

فهرست

صفحه	عنوان
۱	فصل اول
۱	مقدمه
۷	فصل دوم
۷	مروری بر تحقیقات انجام شده
۹	۱-۲- روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید
۱۰	۱-۱-۲- فشار/اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار (ECAE)
۱۵	۲-۱-۲- پیچش تحت فشار بالا (HPT)
۱۶	۳-۱-۲- اتصال به روش نورد تجمعی (ARB)
۱۹	۴-۱-۲- فورج/فشردن چند محوره (MAF/C)
۲۰	۵-۱-۲- موج‌دار کردن و صاف کردن متوالی (RCS)
۲۰	۶-۱-۲- فرآیند برش غلطکی
۲۱	۷-۱-۲- تغییر شکل برشی تسمه‌ی محدود شده به صورت پیوسته (C2S2)
۲۳	۸-۱-۲- اکستروژن - فشار تناوبی (CEC)
۲۴	۹-۱-۲- اکستروژن جانبی در دو کانال هم مقطع (DECLC)
۲۶	۱۰-۱-۲- اکستروژن برشی ساده (SSE)
۲۸	۱۱-۱-۲- پرس‌کاری شیاری محدود شده (CGP)
۳۶	۲-۲- خواص مواد نانو ساختار و فوق‌ریز دانه
۳۶	۱-۲-۲- نفوذ
۳۷	۲-۲-۲- پایداری حرارتی
۳۸	۳-۲-۲- خواص مکانیکی

۴۴	۳-۲- پراش اشعه‌ی ایکس (X-ray) و روش‌های تحلیلی آن:
۴۶	۲-۳-۱- تغییرات پیک‌های پراش اشعه‌ی ایکس با تغییر اندازه دانه و کرنش‌های شبکه‌ای .
۴۸	۲-۳-۲- روش ویلیام سون- هال
۵۲	۲-۴- روش اجزای محدود
۵۲	۲-۴-۱- تاریخچه‌ی روش اجزای محدود
۵۳	۲-۴-۲- اجزای محدود چیست؟
۵۵	۲-۴-۳- نرم افزار اجزای محدود ABAQUS
۵۷	۲-۴-۴- فاکتورهای مهم در فرآیندهای شکل دهی
۶۲	فصل سوم
۶۲	روش تحقیق
۶۲	۳-۱- ماده‌ی مورد آزمایش
۶۴	۳-۲- طراحی و ساخت قالب پرس‌کاری شیاری محدود شده
۶۴	۳-۲-۱- طراحی و ساخت کفه‌های بالا و پایین قالب
۶۸	۳-۲-۲- کفشک چدنی نگهدارنده‌ی قالب
۷۲	۳-۲-۳- محاسبه و ساخت فنر
۷۵	۳-۳- فرآیند پرس‌کاری شیاری
۷۶	۳-۴- آزمایش سختی
۷۸	۳-۵- آزمایش کشش
۷۹	۳-۶- پراش اشعه‌ی ایکس
۷۹	۳-۶-۱- روش ویلیام سون- هال
۸۰	۳-۶-۲- روش وارن- اورباخ
	۳-۷- مراحل کار با نرم‌افزار ABAQUS و شبیه‌سازی فرآیند پرس‌کاری شیاری محدود شده
۸۲	
۸۲	۳-۷-۱- واحد ایجاد قطعه
۸۴	۳-۷-۲- واحد تعریف خواص
۸۵	۳-۷-۳- واحد مونتاژ
۸۷	۳-۷-۴- واحد تعریف مراحل آنالیز
۸۹	۳-۷-۵- واحد تعریف برهم کنش
۹۱	۳-۷-۶- واحد بارگذاری

۹۲	.....واحد شبکه المان‌ها ۷-۷-۳
۹۴	.....واحد پردازش ۸-۷-۳
۹۵	.....فصل چهارم
۹۵	.....نتایج و بحث
۹۵	.....۱-۴- محاسبه‌ی کرنش:
۹۶	.....۲-۴- آزمایش سختی
۹۸	.....۳-۴- آزمایش کشش
	.....۴-۴- مقایسه‌ی روش پرس کاری شیاری محدود شده (CGP) با روش فشار در کانال‌های هم
۱۰۰	.....مقطع زاویه‌دار (ECAP):
۱۰۲	.....۵-۴- منحنی نیروی لازم برای پرس مراحل مختلف پرس کاری:
	.....۶-۴- نتایج حاصل از پراش اشعه‌ی ایکس و روش‌های تحلیلی ویلیامسون- هال و وارن- اورباخ:
۱۰۳	.....
۱۰۷	.....۷-۴- نتایج شبیه سازی
۱۱۰	.....۸-۴- مقایسه‌ی کرنش‌های به دست آمده از شبیه‌سازی و تئوری
۱۱۲	.....فصل پنجم
۱۱۲	.....نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۱۱۴	.....فهرست منابع

فصل اول

مقدمه

در سال ۱۹۵۹ ریچارد پی. فاینمن^۱ مقاله‌ای را دربارهٔ قابلیت‌های فناوری نانو در آینده منتشر ساخت. باوجود موفقیت‌هایی که توسط بسیاری تا آن زمان کسب‌شده بود، ریچارد پی. فاینمن را به عنوان پایه‌گذار این علم می‌شناسند. فاینمن که بعدها جایزه نوبل را در فیزیک دریافت کرد در آن سال در یک مهمانی شام که توسط انجمن فیزیک آمریکا برگزار شده بود، سخنرانی کرد و ایده فناوری نانو را برای عموم مردم آشکار ساخت.

عنوان سخنرانی وی این بود: «فضای زیادی در سطوح پایین وجود دارد». سخنرانی او شامل این مطلب بود که می‌توان تمام دایره المعارف بریتانیا را بر روی یک سنجاق نگارش کرد. یعنی ابعاد آن به اندازه‌ی $\frac{1}{25000}$ ابعاد واقعیش کوچک می‌شود. او همچنین از دوتایی کردن اتم‌ها برای کاهش ابعاد کامپیوترها سخن گفت (در آن زمان ابعاد کامپیوترها بسیار بزرگتر از ابعاد کنونی بودند اما او احتمال می‌داد که ابعاد آن‌ها را بتوان حتی از ابعاد کامپیوترهای کنونی نیز کوچکتر کرد). وی در آن زمان توسعه‌ی بیشتر فناوری نانو را نیز پیش‌بینی نمود. در آن سخنرانی پیش‌بینی‌های قابل توجهی مطرح شد که در زمان ما تحقق بسیاری از آنها مشهود است [۱]. به طوری که به‌دست آوردن ساختارهایی با دانه‌های بسیار ریز (در حد نانومتر) برای مواد گوناگون، موضوع مورد بحث بسیاری از مطالعات در دهه‌ی گذشته بوده است. مواد نانوکریستالی

^۱ - Fineman

بدون نیاز به افزودن عناصر آلیاژی گران، نمای جالبی از بهبود خواص مانند استحکام بالا در دمای اتاق، تغییر فرم پلاستیک شدید با سرعت زیاد در دماهای بالا و مقاومت به خوردگی زیاد را ارائه می‌کنند.

از زمانی که قطعات تولید شده با دانه‌بندی ریز بدون تغییر در ترکیب شیمیایی (اصلاح ترکیب) منجر به حصول استحکام، تافنس و دیگر خواص بالاتر گردید، تکنیک‌های ریزکردن ساختار مورد توجه گسترده قرار گرفت [۲].

ریز شدن اندازه دانه یکی از روش‌های مهم استحکام بخشی مواد است که نسبت به سایر روش‌های استحکام بخشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. به این دلیل که با این روش می‌توان همزمان به ترکیب مناسبی از استحکام و چکش‌خواری^۱ دست یافت. در حالی که در روش‌های دیگر، افزایش استحکام با کاهش چکش‌خواری ماده همراه می‌باشد. به‌علاوه در این روش کنترل خواص مکانیکی راحت‌تر می‌باشد. به طور کلی رابطه‌ی بین استحکام ماده با اندازه دانه از طریق رابطه‌ی معروف هال-پچ^۲ و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

که در آن σ_y تنش تسلیم، σ_0 مقاومت شبکه، d اندازه دانه و k ثابتی است که به جنس ماده بستگی دارد و به صورت فاکتور قفل شوندگی تعریف می‌شود که معیاری از استحکام مرزها است. در حالت وجود یک ساختار فرعی، رابطه‌ی مشابهی بین تنش سیلان و اندازه‌ی ساختار فرعی d وجود دارد [۳].

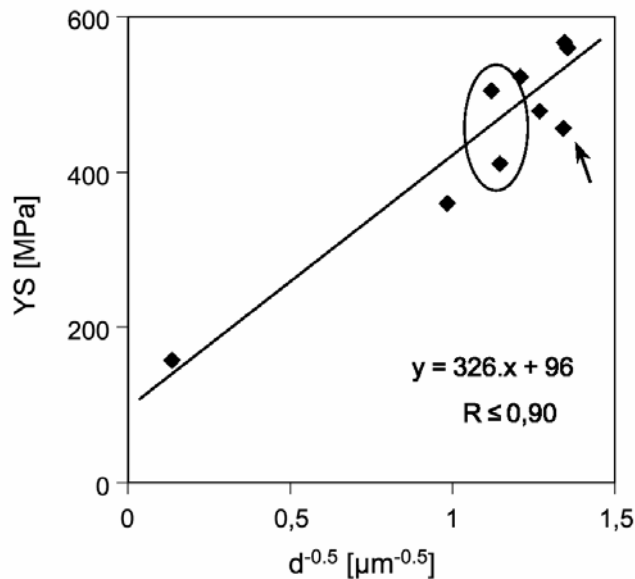
$$\sigma = \sigma_0 + Kd^{-m}$$

که مقدار m از ۰/۵ تا ۱ تغییر می‌کند.

روابط فوق نشان می‌دهند که استحکام ماده با عکس مجذور اندازه دانه رابطه دارد. به عبارت دیگر با ریز شدن اندازه دانه استحکام ماده افزایش می‌یابد. در شکل (۱-۱) نمودار استحکام تسلیم در

مقابل $\frac{1}{\sqrt{d}}$ نشان داده شده است [۳].

^۱ - Ductility
^۲ - Hall-Petch



شکل (۱-۱): نمودار تنش تسلیم در مقابل $\frac{1}{\sqrt{d}}$ (اندازه دانه‌ی فرعی) [۳].

بر همین اساس از گذشته تا به حال، فرآیندهای ایجاد مواد با دانه بندی ریز حائز اهمیت بوده است. مشکلی که در عمل برای ایجاد مواد ریزدانه وجود دارد این است که معمولاً تولید مواد با دانه‌های ریزتر منجر به افزایش هزینه و در بسیاری از روش‌ها تولید قطعاتی با ابعاد کوچکتر می‌شود. با این حال بهترین راه تولید مواد دانه ریز با هزینه‌ی کمتر و ابعاد نسبتاً بزرگتر، استفاده از روش‌های حرارتی-مکانیکی^۱ می‌باشد [۴]. در این روش‌ها ماده را (معمولاً طی چند مرحله) تحت فرآیندهای تغییر شکل و آنیل قرار می‌دهند، تا در نهایت به ساختاری با دانه بندی ریز دست یابند. البته باید توجه نمود که در این روش‌ها حداکثر می‌توان به دانه‌هایی در محدوده‌ی چند ده تا چند صد میکرون دست یافت. گرچه به منظور به کارگیری ماده در فرآیند سوپر پلاستیک، با کنترل دقیق فرآیند ترمومکانیکال و پارامترهای تولید، امکان دستیابی به دانه‌های کوچکتر در محدوده‌ی ۱ تا ۱۰ میکرون وجود دارد.

^۱ - Thermomechanical Processing

عموماً مواد پلی کریستال را از نظر دانه‌بندی به سه دسته تقسیم می‌کنند: ۱- مواد دانه درشت^۱ با اندازه دانه‌ی بزرگتر از یک میکرون، ۲- مواد با اندازه دانه‌های کوچکتر از میکرون (بین ۱۰۰ نانومتر تا یک میکرومتر) که به مواد با دانه‌بندی بسیار ریز^۲ (UFG) نیز معروف هستند و ۳- مواد نانوکریستال^۳ (NC) که اندازه دانه‌ی آن‌ها کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر می‌باشد.

به طور کلی مواد UFG و یا NC را به دو روش تولید می‌نمایند [۵]: ۱- روش‌های "پایین-بالا"^۴ و ۲- روش‌های "بالا-پایین"^۵.

روش پایین-بالا:

در روش‌های "پایین-بالا" مواد UFG و یا NC را از کنار هم قرار دادن و چیدمان اتم‌های مجزا در کنار هم و یا تجمع ذرات نانو پودری ایجاد می‌کنند. چگالش در محیط گاز خنثی^۶ [۶]، رسوب دهی الکتریکی^۷ [۷]، آسیاب‌کاری گلوله‌ای^۸ [۸] و آسیاب‌کاری در دماهای بسیار کم^۹ [۹]، مثال‌هایی از روش "پایین-بالا" می‌باشند. از معایب این روش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- مشکلات فرآوری و تولید پودر و مواد اولیه‌ی مرغوب.
- زمان و هزینه‌ی بالای تولید.
- ورود آلودگی و وجود تخلخل در ریزساختارهای تولید شده با این روش‌ها.
- مشکل در ساخت قطعات بزرگ.
- دشواری بررسی خواص کششی مواد نانو کریستال به خاطر اشکال در تولید نمونه‌های بزرگ.

¹ - Coarse Grain Materials
² - Ultra-Fine Grain Materials
³ - Nanocrystalline Materials
⁴ - Bottom-Up
⁵ - Up-Bottom
⁶ - Insert Gas Condensation
⁷ - Electrodeposition
⁸ - Ball Milling
⁹ - Cryomilling

روش بالا- پایین:

در روش‌های "بالا-پایین"، در ابتدا از یک ماده‌ی حجیم با دانه‌بندی درشت استفاده می‌کنند. سپس با انجام فرآیندهای خاصی، اندازه دانه‌ی آن‌را تا حد کوچکتر از میکرون و یا نانومتر کاهش می‌دهند. این روش‌ها عمدتاً بر پایه‌ی ایجاد کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد در ماده استوار و به روش‌های تغییر شکل بسیار زیاد^۱ (SPD) معروف می‌باشند [۱۰]. این روش‌ها در واقع نوعی از فرآیندهای ایجاد تغییر شکل پلاستیک در ماده هستند که به کمک آن‌ها می‌توان بدون تغییر قابل ملاحظه در ابعاد قطعه، کرنش‌های پلاستیک بسیار زیادی را در ماده ایجاد نمود. در این روش‌ها به دلیل ایجاد کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد، دانسیته‌ی بالایی از نابجایی‌ها در ماده ایجاد و با تغییر آرایش آن‌ها به مرزدانه‌های زاویه کوچک و تبدیل آن‌ها به مرزدانه‌های زاویه بزرگ^۲، موادی با اندازه دانه‌ی کوچکتر از میکرون و یا نانومتر تشکیل می‌شود. روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید باید فاکتورهایی را شامل شوند تا بتوان آن‌ها را در زمره‌ی روش‌های تولید ساختار نانو قرار داد. این الزامات عبارتند از:

- ۱) حصول ساختار فوق العاده دانه‌ریز با مرز دانه‌های با زاویه‌ی زیاد.
 - ۲) شکل‌گیری یکنواخت نانو ساختارها در تمام حجم نمونه به منظور تولید خواص پایدار در ماده فرآوری شده.
 - ۳) ماده‌ای که تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار می‌گیرد نباید هیچ‌گونه عیب مکانیکی یا ترک در آن به وجود آید.
- لازم به ذکر است که روش‌های معمول شکل‌دهی مانند نورد و اکستروژن نمی‌توانند این فاکتورها را پوشش دهند. زیرا در این فرآیندها به دلیل کوچک شدن سطح مقطع قطعه در حین فرآیند، امکان دستیابی به کرنش‌های بسیار زیاد وجود ندارد و کرنش‌های ایجاد شده برای تولید مواد فوق‌ریز دانه و یا نانو ساختار کافی نمی‌باشند.

¹ - Severe Plastic Deformation

² - High-Angle Grain Boundaries

روش‌های مختلفی برای ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) در مواد وجود دارند که در فصل آینده به معرفی برخی از این فرآیندها پرداخته می‌شود.

مزایای کلی این روش‌ها عبارتند از:

- امکان ساخت قطعات بزرگ و حجیم.
- عدم ورود آلودگی.
- عدم ایجاد تخلخل پس از اعمال تغییر شکل که از خصوصیات ذاتی روش‌های دیگر از قبیل متراکم سازی با گازهای بی اثر است.
- به راحتی در مورد دامنه‌ی وسیعی از آلیاژهای فلزی بدون ایجاد هیچ‌گونه تغییر در روش انجام فرآیند قابل اعمال می‌باشد.
- سهولت بررسی خواص کششی مواد نانو کریستال تولیدی از روش تغییر شکل پلاستیک شدید.

در این تحقیق به منظور ایجاد ساختار فوق ریز دانه، آلومینیوم خالص تجاری (۹۹/۲٪) حداکثر تا چهار مرحله^۱ تحت فرآیند پرس کاری شیاری محدود شده^۲ قرار گرفت. روش پرس کاری شیاری محدود شده یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد. با استفاده از روابط تئوری مقدار کرنش ایجاد شده برای هر مرتبه پرس کاری محاسبه شد. آزمایش‌های مکانیکی نیز بر روی نمونه‌های مراحل مختلف صورت گرفت و سختی، تنش تسلیم، استحکام کششی نهایی و درصد افزایش طول تا نقطه‌ی شکست پس از هر مرحله فرآیند CGP تعیین گردید. همچنین پیک‌های حاصل از پراش اشعه‌ی ایکس برای نمونه‌های هر مرحله مورد آنالیز قرار گرفت. با استفاده از روش‌های تحلیلی ویلیامسون- هال و وارن- اورباخ روند ریز شدن اندازه دانه و منحنی توزیع اندازه دانه برای مراحل مختلف پرس کاری شیاری به دست آمد و با یکدیگر مقایسه شد. شبیه‌سازی المان محدود نیز با استفاده از نرم افزار ABAQUS برای اولین مرتبه‌ی شیاردار کردن نمونه در مرحله‌ی اول پرس کاری شیاری انجام شد و نتایج حاصل از آن با نتایج تجربی مقایسه گردید.

^۱ - Pass

^۲ - Constrained Groove Pressing (CGP)

فصل دوم

مروری بر تحقیقات انجام شده

برخلاف آن چه تصور می‌شود، نانو ساختارها و ساختارهای فوق ریز دانه پدیده‌های نوینی نیستند. در سال ۱۹۰۶ میلادی ویلم^۱ در آلیاژ Al-Cu-Mg-Mn رفتار پیرسختی را مشاهده نمود. مریکا^۲ و همکارانش در سال ۱۹۱۹ اظهار کردند که این رفتار به دلیل رسوب ذراتی با اندازه‌ی زیر میکرون می‌باشد که بعدها توسط اشعه‌ی X^۳ و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)^۴ این ادعا به اثبات رسید و تأیید شد. این رسوب‌ها تحت عنوان نواحی GP، GP II (θ'') و نیمه پایدار^۵ (θ') شناخته می‌شوند که معمولاً ضخامتی حدود ده نانومتر و قطری حدود صد نانومتر را دارند. این نامگذاری به این دلیل بود که برای اولین بار گاینیر^۶ و پرستون^۷ با پراش اشعه‌ی X به وجود این نواحی اشاره کردند. در دهه‌ی ۱۹۶۰، لانگفورد^۸ و کهن^۹ نشان دادند که ریزساختار آهن Fe-0.003%C که در اثر فرآیند کشش سیم کرنش‌های بالایی را تحمل می‌کند، شامل ریزدانه‌هایی به قطر ۳۰۰ نانومتر می‌باشد [۱۱].

^۱ - Wilm

^۲ - Merica

^۳ - X-Ray

^۴ - Transmission electron microscopy

^۵ - Metastable

^۶ - Guinier

^۷ - Preston

^۸ - Langford

^۹ - Cohen

به طور کلی به منظور تبدیل یک جامد درشت دانه به یک جامد با دانه‌بندی فوق ریز و نانو به حضور دو عامل، (۱) اعمال کرنش پلاستیک بالا جهت ایجاد و القای دانسیته‌ی بالایی از نابجایی‌ها در ماده و (۲) نظم‌گیری مجدد نابجایی‌ها جهت ایجاد یک آرایه‌ای از آن‌ها، ضروری است. اگرچه در روش‌های تغییر شکل فلزی مانند نورد، کشش و اکستروژن، امکان ایجاد ساختارهای فوق‌ریز قابل انتظار است اما در این فرآیندها به دلیل کوچک شدن سطح مقطع قطعه در حین فرآیند، امکان دستیابی به کرنش‌های بسیار زیاد وجود ندارد و کرنش‌های ایجاد شده برای تولید مواد نانو ساختار و فوق‌ریز دانه کافی نیستند. به دلیل وجود این محدودیت‌ها، تلاش‌ها و تحقیقات به سمت توسعه‌ی روش‌هایی بر اساس تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) جهت حل این مشکلات جهت‌گیری کردند، به طوری که در این روش‌ها کرنش‌های بالایی در دماهای نسبتاً کم، عموماً بدون ایجاد تغییرات در سطح مقطع نمونه اعمال می‌شود [۱۰-۱۲]. از این رو توسط روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، مواد نانو ساختار با ساختارهای فوق‌ریز دانه به صورت دانه‌هایی با مرزدانه‌های با زاویه‌ی جهت‌گیری بالا^۱ حاصل شده‌اند، در حالی که در روش‌های تغییر شکل مرسوم مانند نورد، ساختارهای سلولی شامل مرزهای با اختلاف جهت‌گیری کم^۲ دیده شده بودند [۱۰، ۱۳]. همان‌طور که بیان شد به‌طور کلی مواد با ساختار نانو را به صورت مواد جامد با اندازه دانه‌ی در محدوده‌ی ۱-۱۰۰ نانومتر تعریف می‌کنند. در این میان مواد نانو ساختار تولید شده به وسیله‌ی روش‌های SPD معمولاً اندازه دانه‌ای در محدوده‌ی ۱۰۰-۱۰۰۰ نانومتر دارند [۴، ۱۰، ۱۱، ۱۴، ۱۵]. اما از آنجایی که مواد نانو ساختار تولید شده توسط روش‌های SPD دارای ساختاری‌اند که شامل ریزدانه‌ها^۳، سلول‌های نابجایی^۴ و مناطق پراش هم‌دوس اشعه‌ی ایکس^۵، که اغلب کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر می‌باشند، بنابراین آن‌ها را مواد با ساختار نانو می‌نامند [۴، ۱۰].

-
- 1- High Angle Grain Boundary (HAGB)
 - 2- Low Angle Grain Boundary (LAGB)
 - 3- Subgrain
 - 4- Dislocation Cells
 - 5- X-ray Coherent Diffraction Domains (crystallites)

۲-۱- روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید

یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید روش آسیاب‌کاری مکانیکی یا آسیاب‌کاری گلوله‌ای^۱ می‌باشد [۱۸-۱۶، ۸]. در این روش به دلیل تولید مواد نانو به صورت ذرات پودری نیاز به یک فشرده سازی و تفجوشی بعدی جهت تولید مواد نانوساختار و فوق‌ریز دانه با حجم بالا است. به همین دلیل عواملی چون ورود آلودگی و رشد دانه‌ها در حین فرآیند زینتر باعث ایجاد مشکلاتی شده‌اند. در سال‌های اخیر، برای تولید مواد حجیم^۲ نانو ساختار، روش‌های دیگر SPD توسعه داده شده‌اند که به واسطه‌ی مزیت‌هایی که نسبت به روش‌های دیگر تولید مواد نانو ساختار دارند، بسیار مورد توجه متخصصین علم مواد قرار گرفته‌اند [۱۵، ۱۰].

از اوایل دهه‌ی ۹۰ روش‌های مختلفی جهت ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) به منظور تولید مواد نانوساختار و فوق‌ریز دانه با حجم و ابعاد بزرگ معرفی و گسترش داده شدند. علاوه بر مزایای ذکر شده‌ی این روش‌ها نسبت به دیگر روش‌های ساخت مواد نانو ساختار، در این روش‌ها حین فرآیند تغییر قابل ملاحظه‌ای در ابعاد خارجی نمونه‌ها ایجاد نمی‌شود. روش‌های SPD که جهت تولید مواد با ساختارهای فوق‌ریز دانه و نانو تا به امروز شناخته شده‌اند عبارتند از: "فشار/اکستروژن در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار"^۳ [۲۷-۱۹، ۱۶، ۱۵، ۱۰]، "پیچش تحت فشار بالا"^۴ [۳۳-۲۸، ۱۰، ۱۱، ۱۵، ۱۶]، "اتصال به روش نورد تجمعی"^۵ [۴۳-۳۴]، "فورج/فشردن چند محوره"^۶ [۴۵، ۴۴، ۱۰]، "موج دار و صاف کردن متوالی"^۷ [۴۷ و ۴۶]، "برش غلطکی"^۸ [۵۰-۴۸]، "تغییر شکل برشی تسمه‌ی محدود شده به صورت پیوسته"^۹ [۵۲، ۵۱، ۲۸]، "اکستروژن - فشار

1- Mechanical Attrition or Ball Mill

2- Bulk

3- Equal Channel Angular Extrusion/Pressing (ECAE/P)

4- High Pressure Torsion (HPT)

5- Accumulative Roll Bonding (ARB)

6- Multi-axial Compression/Forging (MAC/F)

7- Repetitive Corrugation and Strengthening (RCS)

8- Conshearing

9- Continues Confined Strip Shearing (C2S2)

تناوبی^۱ [۵۷-۵۳]، "اکستروژن جانبی در دو کانال هم مقطع"^۲ [۵۸]، "اکستروژن برشی ساده"^۳ [۵۹] و "پرس کاری شیاری محدود شده"^۴ [۶۷-۶۰]. شایان ذکر است که امروزه روش‌هایی نیز جهت ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید سطحی به منظور ایجاد ساختارهای فوق‌ریز و نانوی سطحی مانند "ساچمه کاری"^۵ [۶۸]، "فرآیند سایش مکانیکی سطحی"^۶ [۶۹]، "پرس کاری سیمی"^۷ [۷۰]، "آزمایش سقوط ساچمه"^۸ [۶۸ و ۷۱] و "نوردکاری عمیق"^۹ [۷۴-۷۲] به منظور بهبود خواص سطحی مواد توسعه داده شده‌اند. لذا در این فصل به معرفی چند روش از روش‌های مهم و کاربردی تغییر شکل پلاستیک شدید می‌پردازیم و همچنین در پایان به خواص مواد تولید شده توسط این روش‌ها پرداخته خواهد شد.

۲-۱-۱- فشار/اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار (ECAE)

روش ECAE در اواخر دهه‌ی ۷۰ توسط سگال^{۱۰} و همکاران در یک انستیتو واقع در مینسک^{۱۱} و در سوویت یونیون^{۱۲} سابق ابداع گردید. هدف اولیه از ابداع این روش، معرفی یک فرآیند تغییر شکل جدید بود که از طریق آن بتوان کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد (از نوع برشی) در ماده ایجاد نمود. پس از آن در اوایل دهه‌ی ۹۰، ولیف^{۱۳} و همکاران نشان دادند که این روش قابلیت ایجاد مواد با دانه‌بندی بسیار ریز (کوچکتر از میکرون) را داراست. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که

¹- Cyclic Extrusion and Compression

²- Dual Equal Channel Lateral Extrusion

³- Simple shear extrusion (SSE)

4- Constrained Groove Pressing (CGP)

5- Shot peening

6- Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT)

7- Wire Brushing

8- Ball Drop Test

9- Deep Rolling

¹⁰ - Segal

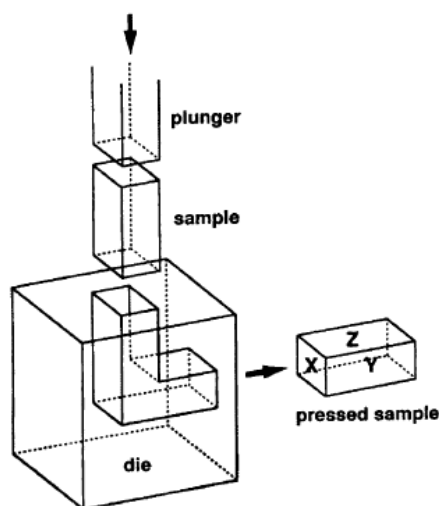
¹¹ - Minsk

¹² - Soviet Union

¹³ - Valiev

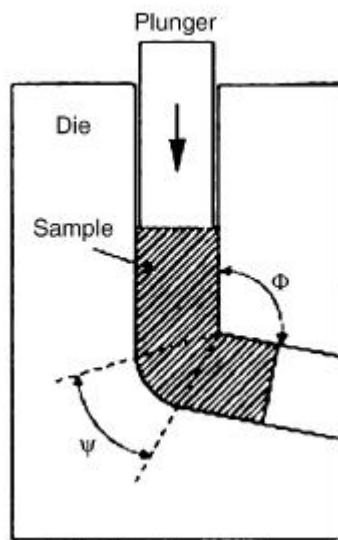
مواد ایجاد شده توسط این روش نسبت به مواد دانه درشت، خواص ویژه‌ای از جمله استحکام بسیار زیاد و قابلیت سوپر پلاستیک در نرخ کرنش‌های بیشتر و دماهای کمتر، از خود نشان می‌دهند. معرفی روش ECAE به عنوان یک روش مؤثر برای تولید مواد با دانه بندی بسیار ریز، همراه با خواص مکانیکی و فیزیکی ویژه، علاقه‌ی بسیاری از محققین را برای به‌کارگیری این روش و اعمال آن بر روی مواد مختلف در پی داشته است. به همین دلیل، تا کنون بر خلاف عمر کوتاه روش (حدود دو دهه) مقالات متعددی در ارتباط با این موضوع به چاپ رسیده است و هم اکنون نیز بسیاری از محققین در حال بررسی فرآیند از جنبه‌ی تئوری و عملی می‌باشند [۷۵].

اساس روش ECAE در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. به طور کلی قالب ECAE دارای دو کانال با سطح مقطع یکسان می‌باشد. جهت انجام فرآیند، با توجه به ابعاد کانال‌ها، نمونه‌هایی با مقطع دایره یا مربع و با سطح مناسب ماشین‌کاری می‌شوند. طول نمونه‌ها معمولاً در حد ۶۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر و قطر مقطع آن‌ها حدود ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر انتخاب می‌شود. پس از اعمال روانسازهای مناسب، نمونه درون کانال ورودی قرار می‌گیرد. سپس به وسیله‌ی یک سنبه و با استفاده از یک ماشین پرس، تحت فشار قرار می‌گیرد و از این طریق به کانال خروجی اکستروژد می‌شود [۱۰].



شکل (۱-۲): اساس روش ECAE [۱۰].

معمولاً همان‌گونه که در شکل (۱-۲) دیده می‌شود، کانال‌ها عمود بر هم و بدون انحنای خارجی انتخاب می‌شوند. در حالت کلی زاویه‌ی برخورد کانال‌ها را با Φ و زاویه‌ی انحنای خارجی آن‌ها را با Ψ نشان می‌دهند (شکل (۲-۲) [۲۴]).



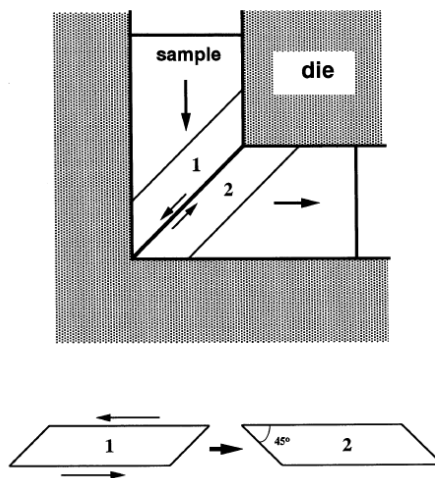
شکل (۲-۲): شماتیک کلی قالب فرآیند ECAE [۲۴].

در حین فرآیند، نمونه از درون کانال‌ها به صورت یک ماده‌ی صلب^۱ حرکت می‌کند و در حالت ایده‌آل تغییر شکل آن، تنها به یک صفحه واقع در فصل مشترک کانال‌ها محدود می‌شود. در عمل به دلیل اصطکاک، ماهیت ماده و شرایط هندسی قالب (مانند زوایای Φ و Ψ)، ناحیه‌ی تغییر شکل ماده از یک صفحه به یک ناحیه تحت عنوان ناحیه‌ی تغییر شکل^۲ گسترش می‌یابد.

ماهیت تغییر شکل در فرآیند ECAE از نوع برش ساده^۳ می‌باشد. شکل (۳-۲) یک قالب ECAE را در حالت دو بعدی با کانال‌های عمود بر هم و بدون انحنای خارجی نشان می‌دهد. با فرض ایده‌آل بودن تغییر شکل، المان شماره‌ی (۱) در کانال ورودی پس از اکستروژن شدن به کانال خروجی، به المان شماره‌ی (۲) تبدیل می‌شود. با توجه به نوع تغییر شکل این المان که در قسمت پایینی شکل

¹ - Rigid
² - Deformation Zone
³ - Simple Shear

(۳-۲) نشان داده شده است، دیده می‌شود که ماهیت تبدیل المان شماره‌ی (۱) به المان شماره‌ی (۲) در فرآیند ECAE، از نوع برشی ساده می‌باشد [۱۰].



شکل (۳-۲): ماهیت تغییر شکل در فرآیند ECAE [۱۰].

سگال کرنش معادل ایجاد شده در هر پاس را در یک قالب با زاویه‌ی برخورد 2Φ به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cot \Phi \quad (1-2)$$

پس از آن ایواهاشی^۱ و همکاران میزان کرنش اعمالی در اثر این فرآیند را با توجه به شعاع‌های Φ و Ψ به صورت زیر محاسبه کردند [۷۵]:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right)}{\sqrt{3}} \quad (2-2)$$

واضح است که رابطه‌ی (۲-۲) در حالت $\Psi=0$ به رابطه‌ی (۲-۱) یعنی رابطه‌ی ارائه شده توسط سگال تبدیل می‌شود.

¹ - Iwahashi

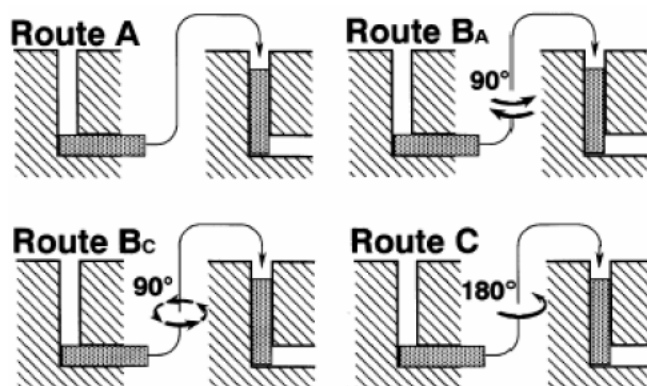
لی^۱ [۷۶] نیز با به کارگیری تئوری حد بالایی^۲، کرنش ایجاد شده در هر پاس را در یک قالب با کانال‌های غیر همسان محاسبه نمود. رابطه‌ای که وی به دست آورد در شرایط خاص یعنی سطح مقطع یکسان کانال‌ها، به رابطه‌ی سگال و ایواهاشی تبدیل خواهد شد. آنالیز حد بالایی، در حقیقت یک روش ریاضی است که برای پیش‌بینی تنش و نیرو در فرآیندهای تغییر شکل به کار می‌رود. به کمک این روش می‌توان اثر پارامترهایی مانند هندسه‌ی قالب و اصطکاک را از جنبه‌ی مکانیکی بررسی نمود. تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهند که آنالیز حد بالایی فرآیند ECAE، به دلیل پیچیدگی هندسه‌ی تغییر شکل در مقاطع گرد، بیشتر برای مقاطع مربع انجام شده است [۷۷ و ۷۸]. ولی در سال ۲۰۰۸ ریحانیان و همکاران برای اولین بار فرآیند ECAE با مقطع گرد را توسط تئوری حد بالایی آنالیز نمودند [۷۹ و ۸۰].

به واسطه‌ی این‌که در این روش ابعاد نمونه تغییر نمی‌کند، لذا با تکرار مراحل اکستروژن برای یک نمونه‌ی مشخص، می‌توان مقادیر کرنش پلاستیک بالایی جهت ایجاد ساختارهای فوق‌ریز و نانو ایجاد نمود. شایان ذکر است که با در نظر گرفتن سطح مقطع نمونه‌ها به صورت اشکال متقارن، مانند دایره، مربع و یا شش ضلعی، می‌توان قطعه کار را در بین مراحل چرخاند تا تغییر شکل برشی در صفحات مختلفی صورت گیرد. بدین منظور مسیر^۳ های گوناگونی در چرخش نمونه‌ها بیان شده است، شکل (۲-۴) [۱۰]. به دلیل توانایی روش ECAP در تولید قطعاتی با ابعاد صنعتی، در چندین سال گذشته تحقیقات بیشماری جهت بررسی چگونگی فرآیند، تغییرات ساختاری ماده در حین فرآیند، خواص مکانیکی و فیزیکی و نیز چگونگی صنعتی کردن آن، صورت گرفته است [۱۹-۲۵].

¹ - Lee

² - Upper-Bound

³ - Route



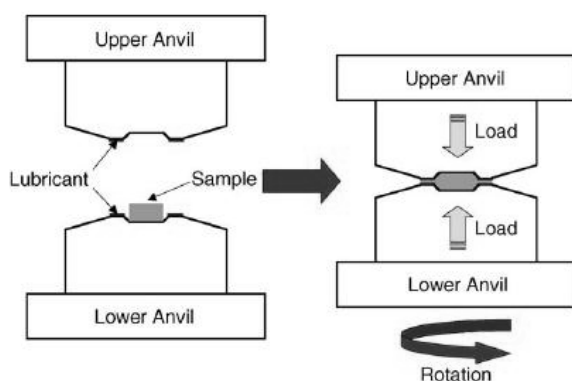
شکل (۲-۴): تکنیک‌های گوناگون جهت فرآیند ECAP/E [۱۰].

۲-۱-۲- پیچش تحت فشار بالا (HPT)

ابزار پیچش تحت فشار بالا برای اولین بار به منظور بررسی استحاله‌ی فازی به‌وسیله‌ی تغییر شکل بالا جهت ارزیابی ساختار و تغییرات دمای تبلور مجدد بعد از این تغییر شکل پلاستیک بالا مورد استفاده قرار گرفت. سپس، ساخت موفق مواد نانوساختار همگن با مرزدانه‌های با اختلاف جهت-گیری بالا از طریق کرنش پیچشی، توسط ولیف [۱۰] در سال ۱۹۹۱ منجر به پیدایش روش جدیدی برای تولید مواد نانوساختار شد.

شکل (۲-۵) شماتیک روش HPT را نشان می‌دهد. اساس کار به این صورت است که یک نمونه‌ی کوچک به شکل دیسک بین دو سندان قرار گرفته و سپس در اثر چرخش یکی از سندان‌ها تحت فشار اعمالی بالای چندین گیگا پاسکال، کرنش داده می‌شود. به‌واسطه‌ی این چرخش، نیروهای اصطکاکی سطحی کرنش پلاستیک بالایی را ناشی از فرآیند برشی در نمونه ایجاد می‌کند [۱۰، ۱۵، ۱۶]. از مزایای روش HPT می‌توان به ایجاد ساختارهای با اندازه دانه‌های بسیار ریز (کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر) و نیز توانایی آن در اعمال چنین کرنش‌هایی به مواد ترد، مانند بین‌فلزی‌ها و نیمه‌هادی‌ها، اشاره کرد. مهم‌ترین عیب روش HPT تولید نمونه‌های بسیار کوچک است. بزرگترین نمونه‌ای که می‌توان با این روش تولید کرد دارای بیشترین قطر ≈ 20 میلی‌متر و بیشترین

ضخامت ~ 1 میلی‌متر می‌باشد. شایان ذکر است که تغییر شکل و میزان کرنش از مرکز دیسک تا قطر خارجی آن غیریکنواخت می‌باشد. در بین روش‌های تغییر شکل شدید، این روش تنها روشی است که توانایی تولید مواد با ساختارهای با اندازه‌دانه‌ی در حد چند ده نانومتر دارد. به همین دلیل به طور گسترده به صورت آزمایشگاهی در چند سال اخیر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است [۱۰-۱۲، ۱۵، ۱۶، ۲۸-۳۳].



شکل (۲-۵): نمایی شماتیک از فرآیند HPT [۳۲].

۲-۱-۳- اتصال به روش نورد تجمعی (ARB)

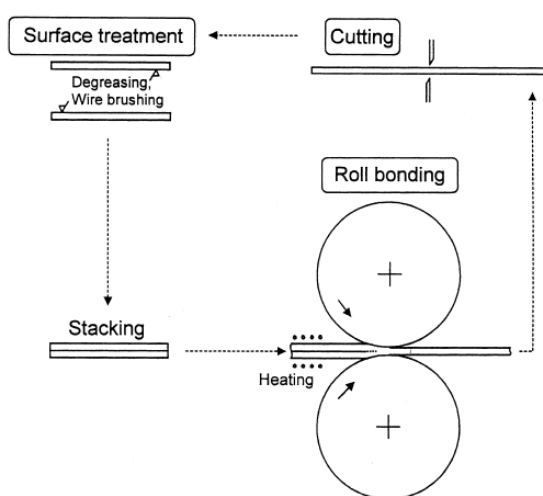
یکی از روش‌های تولید مواد نانو ساختار با اعمال تغییر شکل‌های شدید، روش اتصال به روش نورد تجمعی (ARB) می‌باشد. فرآیند ARB برای اولین بار در اواخر دهه‌ی ۹۰ توسط تسوجی^۱ و همکارانش [۱۲ و ۳۶] به منظور تغییر شکل‌های پلاستیک شدید بر روی ورق‌های فلزی پیشنهاد و توسعه داده شد. شکل (۲-۶) شماتیکی از فرآیند ARB را نشان می‌دهد. چنان‌که در شکل مشاهده می‌شود در این فرآیند با روی هم قرار دادن و جفت کردن مواد (انباشته سازی)^۲ و ایجاد اتصال توسط فرآیند نورد به عبارت دیگر جوش سرد نوردی^۳ که در سیکل‌های مختلف

^۱ - Tsuji

^۲ - Stacking

^۳ - Cold Roll Welding

تکرار می‌شود، در نهایت موادی با ساختار نانو به وجود می‌آید [۴۳-۳۴]. شایان ذکر است که در فرآیند فوق ابتدا دو لایه از یک جنس بعد از آماده‌سازی سطحی (سطوح مقابل هم) شامل چربی‌زدائی و برس‌کاری و در صورت نیاز برای افزایش استحکام پیوند بین فصل مشترک آن‌ها ضمن نورد، پیش‌گرم شده و به وسیله‌ی فرآیند نورد به یکدیگر متصل می‌شوند. سپس در مرحله‌ی بعد تسمه‌ی دو لایه‌ی حاصل به دو قسمت مساوی تقسیم شده، نوارهای بریده شده دوباره بعد از آماده‌سازی سطحی و پیش‌گرم به‌طور همزمان نورد می‌شوند. این فرآیند به‌صورت متوالی تکرار می‌شود لازم به ذکر است که دمای پیش‌گرم فرآیند فوق باید در زیر دمای تبلور مجدد ماده انجام گیرد، زیرا دمای تبلور مجدد و دماهای بالاتر از آن باعث حذف کرنش‌های تجمعی می‌شود [۱۲، ۳۵، ۳۶]. البته دما خیلی پایین در نظر گرفته نمی‌شود چرا که دمای پایین منجر به انعطاف پذیری کم و استحکام پیوندی پایین بین دو لایه می‌شود. شایان ذکر است که برای ایجاد جوش سرد بین لایه‌ها نیاز به یک حداقل تغییر شکل پلاستیک می‌باشد که به‌عنوان تغییر شکل آستانه‌ای برای رسیدن به پیوندی مناسب بین لایه‌ها مطرح می‌گردد. نشان داده شده است که این تغییر فرم آستانه‌ای با افزایش دما کاهش می‌یابد [۳۶].



شکل (۲-۶): نمایشی شماتیک از فرآیند اتصال به روش نورد تجمعی [۱۲].