بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه آزاد اسلامی

واحد شاهرود

دانشکده فنی مهندسی، گروه مواد

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد "M.Sc."

گرایش: سرامیک

عنوان:

بررسی اثر روش‌های مختلف توزیع ذرات SiC بر استحکام چسبندگی و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های $Al\text{-}SiC_p$ تولید شده به روش نورد تجمعی پیوندی (ARB)

استاد راهنما:

دکتر جمیله ویسی زاده

استاد مشاور:

دکتر صاحبعلی منافی

نگارش:

اعظم اسماعیلی

زمستان ۱۳۹۲

تقدیم

تقدیم به بهانه های زندگیم

پدر، مادر و همسر عزیزم

سپاسگذاری

یزدان بخشاینده را سپاسگزارم که باردیگر توفیق فرخنده کسب علم ودانش را بر من ارزانی داشت.
وظیفه خود می دانم از زحمات اساتید گرامی راهنما و مشاور خود خانم دکتر جمیله ویسی زاده و جناب آقای دکتر صاحبعلی منافی کمال تشکر راداشته باشم.

چکیده

نورد تجمعی پیوندی یکی از جدیدترین فرایندهای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی در دهه اخیر است. در این پژوهش امکان پذیری ساخت کامپوزیت‌های نانوساختار Al-SiC با ذرات تقویت کننده نانو (SiC) به روش نورد تجمعی پیوندی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان کاهش ضخامت و افزایش دما، چسبندگی بین لایه‌ها افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش میزان پودر بین لایه‌های آلومینیومی چسبندگی بین لایه‌ها کاهش یافته است. همچنین مشخص شده است که بهترین روش به منظور توزیع نانو ذرات بین ورقه‌ها، روش پاششی است. از طرف دیگر نتایج نشان داد که درصد بهینه نانوذرات SiC برای افزودن بین ورقه‌های آلومینیوم، ۲% وزنی است. بنابراین در مرحله بعدی پژوهش به ساخت کامپوزیت با ۲% وزنی نانو SiC به عنوان کامپوزیت بهینه پرداخته شد. پس از ساخت این کامپوزیت‌ها از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی برای بررسی ریز ساختار این کامپوزیت‌ها استفاده شد. سختی کامپوزیت‌ها در سیکل‌های مختلف نورد توسط سختی سنجی ویکرز مورد بررسی قرار گرفت. اندازه دانه فرعی نمونه‌ها در سیکل‌های مختلف نورد توسط نرم افزار MAUD مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد سیکل‌های نورد، چسبندگی بین لایه‌های کامپوزیتی و توزیع ذرات تقویت کننده بهبود می‌یابد. بررسی‌های اندازه دانه فرعی نمونه‌های کامپوزیتی دارای ۲% وزنی ذرات نانو SiC نشان می‌دهد که پس از ۹ سیکل، اندازه دانه فرعی نمونه‌ها به کمتر از ^{nm} ۱۰۰ می‌رسد. همچنین بررسی‌های سطح مقطع شکست نمونه‌ها نشان داد که با افزایش تعداد سیکل‌های نورد، حالت شکست نمونه‌ها از شکست نرم به شکست نرم برشی تغییر پیدا می‌کند.

کلمات کلیدی: آلومینیوم، SiC، نورد تجمعی پیوندی، خواص مکانیکی، سطح مقطع شکست، کامپوزیت‌های نانو ساختار

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده ۱

مقدمه ۲

فصل اول : مروری بر مطالب

۱-۱. معرفی و تاریخچه ۵

۱-۲. تغییر شکل پلاستیکی شدید ۷

۱-۳. مهمترین فرآیندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید ۸

۱-۳-۱. فرایند فشار زاویه‌ای در کانال‌های هم‌مقطع ۸

۱-۳-۲. فرآیند پیچش در فشار بالا (HPT) ۹

۱-۳-۳. فشار و اکستروژن سیکلی (CEC) ۱۰

۱-۳-۴. فرایند اکستروژن پیچشی (TE) ۱۱

۱-۳-۵. فشار زاویه‌ای در کانال پیچشی (TCAP) ۱۲

۱-۳-۶. فرایند فورج چند جهته (MDF) ۱٤

۱-۳-۷. فرایند نورد پیوندی-تجمعی(ARB) ۱۵

۱-٤. تحولات ریزساختار در تغییر شکل شدید ۱۸

۱-۴-۱. تبلورمجدد دینامیکی هندسی ۱۸

۱-٤-۲. توسعه ریزساختار در فرایندهای SPD ۱۹

۱-۵. تحولات ریزساختار در فرآیند نورد تجمعی پیوندی ۲۰

۱-٦. خواص فلزات فرآوری‌شده توسط فرآیند ARB ۲۳

۱-۶-۱. آلومینیوم فراوری‌شده توسط فرایند ARB ۲۳

۱-۶-۲. مس فراوری‌شده توسط فرایند ARB ۲٤

۱-۶-۳. آلیاژ برنج ۷۰/۳۰، فراوری‌شده توسط فرایند ARB.....۲٤
۱-۷. استفاده از فرایند ARB در تولید کامپوزیت‌های چند لایه.....۲٤
1-۷-۱. کامپوزیت چند لایه آلومینیوم/نیکل.....۲۵
1-۷-۲. کامپوزیت چند لایه آلومینیوم/مس.....۲٦
1-۷-۳. کامپوزیت چند لایه آلومینیوم/تیتانیوم.....۲۷
1-۷-٤. کامپوزیت چندلایه مس/نقره.....۲۹
۱-۸ استفاده از فرایند ARB در تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی.....۳۱
۱-۸-۱. کامپوزیت آلومینیوم/کاربید سیلیسیوم.....۳۱
۱-۸-۲. تولیدکامپوزیت آلومینیوم/آلومینا با استفاده از پودر آلومینا.....۳۲
۱-۸-۳. تولید کامپوزیت آلومینیوم/آلومینا باالستفاده ازفرایند آندایزینگ.....۳٤
۱-۹. تأثیر اندازه ذرات بر ریزساختار و خواص مکانیکی CMC تولیدشده توسط ARB.....۳۸
فصل دوم : مواد و روشهای پژوهش
۲-۱. مواد و ترکیب شیمیایی.....٤۵
۲-۲. روش انجام فرایند.....٤٦
۲-۳. ارزیابی پارامترهای موثر بر استحکام پیوند.....٤٦
۲-۴. تولید کامپوزیت‌های Al-SiC به روش نورد تجمعی پیوندی (ARB).....۵۰
۲-۵. بررسی‌های ریز ساختاری.....۵۱
۲-۶. آزمون کشش.....۵۲
۲-۷. آزمون سختی سنجی.....۵۲
۲-۸. تعیین پارامتر ریز ساختاری.....۵۲
۲-۹. بررسی‌سطح مقطع شکست.....۵۳
فصل‌سوم : نتایج و بحث

۳-۱. مقدمه ٥٤
۳-۲. بررسی پارامترهای تاثیر گذار بر استحکام پیوند ٥٥
۳-۲-۱. اثر روش توزیع SiC بر نیروی چسبندگی ٥٥
۳-۲-۲. اثر کاهش ضخامت ٥٦
۳-۲-۳. اثر مقدار SiC بر پیوند زنی ٥٧
۳-۲-۴. اثر دمای نورد بر استحکام پیوند ورقه‌ها ٦٤
۳-۳. بررسی خواص کامپوزیت‌های Al-SiC ٦٥
۳-۳-۱. بررسی ریزساختار کامپوزیت‌های Al-2 wt.% SiC ٦٥
۳-۳-۲. خواص کششی ٧٠
۳-۳-۳. سختی ٧٧
۳-۳-۴. بررسی سطح مقطع شکست نمونه‌های Al-2 wt.% SiC ٧٩
۳-۳-۵. محاسبه پارامترهای ریزساختاری توسط روش ریتولد ٨٤
فصل چهارم : نتیجه گیری و پیشنهادات
۴-۱. نتیجه گیری ٨٩
۴-۲. پیشنهادها ٩٠
منابع ٩١
چکیده انگلیسی ١٠٢

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

۱-۱. جدول : تغییرات هندسی ماده در فرایند ARB.....۱۶

۱-۲. جدول : ترکیب شیمیایی ورقه های آلومینیوم اولیه.....۴۶

۲-۲. جدول : مشخصات کامپوزیت‌های Al-SiC تولیدشده ۵۱

۳-۱. جدول : میانگین نیروی چسبندگی برای نمونه‌های دارای SiC و بدون آن.....۶۲

۳-۲. جدول :نتاج به دست آمده توسط نرم افزار MAUD از آنالیز الگوی پراش نمونه‌های مختلف. ۸۶

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

۱-۱. شکل : نمایش شماتیک فرایند ECAP.....۸

۱-۲. شکل : چرخش نمونه در روشهای مختلف فرایندECAP. ۹

۱-۳. شکل : نمایش شماتیک HPT با نمونه دیسکی.....۱۰

۱-٤. شکل : نمایش شماتیک فرایند CEC.....۱۱

۱-۵. شکل : شماتیک نمونه در فرایند اکستروژن پیچشی.....۱۱

۱-٦. شکل : شکل قالب در فرایند TCAP.....۱۳

۱-۷. شکل : تصویر شماتیک فرایندفورج در چند جهت با تنش اعمالی σ ۱٤

۱-۸. شکل : تصویر شماتیک فرایند نورد پیوندی- تجمعی (ARB) ۱۵

۱-۹. شکل : ظاهر نمونهقرار گرفته تحت فرایندARB، الف) نمونه ۱۱۰۰ Alب) نمونه۵۰۸۳ Al ...۱۷

۱-۱۰.شکل : تصویر تاثیرسرعت کرنش بر اندازه دانه فرعی و به تبعشروع برخورد دانه ها.....۱۹

۱-۱۱. شکل : توزیع کرنش برشی اضافی درطول ضخامت نمونه الف) یک سیکل.....۲۱

۱-۱۲.شکل: نقشه های عدم تطابق مرزها به دست آمده از اندازهگیری EBSP در آلومینیوم۱۱۰۰ ..۲۳

۱-۱۳. شکل : تصویر SEM کامپوزیت چند لایه Al/Ni الف) ساندویچ اولیه.....۲٦

۱-۱٤. شکل : تصویر SEM ازسطح مقطع عرضی کامپوزیت لایهای Al/Ti..... ۲۷

۱-۱۵. شکل : منحنی تنش-کرنش مهندسی کامپوزیت لایهای Al/Ti در سیکلهای مختلف ARB ۲۸

۱-۱٦. شکل : تغییرات درصد ازدیادطول کامپوزیت با افزایش تعداد سیکل ARB ۲۸

۱-۱۷. شکل:تغییرات خواص کششی کامپوزیت Cu–Ag در فرایند ARB، بر حسب تعداد سیکل.... ۲۹

۱-۱۸. شکل: منحنی تنش-کرنش کامپوزیتهای Al-SiC در سیکلهای مختلف نورد..... ۳۲

۱-۱۹. شکل : تغییرات استحکام کششی کامپوزیت وآلومینیوم خالص فراوریشده توسط ARB.....۳۳

۱-۲۰. شکل : تصویر شماتیک اصول فرایند ARB ۳۵

۱-۲۱. شکل : تغییرات استحکام کششی کامپوزیت Al/3.55%vol Al_2O_3 با افزایش سیکل ۳۷
۱-۲۲. شکل:تغییرات درصد ازدیاد طول کامپوزیت Al/3.55%vol Al_2O_3 بر حسب تعداد سیکل ...۳۷
۲-۱. شکل : تصویر پودرهای SiC استفاده‌شده در این فرایند. ٤٦
۲-۲. شکل : تصویر شماتیکی از فرآیند نوردسرد پیوندی در حضور ذرات SiC ٤٩
۲-۳. شکل : تصویر شماتیکی از آزمون لایه کنی ٤٩
۲-٤. شکل : نمونه‌ای از نمودارهای نیروی چسبندگی بر حسب فاصله ٤٩
۲-۵. شکل : تصویر شماتیکی از اصول فرایند ARB برای‌ساخت کامپوزیت‌های Al-SiC ۵۱
۳-۱. شکل : اثر روش‌های مختلف توزیع SiC بر نیروی لایه کنی ورقه‌های Al-2 wt.% SiC.....۵٦
۳-۲. شکل : تغییر در نیروی چسبندگی ورقه‌های Al-Al در برابر کاهش ضخامت کلی.....۵٦
۳-۳. شکل:تغییرنیروی چسبندگی ورقه‌های کامپوزیتAl-2 wt.% SiC در برابر کاهش ضخامت.... ۵۷
۳-٤. شکل : اثر مقدار ذرات تقویت کننده بر نیروی لایه کنی ورقه‌های آلومینیومی ۵۹
۳-۵. شکل :سطح لایه کنی‌شده (الف) ورقه‌های آلومینیومی و (ب) ورقه‌های Al-4 wt.% SiC ٦۰
۳-٦. شکل : تصویر شماتیکی از تشریح تئوری فیلم.....٦۱
۳-۷. شکل :تغییرات استحکام چسبندگی میانگین برای ورقه‌های آلومینیوم در برابر کاهش ضخامت.٦۳
۳-۸. شکل : اثر دمای نورد بر استحکام لایه کنی در کاهش ضخامت ثابت ۴۰% ٦۵
۳-۹.شکل:بررسی توزیع ذرات SiC در سیکل‌های مختلف نوردپس ازالف)۵،ب)۷وج)۹سیکل....٦٦
۳-۱۰.شکل:بررسی کیفیت پیوند کامپوزیتAl-2 wt.% SiCپس از الف)۳،ب)۵ وج)۹سیکل نورد.٦۸
۳-۱۱. شکل:بررسی کیفیت پیوند در مقاطع RD-NDپس از الف)۳،ب)۴ وج)۹سیکل ARB ٦۹
۳-۱۲. شکل:نمودارهای تنش-کرنش مهندسی کامپوزیت‌های دارای 2wt.% SiC ذره تقویت کننده ..۷۲
۳-۱۳.شکل:بررسی تغییرات استحکام کششی کامپوزیتAl-SiCوAl یکپارچه در برابر تعداد سیکل۷۳
۳-۱٤.شکل :تغییرات درصد ازدیاد طول آلومینیوم یکپارچه و کامپوزیت در برابر تعداد سیکل.....۷٦

۳-۱۵.شکل: بررسی تغییرات سختی نمونه‌های آلومینیوم یکپارچه و کامپوزیت در برابر تعداد سیکل۷۹
۳-۱۶. شکل :سطح مقطع شکست در سیکل الف)سوم وب) نهم نورد ۸۰
۳-۱۷. شکل : بررسیسطح مقطع شکست الف) آلومینیوم خالص آنیل‌شده. ۸۲
۳-۱۷. شکل : ادامه.....۸۳

مقدمه

آلومینیوم وآلیاژهای آن به طور گسترده ای در صنایع هوایی و خودروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده سرامیکی از قبیل کاربیدها و اکسیدها به منظور ساختن کامپوزیت‌های زمینه فلزی(MMCs) [1] ویژگی‌های آن مانند مدول الاستیک، استحکام، مقاومت سایشی و پایداری در دمای بالا را ارتقا می‌دهد. به دلیل این ویژگی‌های جالب کاربرد گسترده‌ای برای مواد کامپوزیتی پایه آلومینیوم مورد انتظار است [۱].

کامپوزیت‌های Al-SiC یک نوع جدید از کامپوزیت‌های زمینه فلزی است که از سال ۱۹۹۸ به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند[۲و۳]. درسال‌های اخیر استفاده از کامپوزیت‌های Al-SiC برای مقابله با چالش مدیریت استحکام در سازه‌های پیشرفته دفاعی با توان رو به افزایش، مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند[٤] .

ذرات SiC به دلیل خواص مکانیکی بالا شامل سختی بالا، صلبیت ضد سایش بالا در حین عملیات‌های سایشی نظیر
الکترود دستگاه‌های EDM [2] وEDAD[3] و هدایت الکتریکی پایین در مقایسه با آلومینیوم به عنوان ذرات تقویت‌کننده به کار می‌روند [۱]. آلومینیوم نیز به دلیل وزن سبک و قیمت مناسب و روش تولید تقریبا آسان آن به عنوان زمینه انتخاب شده است[۵] و با اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده همچنان خواص مطلوب آن حفظ می‌شود [٦]. ذرات SiC دارای ضریب انبساط حرارتی (CTE) پایین هستند [۷]. بنابراین ضریب انبساط حرارتی پایین و استحکام بالای کامپوزیت به وسیله مخلوط کردن فازهای فلزی و سرامیکی مناسب به دست می‌آید [۸].

---

[1] Metal matrix composites
[2] Electrical discharge machining
[3] Electrical discharge abrasive drilling

روش‌های ساخت این مواد کامپوزیتی اغلب شامل ریخته گری، هم رسوبی، اکسیداسیون داخلی و متالورژی پودر می‌باشد. به دلیل قابلیت ترشوندگی ضعیف بین آلومینیوم و ذرات تقویت‌کننده و پراکندگی نامناسب، روش‌های ریخته‌گری غیرعملی هستند. روش‌های هم‌رسوبی و اکسیداسیون داخلی نیز برای تولید انبوه مناسب نیستند. در این بین، روش متالورژی پودر بهترین گزینه است[۹] ، ولی آن هم دارای معایبی از قبیل فرایند پیچیده، دمای کاری بالا، واکنش در فصل مشترک زمینه/تقویت‌کننده به صورت شدید، توزیع غیر یکنواخت فاز دوم و هزینه بالا می‌باشد [٦].

مواد فوق ریزدانه به روش‌های مختلفی نظیر انجماد سریع، رسوب بخار، آلیاژسازی مکانیکی، شکل‌دهی فلز برودتی و تغییر شکل پلاستیکی شدید(SPD) تولید می‌شوند. روش تغییر شکل پلاستیکی شدید مناسب‌ترین روش برای تولید مواد فوق ریزدانه برای کاربردهای صنعتی است [۱۰]. در این روش، کرنش پلاستیک بسیار بالایی روی حجم مواد به منظور ساختن فلزات فوق ریزدانه اعمال می‌شود. هدف اصلی این فرایند، تولید قطعات با استحکام بالا و وزن کم است [۱۱]. روش‌های مختلفی برای تغییر شکل پلاستیکی شدید وجود دارد از جمله، متراکم کردن اکستروژن سیکلی(CEC)، فشار در کانال با زاویه یکسان(ECAP)، کرنش پیچشی تحت فشار بالا(TS). این روش‌ها دو نقطه ضعف مهم دارند. اولین نقطه ضعف این است که ماشین‌های شکل دادن با ظرفیت‌های نیروی بالا و قالب‌های گران‌قیمت نیاز دارند. دوم اینکه، تولید نسبتا پایین است و مقدار مواد تولید شده به وسیله این روش‌ها محدود است [۱۰]. روش دیگر تغییر شکل پلاستیکی شدید روش ARB است. این روش تنها فرآیند تغییر شکل پلاستیکی شدید است که برای تولید مداوم و انبوه مواد حجم قابل استفاده است. این روش در سال ۱۹۹۸ به وسیله "Saito" و همکارانش اختراع شد. در این روش می‌توان حجم مواد را به صورت فوق ریزدانه درآورد. ARB عملی‌ترین فرآیند تغییر شکل حجم برای تولید پیوسته ورق، صفحه و تسمه با ساختار فوق ریزدانه است [۱۲]. درسال‌های اخیر، ARB در ساخت کامپوزیت‌های چند لایه با مواد اولیه غیرمشابه مانند Al/Cu [۱۳]، Ti/Al [١٤]، Al/Ni [١٥] و Al/Mg [١٦] به کار رفته است. همچنین از آن برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی با ذرات تقویت‌کننده نظیر Al/Al_2O_3 [۱۷]، Al/TiO_2 [۱۸] و Cu/Al_2O_3 [۱۹] نیز استفاده شده است.

هدف از این پژوهش؛ تولید کامپوزیت آلومینیوم/کاربید سیلیسیم توسط فرآیند نورد پیوندی تجمعی است. همچنین تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تولیدی مورد مطالعه و بررسی قرار خواهند گرفت.

فصل اول

مروری بر مطالب

۱-۱- معرفی و تاریخچه

پس از کارهای پیشگامانه هال و پچ، دانشمندان و مهندسان مواد به مواد با دانه‌های ریز علاقه‌مند شدند. اندازه دانه ریزتر، استحکام و چقرمگی شکست ماده را افزایش می‌دهد و پتانسیل برای تغییر شکل سوپر پلاستیک در دماهای متوسط و نرخ‌های کرنش بالا را می‌دهد. در اصل، دانه‌های ریز می‌تواند به وسیله عملیات‌های ترمومکانیکی با کنترل دقیق پارامترهای تبلور مجدد (استاتیکی) یا به وسیله استحاله فاز کنترل شده به دست آیند. عموماً این به یک اندازه دانه بالای ۱۰μm یا در موارد نادر، به قطر چند میکرون منجر می‌شود. به‌هرحال، چندین روش برای به دست آوردن دانه‌های زیر یک میکرون یا با اندازه نانو در دسترس است، برای مثال رسوب بخار، آسیاب گلوله ای انرژی بالا، انجماد سریع و تغییر شکل پلاستیکی شدید(SPD)[1]. در این جا دستاوردها و قابلیت‌های SPD مورد بررسی قرار می‌گیرد.

[1] Severe plastic deformation

این روش از توسعه طبیعی یک زیرساختار در حین تغییر شکل گرم یا سرد استفاده می‌کند. پس از تغییر شکل کوچک تا متوسط، سلول یا دانه‌های فرعی معمولاً اندازه‌هایی در محدوده زیر یک میکرون دارند، اما به وسیله مرزهای با زاویه کم (در محدوده ۱۰° -۱) جداشده‌اند. پس از تغییر شکل زیاد (۳ ‹ ε)، بخشی از سلول‌ها یا دانه‌های فرعی ذکر شده یک مرز با زاویه زیاد را توسعه داده و می‌توانند به عنوان دانه مورد بررسی قرار گیرند[۲۰] .

استحکام تمام مواد پلی‌کریستال به اندازه دانه(d) وابسته است. به گونه‌ای که استحکام تسلیم از رابطه هال- پچ بدست می‌آید:

(۱-۱)

$$\sigma_Y = \sigma_0 + A\, d^{-\frac{1}{2}}$$

در جایی که σ_0 تنش اصطکاکی و A ثابت است. به گونه‌ای که از رابطه بالا مشاهده می‌شود با کاهش اندازه دانه، استحکام افزایش می‌یابد و به همین دلیل تمایل فزاینده‌ای جهت تولید مواد با اندازه دانه بسیار ریز وجود دارد. اندازه دانه آلیاژهای تجارتی به طور کلی توسط عملیات ترمومکانیکی از پیش تعیین‌شده جهت کاربردهای خاص تغییرداده می‌شوند. در این عملیات، آلیاژ در شرایط خاص دمایی و تنش‌های مکانیکی قرار می‌گیرد اما این عملیات برای تولید مواد با اندازه دانه کمتر از میکرون نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، از این‌رو توجه خاصی به استفاده از روش‌های جدید برای تولید مواد فوق ریزدانه با اندازه دانه در حد میکرون و نانو معطوف‌شده است. مواد فوق ریزدانه (UFG)[1] ، به عنوان مواد پلی‌کریستال با اندازه دانه بسیار ریز تعریف می‌شوند، میانگین اندازه دانه در این مواد کمتر از یک میکرون می‌باشد. در مواد فوق ریزدانه حجمی، نیاز به ریزساختارهای هم‌محور و هموژن و تعداد زیادی مرزدانه‌های زاویه بزرگ است. وجود میزان زیادی مرزدانه‌های زاویه بزرگ، جهت رسیدن به خواص منحصر به فرد اهمیت فراوانی دارند [۲۰]. دو روش اساسی برای تولید مواد فوق ریزدانه وجود دارد. این روش‌ها شامل روش‌های پایین به بالا و بالا به پایین است. در روش پایین به بالا، مواد فوق ریزدانه توسط تجمع و روی هم انباشتن اتم‌ها، یا به وسیله ترکیب کردن مواد جامد با

[1] Ultrafine-grained materials

اندازه ذرات نانو تولید می‌شوند. نمونه‌ای از این روش‌ها، متراکم کردن(چگالش) گاز بی اثر[1]، رسوب‌دهی الکتریکی[2]، آسیاب گلوله‌ای و استحکام‌بخشی پس از آن[3] است. در عمل این روش‌ها، به تولید نمونه‌های کوچک محدود می‌شوند که می‌توانند برای استفاده در دستگاه‌های الکترونیکی مفید واقع شوند اما به طور کلی برای کاربرد در ابعاد بزرگ مناسب نیستند. محصولات تولیدشده توسط این روش‌ها دارای مقداری تخلخل باقیمانده و آلودگی ایجاد شده در فرایند تولید می‌باشند [۲۱].
روش‌های بالا به پایین روش‌هایی هستند که ماده‌ی درشت دانه ای را به ماده ریز دانه تبدیل می‌نمایند. جهت تبدیل یک جامد با اندازه دانه درشت به ماده‌ای با اندازه دانه فوق ریز، لازم است که کرنش بسیار بزرگ بر نمونه اعمال شود و دانسیته بالایی از نابجایی‌ها تولید شوند. در عمل، توانایی فرایند های فلزکاری متداول مانند اکستروژن یا نورد، در تولید ساختارهای فوق ریزدانه به دو دلیل محدود می‌باشد : ۱) به این دلیل که در کرنش کلی اعمال شده در این روش‌ها محدودیت وجود دارد چون این فرایندها همراه با کاهش در سطح مقطع قطعه کاری می‌باشند [۲۱].

۲) به این دلیل که کرنش‌های اعمال شده در روش‌های متداول برای ایجاد ساختارهای فوق ریزدانه به دلیل کارپذیری عموما کم آلیاژهای فلزی در دمای محیط و دماهای نسبتا پایین کافی نمی‌باشند. در نتیجه این محدودیت‌ها، توجه به ایجاد روش‌های تولید جایگزین بر اساس اعمال کرنش پلاستیک شدید جلب شده‌است. کرنش پلاستیک بزرگ در دماهای نسبتا پایین و بدون ایجاد تغییر در ابعاد سطح مقطع نمونه بر ماده اعمال می‌شود. گزارش‌هایی در مورد استفاده از این فرایندها در تولید مواد حجمی نانوساختار ارائه شده است [۲۱].

۱-۲- تغییر شکل پلاستیکی شدید

فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، به صورت فرایندهایی که در آن ها یک کرنش پلاستیک فوق العاده بزرگ به توده فلز برای ساختن فلزات فوق ریزدانه اعمال می شود، تعریف می‌شوند. هدف اصلی از یک فرایند تغییر شکل شدید، تولید قطعات با استحکام بالاتر و وزن کمتر، با سازگاری زیست محیطی بیشتر است. در فرایندهای معمول فرم دادن فلزات از قبیل نورد کردن، فورج کردن و اکستروژن، کرنش پلاستیک اعمال شده، کمتر از حدود ۲ می‌باشد. هنگامی که نورد چند پاسی، کشش عمیق و اکستروژن با کرنش پلاستیک بالاتر از ۲ انجام می‌شود، ضخامت و قطر خیلی نازک می‌شود

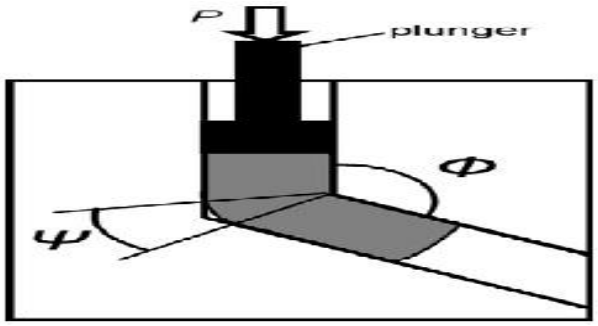
[1] Inert gas condensation
[2] Electrodeposition
[3] Ball milling with subsequent consolidation

که برای استفاده در قطعات سازه‌ای مناسب نیستند. به منظور اعمال یک کرنش به شدت بزرگ بر روی توده فلز، بدون تغییر شکل، تعدادی فرایند های تغییر شکل پلاستیک شدید از قبیل **فشار** زاویه‌ای در کانال‌های هم**مقطع**(ECAP)[۱]، نورد پیوندی-تجمعی(ARB)[۲]، پیچش با فشار بالا(HPT)[۳]، شیاری و مستقیم‌کردن تکراری (RCS)[٤]، اکستروژن فشاری سیکلی(CEC)[٥]و اکستروژن پیچشی(TE)[٦] توسعه پیدا کرده**اند** [۲۱].

۱-۳- مهم‌ترین فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید

۱-۳-۱ - فرایند فشار زاویه‌ای در کانال‌های هم**مقطع**

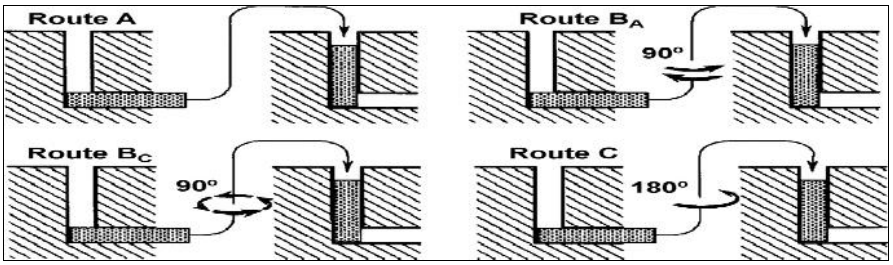
فرایند ECAP، اخیراً توجه بسیاری را به خود جلب کرده است زیرا این فرایند، روش بسیار مناسبی جهت تولید مواد حجمی فوق ریزدانه می**باشد**. تصویر شماتیک این فرایند در شکل (۱-۱) **نشان داده شده است**. در این فرایند، نمونه در یک قالب که دارای دو کانال هم مقطع است و زاویه تقاطع دو کانال است، پرس می‌شود و کرنش برشی بزرگ بر نمونه وارد می‌شود در حالی که شکل و اندازه سطح مقطع نمونه بدون تغییر باقی می‌ماند، بنابراین فرایند را می‌توان چندین بار برنمونه اعمال کرد. ریزساختار و اندازه دانه‌ها درنتیجه تغییر شکل پلاستیک بزرگی که در صفحه فصل‌مشترک دو کانال (صفحه برشی) رخ می‌دهد، تغییر می‌کند [۲۲].



شکل ۱- ۱ : نمایش شماتیک فرایند ECAP [۲۲].

[۱] Equal channel angular pressing
[۲] Accumulative roll bonding
[۳] High pressure torsion
[٤] Repetitive corrugation and straightening
[٥] cyclic extrusion and compression
[٦] Torsion extrusion

روش های مختلفی برای انجام این فرایند وابسته به چرخش نمونه حول محور طولی‌اش در بین دو پاس متوالی، وجود دارد. با تغییر زاویه قالب و روش انجام فرایند، ریزساختارهایی با اندازه دانه و خصوصیات مرزدانه‌ای متفاوت ایجاد می‌شود [۲۲].



شکل ۱- ۲: چرخش نمونه در روشهای مختلف فرایند ECAP [۲۲].

انواع روش های انجام فرایند ECAP:

روش A، بدون انجام چرخش نمونه بین پاس ها.

روش B_A، چرخش نمونه به اندازه ۹۰± در بین پاس ها.

روش B_C، چرخش نمونه به اندازه ۹۰ در بین پاس ها.

روش C، چرخش نمونه به اندازه ۱۸۰ در بین پاس‌ها[۲۲].

۱-۳-۲- فرآیند پیچش در فشار بالا (HPT)

در این فرایند یک دیسک خیلی نازک، در یک قالب بسته به وسیله فشار خیلی بالا فشرده می‌شود. پیچش به وسیله یک سنبه با اصطکاک تماس در فصل مشترک بین دیسک و سنبه اعمال می‌شود. یکی از معایب این روش این است که از آن در نمونه های دیسکی نسبتاً کوچک استفاده می‌شود و برای تولید قطعات حجمی بزرگ استفاده نمی شود. عیب دیگر این روش این است که ریزساختارهای تولید شده، به فشار اعمال شده و موقعیت در داخل دیسک بستگی دارند[۲۳].