

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر فرایند ECAP و مواد ریزساختار حاصل از آن

رساله دکتری مهندسی مکانیک

فرشید احمدی

اساتید راهنما

دکتر محمود فرزین

دکتر محمدرضا فروزان

۱۳۹۳



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

رساله دکتری رشته‌ی مهندسی مکانیک - ساخت و تولید آقای فرشید احمدی

تحت عنوان

اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر فرایند ECAP و مواد ریز ساختار حاصل از آن

در تاریخ ۹۳/۰۹/۱ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- | | |
|--------------------------|-------------------------------|
| دکتر محمود فرزین | ۱- استاد راهنمای پایان‌نامه |
| دکتر محمدرضا فروزان | ۲- استاد راهنمای پایان‌نامه |
| دکتر محمود مرآتیان | ۳- استاد مشاور پایان‌نامه |
| دکتر محمدرضا طرقي نژاد | ۴- استاد داور |
| دکتر علیرضا فدائی تهرانی | ۵- استاد داور |
| دکتر عباس قائی | ۶- استاد داور |
| دکتر رضا معدولیت | ۷- استاد داور |
| دکتر محمدرضا سلیم‌پور | سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده |

سپاس و ستایش مرخضای راجل و جلالت که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درخشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و در پای علم را بر ما کشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت یازماید.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تا این می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که بر دستش سپرده‌اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه از پدر و مادر عزیزم... این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کرمیانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاور بی‌چشم داشت برای من بوده‌اند؛

از استاد با کجالت و شایسته؛ جناب آقای دکتر محمود فرزین که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از بیج‌گلی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛

از اساتید صبور و باتقوا، جناب آقای دکتر محمد رضا فروزان و جناب آقای دکتر محمود آسمان، که بدون مساعدت این عزیزان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

کلیدی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی
اصفهان است.

خدای رابی ساگرم که از روی کرم پدر و مادری خداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسیم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش
تلاش نمایم .

والدینی که بود نشان تاج افتخاری است بر سرم و نشان دلیلی است بر بودنم چرا که این دو وجود پس از پروردگاریه هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از
فراز و نشیب آموختند.

آموختگاری که برایم زندگی؛ بودن و انسان بودن را معنا کردند

حال این برگ سبزی است تخم درویش تقدیم آمان...

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگان

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهنشان به شجاعت می کرید

و به پاس محبت های بی دینشان که هرگز فروکش نمی کنند.

این مجموعه را به **پدر و مادر عزیزم** تقدیم می کنم.

چکیده

طی دو دهه گذشته تلاش‌های بسیاری جهت ابداع و توسعه روش‌های تغییرشکل شدید برای تولید نمونه‌های فلزی بسیار ریزدانه و یا نانو ساختار انجام شده است. مهمترین ویژگی فرایندهای تغییر شکل شدید، اعمال کرنش بسیار زیاد به قطعه بدون ایجاد تغییر در سطح مقطع آن می‌باشد. تغییر شکل شدید فلزات به روش‌های گوناگون اعمال می‌شود که در میان آنها فرایند اکستروژن زاویه‌ای (ECAP) به دلیل قابلیت تولید قطعات حجیم و امکان تولید تجارتي و صنعتی، بیشتر از سایر روش‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

امروزه گستره استفاده از ارتعاشات آلتراسونیک در فرایندهای شکل دهی رو به افزایش است. علت‌های عمده این گسترش، قابلیت‌ها و ویژگی‌های ایجاد شده در فرایند و ماده‌ی در حین ارتعاشات آلتراسونیک می‌باشد که از آنها تحت عناوین اثرات سطحی و اثرات حجمی یاد می‌شود. در این پایان‌نامه ارتعاشات آلتراسونیک در حین فرایند ECAP اعمال شده و اثرات آن بر روی خواص مکانیکی نمونه، اندازه‌ی دانه تولید شده، یکنواختی ساختار ایجاد شده و هم چنین نیروی مورد نیاز فرایند مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور یک سیستم شامل قالب ECAP با زاویه قالب ۱۲۰ درجه، تمرکزدهنده‌ی ارتعاشات آلتراسونیک با فرکانس شدید ۲۰ kHz، روبند و دیگر تجهیزات لازم برای سوار کردن مجموعه بر روی پرس طراحی و ساخته شد. در دو حالت همراه با ارتعاشات آلتراسونیک و بدون حضور ارتعاشات آلتراسونیک، نمونه‌های آلومینیومی (آلومینیوم خالص ۹۹/۹۸) از قالب عبور داده شده و سپس در مقطع میانی نمونه پارامترهای ذکر شده مورد بررسی قرار گرفتند. مشخص شد که ارتعاشات آلتراسونیک باعث کاهش بیشتر اندازه دانه شده و به عبارت دیگر اعمال ارتعاشات آلتراسونیک راندمان فرایند ECAP را افزایش می‌دهد. خواص مکانیکی نمونه از قبیل استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی بعد از حضور ارتعاشات آلتراسونیک نسبت به شرایط عادی افزایش پیدا کردند. با بررسی میکروسختی در سطح نمونه مشخص شد که یکنواختی اندازه دانه با حضور ارتعاشات آلتراسونیک بیشتر می‌شود. نشان داده شد که ارتعاشات آلتراسونیک نیروی مورد نیاز فرایند را کاهش داده و میزان کاهش در دامنه‌های ارتعاشی بالاتر، بیشتر خواهد بود.

مسیر جدیدی برای فرایند ECAP در طی عبورهای متوالی از قالب معرفی و سپس اثر این مسیر پیشنهادی در شرایط بدون حضور ارتعاشات آلتراسونیک و با حضور ارتعاشات مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از مسیر پیشنهادی یکنواختی ساختار را در مقایسه با مسیرهای سنتی بهبود بخشید.

مدل‌های المان محدود مطابق با شرایط عملی ذکر شده آماده و نتایج شبیه‌سازی با نتایج عملی موجود مورد مقایسه قرار گرفتند. به منظور اعمال ارتعاشات آلتراسونیک در شبیه‌سازی‌های المان محدود، تکنیک جدیدی تحت عنوان تکنیک سنبه الاستیک معرفی شد. استفاده از مدل معرفی شده کمک می‌کند تا شرایط شبیه‌سازی با شرایط واقعی بسیار به یکدیگر نزدیک باشند. کلیه شبیه‌سازی‌های انجام شده بر پایه مدل معرفی شده دارای انطباق بسیار خوبی با نتایج تجربی بودند.

به منظور بررسی اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر تنش شارش ماده، مجموعه‌ای طراحی و ساخته شد که با سوار کردن آن بر روی دستگاه تست کشش این قابلیت فراهم شد تا بتوان ارتعاشات آلتراسونیک را در حین تست کشش اعمال کرد. در این راستا نمونه‌هایی با اندازه دانه متفاوت تحت آزمایش تست کشش همراه با آلتراسونیک قرار گرفتند. در کلیه نمونه‌ها بعد از اعمال ارتعاشات تنش شارش افت کرده و به عبارتی در ماده نرم شدگی دیده شد. مشاهده شد که هرچه دانه‌ها ریزتر باشند نرم شدگی ماده کمتر است. این نرم شدگی کمتر در مواد ریزدانه‌تر به چگونگی حرکت نابجایی‌ها در ماده نسبت داده شد.

کلمات کلیدی: فرایند ECAP، نانو ساختار، ارتعاشات آلتراسونیک، اندازه دانه، نیرو، همگنی ساختار، نرم شدگی آکوستیکی،

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	هشت
چکیده	۱
فصل اول: مقدمه	
۱-۱- نانو مواد	۲
۱-۲- اصول تولید مواد نانو ساختار با تغییر شکل پلاستیکی شدید	۳
۱-۳- روش پرس در قالب زاویه دار با مقاطع یکسان (ECAP)	۷
۱-۳-۱- اصول فرایند	۷
۱-۴- هدف این پایان نامه	۱۷
فصل دوم: مرور بر فعالیت های انجام شده	
۱-۲- فرایند ECAP	۱۹
۲-۲- اعمال ارتعاشات آلتراسونیک بر فرایندهای شکل دهی	۳۹
۲-۲-۱- مقدمه	۳۹
۲-۲-۲- اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر فرایندهای شکل دهی	۴۰
۲-۲-۳- اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر رفتار الاستیک- پلاستیک مواد	۴۳
۳-۲- اعمال ارتعاشات آلتراسونیک بر فرایند ECAP	۴۹
فصل سوم: طراحی و ساخت تمرکزدهندهی ارتعاشات	
۱-۳- مقدمه	۵۱
۱-۳-۱- منبع آلتراسونیک	۵۲
۱-۳-۲- مبدل آلتراسونیک	۵۲
۱-۳-۳- تمرکز کننده ارتعاشات آلتراسونیک	۵۵
۲-۳- تاریخچه	۵۵
۳-۳- انواع تمرکز دهنده	۵۷
۴-۳- پارامترهای دخیل در طراحی تمرکز دهنده	۵۸
۳-۴-۱- جنس تمرکز دهنده	۵۸
۳-۴-۲- فرکانس طبیعی تمرکز دهنده	۵۹
۳-۴-۳- تنش های اعمالی به تمرکز دهنده	۵۹

۶۱	۳-۴-۴- ابعاد هندسی تمرکزدهنده
۶۱	۳-۵- روشهای طراحی تمرکز دهنده
۶۱	۳-۵-۱- متدولوژی جهت طراحی تمرکز دهنده پله ای
۶۵	۳-۶- روند طراحی تمرکزدهنده
۶۹	۳-۷- آنالیزهای المان محدود

فصل چهارم: اعمال ارتعاشات آلتراسونیک در فرایند ECAP به همراه بررسی نتایج

۷۵	۴-۱- مقدمه
۷۶	۴-۲- کلیاتی در خصوص طراحی قالب ECAP
۸۰	۴-۳- طراحی مجموعه قالب ECAP همراه با ارتعاشات آلتراسونیک
۸۳	۴-۴- تست ارتعاشی تمرکزدهنده
۸۵	۴-۵- آماده سازی نمونه
۸۹	۴-۶- شرایط انجام عملیات ECAP همراه با ارتعاشات آلتراسونیک
۹۰	۴-۷- آماده سازی نمونه به منظور انجام تست های سختی سنجی و SEM
۹۵	۴-۸- بررسی اثرات ارتعاشات آلتراسونیک و تحلیل نتایج
۹۵	۴-۸-۱- اثر بر روی خواص مکانیکی
۹۶	۴-۸-۲- اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر اندازه دانه
۱۰۲	۴-۸-۳- اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر همگنی ساختار
۱۰۵	۴-۸-۴- اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر نیروی فرایند
۱۰۶	۴-۸-۵- پیشنهاد یک مسیر جدید و بررسی عملی آن بر میزان همگنی ساختار

فصل پنجم: شبیه سازی فرایند ECAP همراه با ارتعاشات آلتراسونیک

۱۱۱	۵-۱- مقدمه
۱۱۲	۵-۲- بررسی اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر روی نیروی فرایند ECAP
۱۱۵	۵-۲-۱- بررسی و تحلیل نتایج حاصل از مدل سنبه صلب
۱۱۹	۵-۲-۲- بررسی و تحلیل نتایج حاصل از مدل سنبه الاستیک
۱۲۱	۵-۲-۳- بررسی اعتبار مدل سنبه الاستیک
۱۲۴	۵-۲-۴- بررسی نیرو مطابق با شرایط تجربی برای نمونه های Al1098
۱۲۷	۵-۳- اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر میزان و توزیع کرنش مؤثر
۱۳۳	۵-۴- بررسی افزایش همگنی ساختار با ارائه یک مسیر جدید در فرایند

فصل ششم: بررسی اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر تنش شارش ماده

- ۱-۶- مقدمه ۱۴۲
- ۲-۶- طراحی کلی مجموعه تست کشش همراه با ارتعاشات آلتراسونیک ۱۴۳
- ۳-۶- طراحی تمرکزدهنده ۱۴۵
- ۴-۶- آماده سازی نمونه ۱۵۰
- ۵-۶- انجام آزمایشها و بررسی نتایج ۱۵۲

فصل هفتم: جمع بندی و ارائه پیشنهادها

- ۱-۷- جمع بندی نتایج حاصل شده ۱۶۰
- ۲-۷- پیشنهادها جهت ادامه کار ۱۶۲
- مراجع ۱۶۵

فصل اول

مقدمه

۱-۱- نانو مواد

اگرچه خواص مکانیکی و فیزیکی همه‌ی مواد کریستالی توسط فاکتورهای گوناگونی تعیین می‌شوند، اما اندازه‌ی متوسط دانه عموماً یک نقش قابل توجه و اغلب غالب را در این زمینه ایفا می‌کند. از این رو استحکام همه‌ی مواد پلی‌کریستال، بوسیله‌ی رابطه‌ی هال ۱ با اندازه دانه (d) مرتبط می‌شوند. این رابطه تنش تسلیم ماده، σ_y ، را بصورت زیر بیان می‌کند [۱, ۲]:

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

k_y ثابت تسلیم و σ_0 تنش اصطکاکی است. رابطه‌ی (۱-۱) نشان می‌دهد که استحکام ماده با کاهش اندازه‌ی دانه افزایش می‌یابد. این امر منجر به یک علاقه‌ی در حال گسترش برای ساخت مواد با دانه‌های بسیار کوچک و بعضاً با ابعاد نانومتری شده است.

نانو مواد به موادی اطلاق می شود که ابعاد خارجی و یا اندازه‌ی فازهای تشکیل دهنده آن حداقل در یک بعد کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد. نانو مواد به گروه‌های نانو ذرات، نانو لوله‌ها، نانو لایه‌ها و نانو ساختارها تقسیم بندی می شوند. مهمترین ویژگی در همه انواع نانو مواد این است که فصل مشترک موجود در ساختار آنها سهم قابل ملاحظه‌ای از ساختار ماده را تشکیل می دهد. به همین دلیل رفتار ماده در مقیاس نانومتری تفاوت بنیادی با رفتار آن در مقیاس‌های بزرگتر دارد و کنترل این رفتار به کمک نانو فناوری موجب پدید آمدن خواص متنوع و مفیدی می شود. بطور کلی نانو مواد خواص فیزیکی، شیمیائی و مکانیکی متفاوت و اغلب برتری نسبت به مواد متداول از خود نشان می دهند.

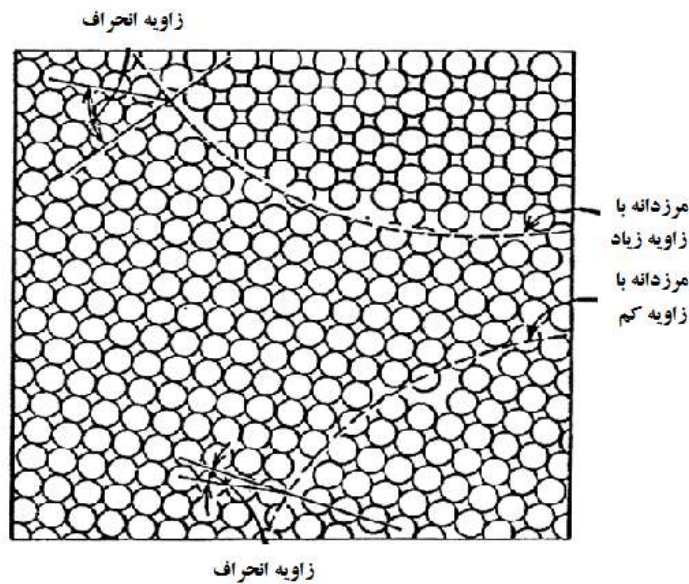
بکارگیری نانو مواد، کاهش وزن و افزایش مشخصه‌های مکانیکی (ازدیاد استحکام، سختی، چقرمگی و...) را به دنبال دارد. به این ترتیب کاربرد نانو مواد می تواند تحولات گسترده‌ای را در صنایع مختلف شامل صنایع خودرو، هوا- فضا، نظامی، نفت، گاز و پتروشیمی، نساجی، الکترونیک، مغناطیس، کامپیوتر، سنسورها، پزشکی، داروسازی، مواد آرایشی و فناوری اطلاعات و ارتباطات ایجاد کند. استفاده از نانو مواد در برخی از صنایع هم اکنون آغاز شده است. در این میان می توان به پارچه‌های ضد چروک، شیشه‌های خود تمیزشو، نانو کاتالیزورها (برای کاهش مصرف سوخت خودرو و کاهش میزان آلودگی ناشی از محصولات احتراق)، نانو کامپوزیت‌ها و نانو فیلترها نام برد.

۱-۲-۱ اصول تولید مواد نانو ساختار با تغییر شکل پلاستیکی شدید

روش‌های متعدد شکل دهی فلزات مانند نورد یا کشش اگر چه منجر به ریز شدن ساختار مواد می شوند و لیکن میزان تغییر شکل پلاستیکی در این روش‌ها در حدی نیست که اندازه‌ی دانه‌ها را تا مقیاس نانومتر کاهش دهد. برای ایجاد ساختار نانو کریستال روش‌های متفاوتی ابداع شده اند که قادرند تغییر شکل پلاستیکی بسیار زیادتری در مقایسه با روش‌های متداول در ماده ایجاد کنند. همه این روش‌ها تحت عنوان روش‌های تغییر شکل پلاستیکی شدید نام برده می شوند.

در مقیاس میکروسکوپی تغییر شکل پلاستیک بیشتر تمایل دارد تا به صورت باندهای برشی محلی ظاهر شود. چنین باندهایی، دانه‌های درشت اولیه را به زیر دانه‌ها و یا شبکه‌های نابجائی تبدیل می کنند. ابتداءً زاویه‌های جهت گیری^۱ این زیر دانه‌ها کم هستند. برای کرنش‌های بزرگتر جهت گیری کریستالوگرافی بعضی از زیر دانه‌ها تا حدی تغییر می کند. از این رو می توان آنها را کلاً به صورت دانه‌های جدید و مجزا از همسایگان خود در نظر گرفت [۳]. شکل ۱-۱ زوایای جهت گیری مرزدانه‌ها را نشان می دهد. زمانی که انحراف زاویه جهت گیری بیشتر از ۱۵ درجه باشد اصطلاحاً مرزدانه با زاویه جهت گیری زیاد تشکیل شده است.

¹ Misorientation



شکل ۱-۱: زاویه های جهت گیری مرزدانه ها با یکدیگر [۳]

کرنش پلاستیک معادلی که در آن تغییرات قابل توجهی در ساختار اتفاق می افتد بستگی به ماده و شرایط فرایند دارد. کمترین مقدار ممکن حدوداً ۳ می باشد. اما اغلب خیلی بیشتر است. چنین تغییر شکلی را تحت عنوان تغییر شکل شدید پلاستیک نامیده و اکثراً به صورت اختصار تحت عنوان SPD^۱ از آن نام برده می شود [۴].

مکانیزم تشکیل ساختار نانومتری در روش های تغییر شکل پلاستیکی شدید همانند روش آلیاژسازی مکانیکی به صورت ایجاد چگالی بالائی از نابجائی ها، تشکیل ساختار سلولی، ایجاد مرز دانه های فرعی و نهایتاً تبدیل مرز دانه های فرعی به مرز دانه های با زاویه زیاد می باشد. چنانچه تغییر شکل پلاستیکی بر روی ماده چندین بار تکرار شود دانه های اولیه بطور مکرر به دانه های کوچک تر تقسیم و تا مقیاس نانومتری کوچک می شوند [۵].

مزیت عمده روش های تغییر شکل پلاستیکی شدید نسبت به دیگر روش ها مانند روش آلیاژسازی مکانیکی در این است که ماده اولیه و مهمتر از آن محصول نهائی به شکل یک قطعه می باشد. لذا نیاز به عملیات های ثانویه مانند فشردن و تف جوشی نبوده و خلوص محصول نهائی نیز بالاتر است [۶].

فرایند تقسیم و شکل گیری جهت ها با در نظر گرفتن بحث های بازیابی^۲، تبلور مجدد در دماهای بالا، تغییرات فازی و یا رسوب^۳ در بعضی از فلزات بسیار پیچیده هستند. با این وجود ساختار برآیند بی نهایت ریز است (شکل ۱-۲). این ساختار ریز را به سه دسته تقسیم بندی می کنند. یک دسته آنهائی که اندازه دانه هایشان زیر ۱ میکرومتر و بزرگتر از ۳۰۰ نانومتر است و اصطلاحاً فلزات UFG^۴ نامیده می شوند. دسته دوم آنهائی هستند که اندازه دانه هایشان در محدوده ی بین ۳۰۰ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر بوده و به آنها فلزات نانو ساختار گفته می شود. دسته ی آخر فلزاتی هستند که اندازه دانه هایشان زیر ۰/۱ میکرومتر است و به آنها فلزات NC^۵ اطلاق می شود [۷].

^۱ Sever plastic deformation

^۲ recovery

^۳ precipitation

^۴ Ultra fine grained

^۵ Nano-Crystallin



شکل ۱-۲: ساختار UFG آلیاژ Al 1070 بعد از SPD (کرنش ۶/۹) [۷]

این تغییر ساختار منتج به ویژگی های مکانیکی و فیزیکی غیر معمول فلزات UFG/NC می شود. از جمله ویژگی های غیر معمول این فلزات می توان موارد زیر را نام برد [۷]:

- ۳-۴ برابر شدن افزایش در استحکام تسلیم در مقایسه با فلزات آنیل شده
- ۲ برابر شدن استحکام کششی
- افزایش سختی
- افزایش چقرمگی
- افزایش عمر در بارگذاری نوسانی طولانی (HCF) (LCF^۲) بهتر نمی شود چرا که همراه با افزایش استحکام چکش خواری کاهش می یابد)

مطالعات جامعی در خصوص رفتار LCF فلزات UFG/NC در منابع [۸, ۹] ارائه شده است. با وجودی که عموماً چکش خواری پائین تر است نمونه های وجود دارند که هم قابلیت چکش خواری ماده حفظ شده است و هم استحکام افزایش پیدا کرده است. این مورد در مس و تیتانیوم خالص UFG و آلیاژ منیزیم UFG دیده شده است [۱۰].

فلزات UFG/NC در دماهای پائین دارای ویژگی های مطلوبی از استحکام و چکش خواری می باشند. اما در دماهای بالا آن دسته از فلزاتی که از لحاظ دمائی پایدار هستند، ویژگی های سوپرپلاستیک افزایش یافته ای را از خود نشان می دهند. از جمله این ویژگی ها می توان به افزایش طول شکست^۳ در نرخ کرنش بالاتر اشاره کرد [۱۱]. با وجود توجهات زیادی که به فرایندهای SPD شده است، اما رشد این فرایندها و به کارگیری آنها در صنعت روند نسبتاً کندی دارد. علت این امر در این است که SPD عملاً به صورت یک تکنولوژی شکل دهی ظاهر شده است و تنها تفاوت آن در این است که شکل و ابعاد قطعه کار مورد فرایند قرار گرفته را حفظ می کند. از این رو SPD شبیه به شکل دهی کلاسیک با همه مشکلات مربوط به گرم کردن، اصطکاک، جریان ماده، ابزار، عملکرد ماشین، کیفیت، بهره وری و هزینه ها می باشد.

¹ high cycle fatigue

² Low cycle fatigue

³ Elongation

افزایش توجه و علاقه به فلزات UFG/NC آنها را کاندیداهای خوبی برای کاربردهای صنعتی ساخته است. چنین کاربردهایی مستلزم تولید فلزات UFG در محدوده وسیعی از شکل ها، ابعاد و در کمیت های بالا می باشند. نکته قابل توجه دیگری که میتواند وجود داشته باشد عملیات های شکل دهی^۱ بر روی فلزات UFG/NC برای تبدیل به اجزاء مورد نیاز بعد از فرایند SPD می باشد. به عنوان نمونه ای از این فرایندها می توان فرایندهای ماشین کاری، ماشین کاری با اسپارک^۲ و یا فرایند های شکل دهی کلاسیک را نام برد. ممکن است این نیاز وجود داشته باشد که همه این تکنولوژی ها دوباره تعریف شوند و یا حداقل با اشاره به مواد UFG/NC موجود تحت تست و آزمایش قرار گیرند [۱۲].

برای ایجاد ساختارهایی با دانه های فوق ریز و یا در بعد کوچکتر ساختارهای نانو در یک قطعه به کمک روش های تغییر شکل پلاستیکی شدید، اهداف زیر می بایست مد نظر قرار گیرند:

الف) دانه های فوق ریز با مرز دانه زاویه زیاد بوجود آیند. زیرا تنها در چنین حالتی است که خواص برتر ساختار های فوق ریزدانه بروز می کند.

ب) ساختار با دانه بندی فوق ریز در تمام نقاط قطعه همگن باشد تا یکنواختی و پایداری خواص حاصل شود.

ج) قطعه نهائی عاری از هر گونه ترک، عیب و نقص باشد.

بنابراین می بایست در هر روش متغیرهای فرایند به خوبی شناخته و مقادیر بهینه آنها مشخص شوند. چندین روش برای ایجاد تغییر شکل پلاستیکی شدید معرفی شده اند که در ادامه اصول این روش ها توضیح داده می شود. برخی از این روش ها مرحله تحقیقاتی و آزمایشگاهی را پشت سر گذاشته و هم اکنون در مقیاس صنعتی برای تولید قطعات فوق ریزدانه مورد استفاده قرار می گیرند.

تعداد افزاینده ای از فرایندهای SPD در حال حاضر موجود هستند، با این حال هیچ کدام هنوز به مرتبه و رشد کافی جهت تولید انبوه فلزات UFG/NC نرسیده اند. در این زمینه می توان به موارد زیر اشاره کرد.

- ✓ پیچش تحت فشار بالا [۱۳]
- ✓ فشردن-اکستروژن تناوبی [۱۴]
- ✓ اکستروژن پیچشی [۱۵]
- ✓ پیوند غلطکی جمع شونده (نورد تجمعی) [۱۶, ۱۷]
- ✓ آهنگری چند محوره [۱۸]
- ✓ کرکره ای کردن و صاف کردن تکراری [۱۹, ۲۰]
- ✓ پرس در کانال زاویه دار با مقاطع یکسان [۲۱]

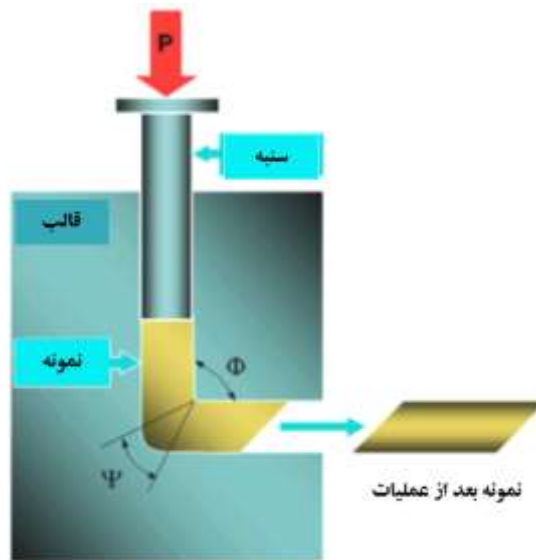
¹ Post-SPD Forming

² Spark erosion

۳-۱- روش پرس در قالب زاویه دار با مقاطع یکسان (ECAP)

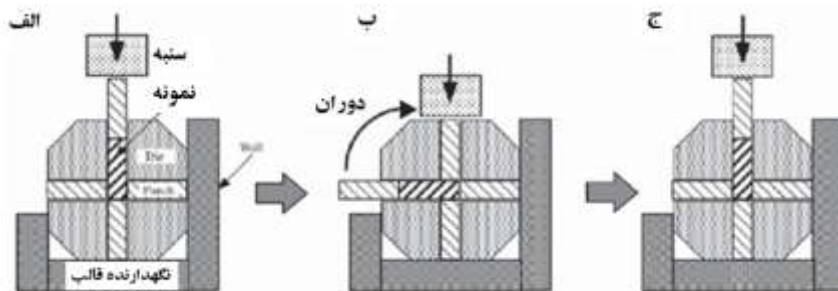
۱-۳-۱- اصول فرایند

در این فرایند نمونه‌ی مورد نظر از داخل یک قالب که دارای دو کانال با سطح مقاطع یکسان است، عبور می‌کند. مطابق شکل ۳-۱ کانال‌های ورودی و خروجی در یک زاویه خاص، Φ ، با یکدیگر برخورد کرده‌اند. در نتیجه -ی عملیات فشردن به داخل قالب، نمونه مورد نظر در حالی که مساحت سطح مقطع آن ثابت می‌ماند، تحت برش ساده قرار می‌گیرد. ثابت بودن سطح مقطع نمونه این امکان را فراهم می‌کند تا این فرایند در چندین مرحله تکرار شود. برای دستیابی به ساختاری به اندازه کافی ریز، نمونه می‌بایست چندین بار از قالب عبور داده شود. اجرای این روش برای مواد سخت ممکن است نیاز به افزایش درجه حرارت قالب را ضروری سازد. برای کاهش اصطکاک بین قالب و نمونه از مواد روانکار استفاده می‌شود [۲۲].



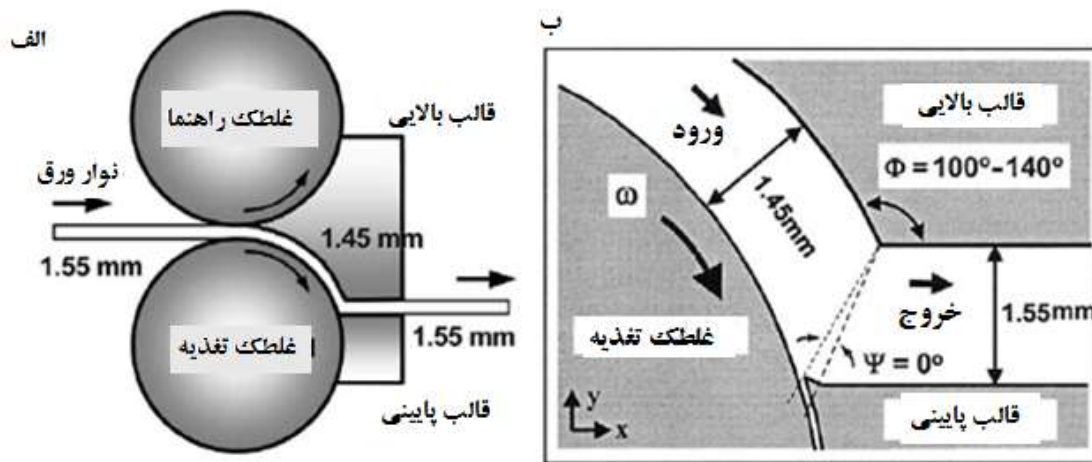
شکل ۳-۱: روش پرس در قالب زاویه دار (ECAP) [۲۲]

در شکل ۴-۱ طرح ویژه‌ای از یک قالب ارائه شده است که در آن امکان چرخش قالب فراهم گردیده است. در این طرح دیگر نیاز به خروج نمونه پس از هربار عبور نیست و به این ترتیب زمان عملیات تا ۷۵ درصد کوتاهتر است. اما در استفاده از این طرح زاویه کانال‌ها تنها می‌تواند ۹۰ درجه باشد.



شکل ۴-۱: طرحی ویژه برای اجرای روش پرس در قالب زاویه دار بدون نیاز به خروج نمونه از قالب [۲۳]

با استفاده از طرح ارائه شده در شکل ۱-۵ می توان روش پرس در قالب زاویه دار را بطور پیوسته برای ریز کردن ساختار یک ورق بکار برد [۲۳].



شکل ۱-۵: طرحی برای اجرای روش پرس در قالب زاویه دار در مورد یک ورق [۲۳]

عدم پرس شدن کامل قالب، ایجاد مناطق مرده و تغییر شکل پلاستیکی غیر یکنواخت از جمله عواملی هستند که سبب می شوند نمونه از نظر ریز ساختار و خواص مکانیکی همگن نباشد. با کاهش اصطکاک، استفاده از فشار معکوس، طراحی مناسب قالب و انتخاب درست نرخ کرنش و درجه حرارت می توان به این مشکلات فائق آمد.

۱-۳-۲- تاریخچه ECAP

فرایند ECAP تکنیک نسبتاً جدیدی در تغییر شکل پلاستیک مواد می باشد. اولین بار توسط سگال^۱ و همکارانش در ابتدای سال ۱۹۸۰ توصیف و سپس توسعه پیدا کرد [۲۱, ۲۴]. مهمترین شاخصه‌ی این فرایند امکان وارد کردن کرنش های بسیار شدید به داخل ماده بدون تغییر در سطح مقطع آن می باشد. ثبات ابعاد نمونه ای که بر روی آن فرایند انجام گرفته است، این امکان را فراهم می کند تا این فرایند را بتوان چندین بار تکرار کرده و از این رو کرنش های بی نهایت شدیدی بر ماده اعمال کرد.

از اوایل سال ۱۹۹۰ این فرایند شدیداً توسط گروه های تحقیقاتی گوناگونی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. تلاش های اصلی در دو جهت حرکت می کنند:

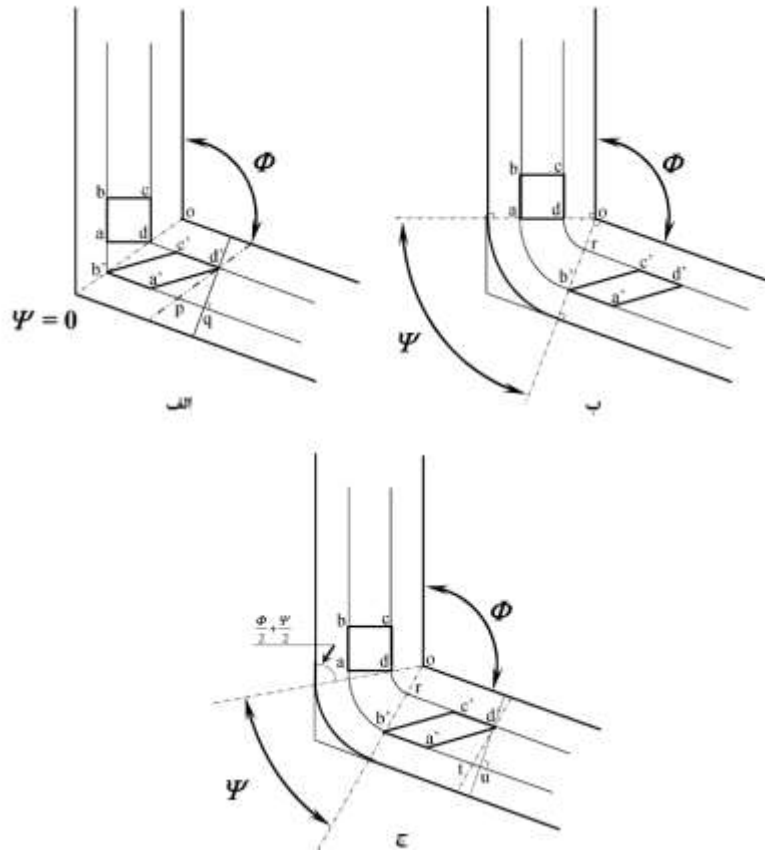
- تحقیق و بررسی بر روی اصول فرایند ECAP
- تحقیق و بررسی بر روی اینکه چگونه ECAP ساختارهای میکروسکوپی و ویژگی های مکانیکی مواد متفاوت را تحت تأثیر قرار می دهد.

علم مکانیک ECAP، یعنی راهی که کرنش بر روی نمونه اعمال می شود، در ۱۰ سال گذشته توسط دانشمندان گوناگونی تجزیه و تحلیل شده است [۲۵-۲۷]. درک نسبتاً خوبی از اصول فرایند باعث می شود تا بتوان بسیاری از جنبه های مختلف تأثیر فرایند بر روی ساختار میکروسکوپی ماده را توضیح داد.

¹ V.M Segal

۳-۳-۱- تخمین کرنش در فرایند ECAP [۲۵]

اصول فرایند ECAP به صورت شماتیک در شکل ۱-۶ نشان داده شده است. این شکل سه طرح مختلف از قالب مورد استفاده در روش ECAP را نشان می دهد. دو کانال با سطح مقطع یکسان در زاویه باز Φ با یکدیگر تلاقی کرده اند.



شکل ۱-۶: اصول فرایند ECAP (Φ زاویه تلاقی دو کانال، Ψ زاویه در برگیرنده قوس منحنی در نقطه تلاقی الف) $\Psi = 0$

(ب) $\Psi = \pi - \Phi$ (ج) زاویه ای بین صفر و $\pi - \Phi$ [۲۵]

معمولاً به جای بیان میزان شعاع فیلت در گوشه قالب از زاویه Ψ استفاده می شود. Ψ را به عنوان زاویه در برگیرنده قوس منحنی اتصال دو کانال بیرونی تعریف می کنند. از این رو شکل ۱-۶-الف و ۱-۶-ب به ترتیب متناظر با شرایط $\Psi = 0$ و $\Psi = \pi - \Phi$ می باشند. شکل ۱-۶-ج متناظر با موقعیتی است که Ψ زاویه ای دلخواه بین دو مقدار قبلی می باشد.

در عمل می توان از مشکلات ناشی از اصطکاک در دیواره های قالب با استفاده از روانکارهای مناسب پرهیز کرد. بنابراین در تحلیل حاضر فرض شده است که قالب ها همانطور که در شکل ها نشان داده شده اند ساخته شده و قطعه کار خوب روانکاری شده است. این فرض کمک می کند تا بتوان از اثرات ناشی از اصطکاک میان قالب و قطعه کار صرف نظر کرد.

در شکل ۱-۶-الف، $\Psi = 0$ ، یک المان کوچک مربعی با رئوس $abcd$ در داخل نمونه در نظر گرفته می شود. این المان در داخل مسیر تحت برش قرار گرفته و تغییر شکل پیدا می کند. ساختار المان بعد از تغییر شکل به

ساختار جدید $a'b'c'd'$ تبدیل می شود. با استفاده از نماد گذاری موجود در شکل، کرنش برشی γ از رابطه (۱-۱) حاصل می شود:

$$\gamma = \frac{a'q}{qd'}$$

از شکل مشخص است که $qd'=ad$ و $ab' = dc' = a'p = pq = ad \times \cotg(\Phi/2)$ در نتیجه:

$$a'q = 2ad \times \cotg(\Phi/2)$$

بنابراین برای شرایطی که $\Psi = 0$ باشد داریم:

$$\gamma = 2\cotg(\Phi/2) \quad (1-1)$$

در شکل ۱-۶-ب که در آن $\Psi = \pi - \Phi$ ، کرنش برشی به صورت زیر بدست می آید:

$$\gamma = \frac{rc'}{rb'}$$

که شرایط زیر حاکم است:

$$rb' = da = (oa - od), ab' = dc' = oa\Psi = (rc' + od\Psi)$$

در نتیجه:

$$rc' = (oa - od)\Psi$$

بنابراین در این شرایط داریم:

$$\gamma = \Psi \quad (2-1)$$

و در نهایت برای شکل ۱-۶-ج، که Ψ دارای مقداری بین دو حالت قبل می باشد، کرنش برشی به صورت زیر

بدست می آید:

$$\gamma = \frac{a'u}{d'u}$$

که $d'u = ad$ و $a'u$ را می توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$a'u = a't + tu = rc' + as,$$

$$as = ad\cotg\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right), ab' = dc' = (as + as\Psi) = rc' + od\Psi$$

$$(os - od) = ad\operatorname{cosec}\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right)$$

در نتیجه:

$$a'u = 2ad\cotg\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + ad\operatorname{cosec}\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right)$$

بنابراین کرنش برشی برای حالت میانی توسط رابطه (۳-۱) بدست می آید:

$$\gamma = 2\cotg\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi\operatorname{cosec}\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \quad (3-1)$$

با یک بازیابی بر روی معادله (۳-۱) مشخص است، زمانی که $\Psi = 0$ باشد معادله تبدیل به معادله (۱-۱) می شود. همین طور زمانی که $\Psi = \pi - \Phi$ باشد معادله (۲-۱) حاصل می شود. کرنش معادل به صورت زیر بیان می شود:

$$\varepsilon_{eq} = \left[\frac{2 \left[\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}}}{3} \right] \quad (۴-۱)$$

بنابراین کرنش بعد از یک بار عبور از قالب از رابطه‌ی (۵-۱) بدست می آید.

$$\varepsilon = \left[\frac{2 \cotg \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right)}{\sqrt{3}} \right] \quad (۵-۱)$$

از آنجائی که کرنش ها در هر عبور از درون قالب انباشته می شوند، لذا کرنش بعد از N بار عبور از قالب، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\varepsilon = N \left[\frac{2 \cotg \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right)}{\sqrt{3}} \right] \quad (۶-۱)$$

از این رو به شرطی که مقادیر Ψ و Φ معلوم باشند، کرنش را می توان برای هر شرایط کاری توسط معادله (۱-۶) تخمین زد.

کرنش واقعی ایجاد شده در فرایند ECAP از مقدار بدست آمده توسط معادله (۶-۱) کمتر است. چرا که در این معادله اثرات اصطکاک میان قالب و قطعه کار در نظر گرفته نشده است. اهمیت این اثرات توسط دیمیترو^۱ در سال ۲۰۰۲ مورد بررسی قرار گرفته است [۲۸].

در روش پرس در قالب زاویه دار تعداد دفعات عبور نمونه از قالب و جهت قرارگیری آن در هر بار بر میزان ریز شدن و مورفولوژی دانه ها نقش مهمی دارند. ۴ مسیر تغییر شکل مختلف که معمولاً مورد استفاده قرار می گیرند در شکل ۱-۷ نشان داده شده اند [۲۹].

¹ Dimitrova