمایش داده شده است. [۱۱]



شکل ۳-۱ تغییرات کرنش ایجاد شده براساس زاویه کانال و زاویه گوشه طبق رابطه (۳-۱) [۱۱]

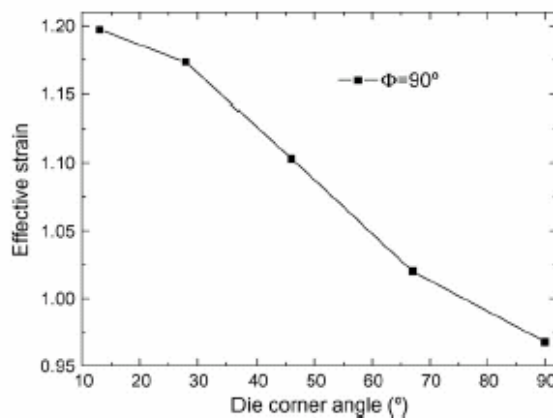
البته نکته مهم در این قسمت این است که درست است که هر چه زاویه کانال کمتر باشد بهتر است ولی در انتخاب زاویه کانال مناسب محدودیتهایی وجود دارد که مهمترین آن چگونگی رفتار ماده در حین فرآیند می باشد به عبارت دیگر باید زاویه کانال به گونه ای انتخاب شود که با توجه به دمای انجام فرآیند، ماده در حین فرآیند دچار شکست نشود و پس از خروج از قالب دارای سطحی سالم و یکنواخت باشد، از طرفی برای بدست آوردن راندمان مناسب در فرآیند باید تا حد امکان زاویه کانال کوچک انتخاب گردد، که این خود یکی از مهمترین قسمت های طراحی یک قالب ECAP می باشد که بتوان با توجه به نوع ماده ای که قرار است ECAP شود، دمای فرآیند و ابعاد بیلت، بهترین زاویه کانال انتخاب گردد و این امر میسر نمی گردد مگر با تجربه و سعی و خطا و یا با استفاده از شبیه سازی های کامپیوتری که در فصلهای بعد بیشتر توضیح داده می شود.

تحقیقات و آزمایشات زیادی برای بدست آوردن زاویه کانال مناسب صورت گرفته است، به عنوان مثال Nakashima و همکارانش [۱۲] چهار قالب با زاویه کانال ۹۰ و ۱۲/۵ و ۱۳۵ و ۱۵۷/۵ درجه ساخته و آلومینیوم خالص تجاری را در آنها تست کرده اند و سپس ریز ساختار حاصل از هر نمونه را بررسی کرده اند، آزمایشات در دمای اتاق انجام گرفته است و از مسیر BC استفاده شده است. هدف رسیدن به کرنش معادل ۴ بوده است بنابراین با توجه به رابطه (۳-۱) تعداد پاس لازم در هر قالب به ترتیب برابر ۴ و ۶ و ۹ و ۱۹ پاس بدست آمده است. همچنین در قالب با زاویه کانال کوچکتر ساختار ریزتر و یکنواخت تری حاصل شده است بنابراین می توان این طور نتیجه گیری کرد که نه تنها مقدار کرنش کل اعمالی شده مهم است بلکه میزان کرنش که بتوان در هر پاس اعمال کرد نیز مهم

می‌باشد. حتی برای بعضی فلزات نرم قالب‌هایی با زاویه کمتر از ۹۰ درجه ساخته و تست شده است. [۱۱]

۱-۳-۲ تأثیر زاویه گوشه (زاویه انحنا)

زاویه گوشه همانطور که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است، زاویه فیلت ایجاد شده بین دو کانال متقاطع می‌باشد این زاویه در میزان کرنش ایجاد شده تأثیر چندانی ندارد ولی در یکنواختی کرنش در سطح نمونه تأثیر زیادی دارد. همانطور که در شکل (۱-۳) دیده می‌شود تأثیر این زاویه روی مقدار کرنش ناچیز است. Zhao و همکارانش [۱۳] قالب‌هایی با زاویه گوشه مختلف ساخته و تأثیر آن را روی کرنش ایجاد شده در طول فرایند بررسی کرده‌اند که نتایج حاصل در شکل (۱-۴) نشان داده شده است. آنها همچنین تأثیر زاویه کانال را نیز بررسی کرده‌اند. آزمایشات آنها روی آلومینیوم خالص تجاری بوده است.



شکل ۱-۴ بررسی تجربی تأثیر زاویه گوشه روی کرنش [۱۳]

۱-۳-۳ تأثیر سرعت اعمال بار (سرعت شکل دهی)

فرآیند ECAP معمولاً توسط پرسهای هیدرولیک تناژ بالا و با سرعت حدود $1-20 \text{ mms}^{-1}$ انجام می‌شود. اولین تحقیقات برای بررسی سرعت پرس بر روی آلومینیوم خالص و Al-1\%Mg با سرعت $0.01 - 10 \text{ mms}^{-1}$ انجام شد. [۱۴] و نتایج آزمایشات نشان داد که سرعت پرس تأثیر قابل توجهی روی کرنش ایجاد شده ندارد. نتایج این تحقیق در شکل (۱-۵) آورده شده است که نمونه‌ها با سرعت‌های مختلفی ECAP شده‌اند و سپس از آنها نمونه تست کشش ایجاد شده و نتایج تست کششی بر حسب سرعت پرس رسم شده است.