

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



روش تغییر شکل پلاستیک شدید

سنتز نانوساختارها

- محمد علی مصطفایی -- دکتری تخصصی - مهندسی مواد - دانشگاه صنعتی شریف
- محمد هادی مقیم -- دکتری تخصصی - مهندسی مواد - دانشگاه شیراز دانشکده فنی و مهندسی گروه

مهندسی

روش تغییر شکل پلاستیک شدید برای تولید مواد نانوساختار

روش های تغییر شکل پلاستیک شدید، از جمله روش های تولید مواد نانوساختار است که در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این فرآیندها که با توجه به شکل محصول آن دسته بندی می شوند، در اثر اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید به فلز، باعث تغییرات ریزساختاری در آن شده و ساختار ماده را تا حد نانومتری تغییر می دهند. در این مقاله پس از آشنایی با مفهوم تغییر شکل پلاستیک شدید، به معرفی برخی از مهمترین روش های تغییر شکل پلاستیک شدید برای مواد بالک، ورق و لوله ای شکل پرداخته می شود و در هر مورد، نحوه انجام فرآیند بیان خواهد شد. در پایان نیز به برخی از نکات مهم در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید از جمله انجام فرآیند در دمای بالا و عملیات حرارتی ماده تغییر شکل پلاستیک شدید یافته اشاره خواهد شد.

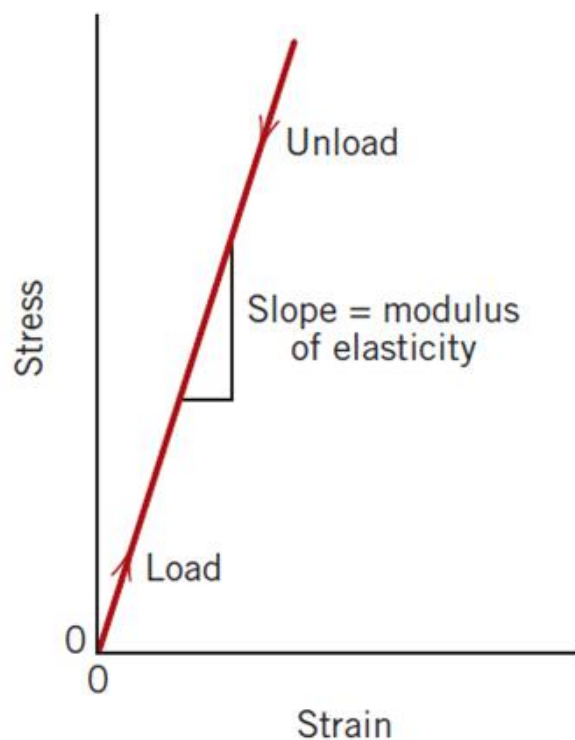
مقدمه

دنیای نانو مواد را از یک دیدگاه می توان به دو دسته اصلی مواد نانو اندازه و مواد نانوساختار دسته بندی نمود. مواد نانو اندازه به این معنی است که ماده مورد نظر ما دارای ابعاد نانومتری است که می تواند به صورت نانوذرات (مانند نانولوله های کربنی و یا نانو ذرات سیلیس) و یا نانو الیاف (Nano-fibers) مانند نانو فیبرهای کربنی) و یا نانو ورق ها (Nano-plates) مانند نانو ورق های میکا یا نانورق های خاک رس) باشد. در سمت دیگر، مواد نانوساختار قرار دارند. مواد نانوساختار به موادی گفته می شود که ابعاد ظاهری آنها به صورت بالک است، ولی ساختار تشکیل دهنده آنها در ابعاد نانو قرار دارد. مواد نانوساختار با دو رویکرد اصلی «بالا به پایین» (Top-down) و «پایین به بالا» (Bottom-Up) ساخته می شوند که در اولی منظور دستکاری ساختار درشت اندازه ماده و رساندن آن به ابعاد نانومتری است و در دومی منظور این است که ماده بالک را از ابتدا به وسیله چینش اتم ها یا اجزای نانو اندازه خلق کنند.

در رویکرد بالا به پایین، روش های گوناگونی وجود دارد که دسته ای از آنها، به صورت اعمال کار مکانیکی بر روی ماده هستند. یکی از روش های اصلی این دسته، روش تغییر شکل پلاستیک شدید (Severe plastic deformation = SPD) است.

مفهوم تغییر شکل پلاستیک

هنگامی که یک فلز تغییر شکل می دهد، بسته به مقدار نیروی وارد شده، این تغییر می تواند به دو صورت در فلز اتفاق بیافتد؛ «تغییر شکل الاستیک» و یا «تغییر شکل الاستیک به اضافه تغییر شکل پلاستیک». تغییر شکل الاستیک آن قسمت از تغییر شکل است که قابل بازگشت می باشد و حالت فنری داشته و در صورتی که بار اعمالی برداشته شود، فلز تغییر شکل یافته به حالت اول باز می گردد. در این نوع تغییر شکل، کرنشی که به فلز وارد می شود، متناسب با مقدار تنش وارد شده است، به این معنی که رابطه بین تنش و کرنش اعمالی به صورت خطی است که به شیب این خط، مدول الاستیک (E) گفته می شود [۲] (شکل ۱). این رابطه را می توان با قانون فئر (یا همان قانون هوک) معادل در نظر گرفت.



شکل ۱- نمودار شماتیک تنش-کرنش یک فلز در حالت الاستیک

هنگامی که تنش اعمالی به فلز، از حد محدوده الاستیک فراتر رود، فرآیند تغییر شکل وارد محدوده پلاستیک می شود. تغییر شکل پلاستیک که در ادامه تغییر شکل الاستیک می آید، یک فرآیند غیر قابل بازگشت است و تغییر شکل دائمی محسوب می شود.

مفهوم تغییر شکل پلاستیک شدید

هنگامی که یک فلز در دماهای نه چندان بالا، تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می گیرد، ساختار درونی فلز شروع به مقاومت در برابر تغییر شکل بیشتر می کند؛ در نتیجه برای ادامه تغییر شکل، باید مقدار تنش بیشتری اعمال نمود. به این حالت ایجاد شده در فلز، کار سختی و یا کرنش سختی (Work hardening or Strain hardening) گفته می شود. در واقع، کار سختی باعث افزایش استحکام و سختی فلز در اثر تغییر شکل می-

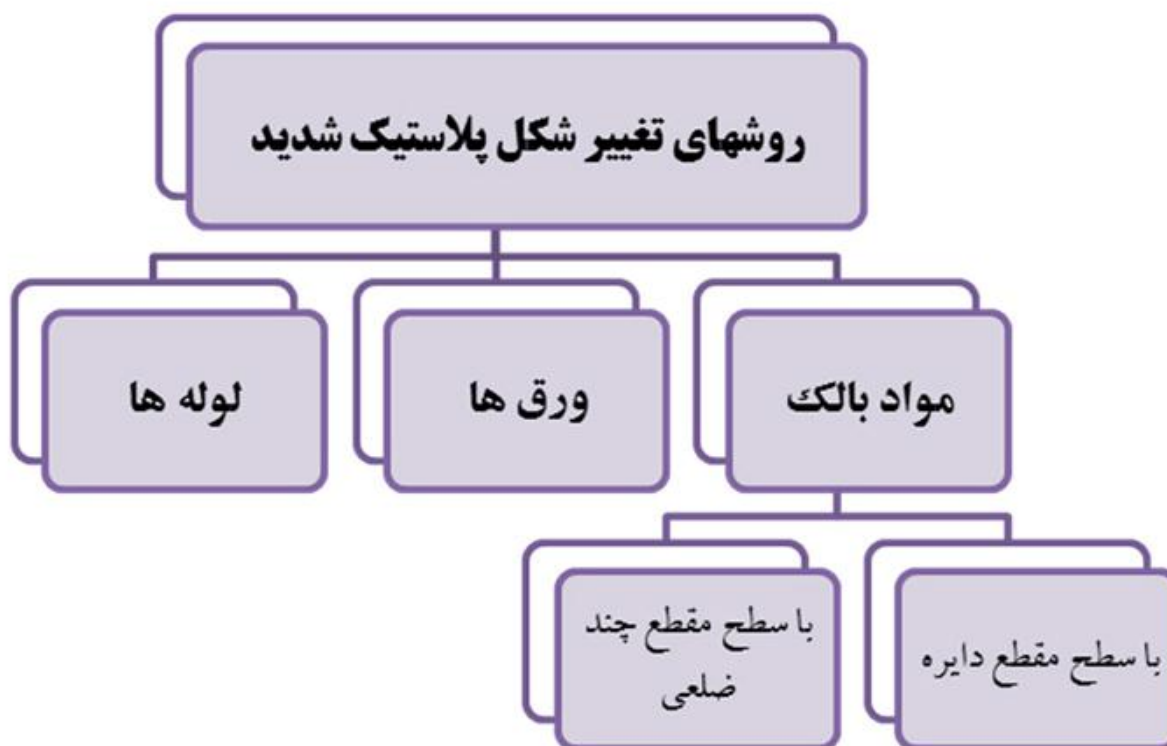
شود [۴]. در مقابل این افزایش استحکام، فلز داکتیلیته (Ductility) خود را از دست می دهد و قابلیت تغییر شکل آن پایین می آید. بنابراین این محدودیت باعث می شود که افزایش استحکام بیشتر فلز توسط اعمال کار مکانیکی محدود شود، چرا که باعث شکست ماده خواهد شد. بسیاری از فرآیندهای شکل دهی صنعتی که بر روی فلزات انجام می گیرد، به خاطر این محدودیت فلزات، امکان افزایش استحکام فلز را تا مقدار مورد نظر ندارند. در روش های مرسوم، در برخی موارد هم محدودیت ابزار وجود دارد، به این معنی که اعمال کرنش بالاتر به ماده باعث خرابی دستگاه و ابزار آلات می شود.

تغییر شکل شدید، در واقع مجموعه روش هایی است که طی آن می توان کار مکانیکی نسبتاً زیادی را به فلز اعمال نمود، بدون اینکه فلز دچار شکست و ترک خوردگی شود. واژه «شدید» به این خاطر اطلاق می شود که با توجه به تمهیداتی که در این روش ها انجام می گیرد، تغییر شکل شدیدی را می توان به فلز در مقایسه با سایر روش های معمولی شکل دادن فلزات اعمال نمود.

نکته جالب توجه در روش تغییر شکل پلاستیک شدید این است که نه تنها موجب افزایش استحکام فلز می شود، بلکه در بسیاری از اوقات افت داکتیلیته حذف شده و گاهی افزایش نرمی نیز مشاهده می شود. این موضوع دقیقاً وجه تمایز این روش با سایر روش های تغییر شکل پلاستیک است که علت این ویژگی خاص را باید در ساختار نانو ایجاد شده در فلز توسط روش تغییر شکل پلاستیک شدید جستجو نمود.

روش های تغییر شکل پلاستیک شدید

روش های تغییر شکل شدید پلاستیک را با توجه به هندسه محصول این فرآیند، می توان به سه دسته اصلی تقسیم بندی نمود. این سه دسته شامل تغییر شکل شدید مواد بالک، ورق و تغییر شکل شدید لوله ها می باشد. شکل ۲، دسته بندی کلی از روش های تغییر شکل پلاستیک شدید را نشان می دهد.



شکل ۲- دسته بندی کلی روش های تغییر شکل پلاستیک شدید بر اساس شکل محصول.

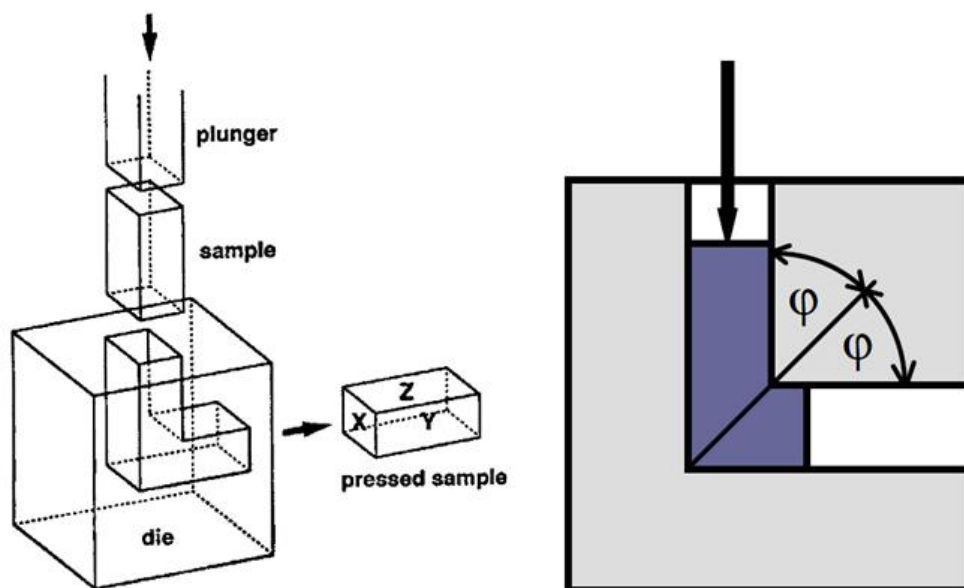
اگرچه این فرآیندها از نظر ماهیت تغییرات ریزساختاری تفاوت چندانی با همدیگر ندارند و همگی دچار تغییر شکل پلاستیک شدید می شوند، اما از نظر نحوه توزیع میدان های تنش و کرنش در فلز تحت تغییر شکل متفاوت خواهند بود. در ادامه به معرفی برخی از مهمترین و پرکاربردترین این روش ها پرداخته می شود.

فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید مواد بالک

فرآیند پرس در کانال زاویه دار (Equal channel angular pressing = ECAP)

این روش که اکستروژن در کانال زاویه دار (Equal channel angular extrusion = ECAE) نیز نامیده می-شود، به نوعی مادر روش های SPD محسوب می گردد. قالب این روش، دارای یک کانال برای ورود قطعه

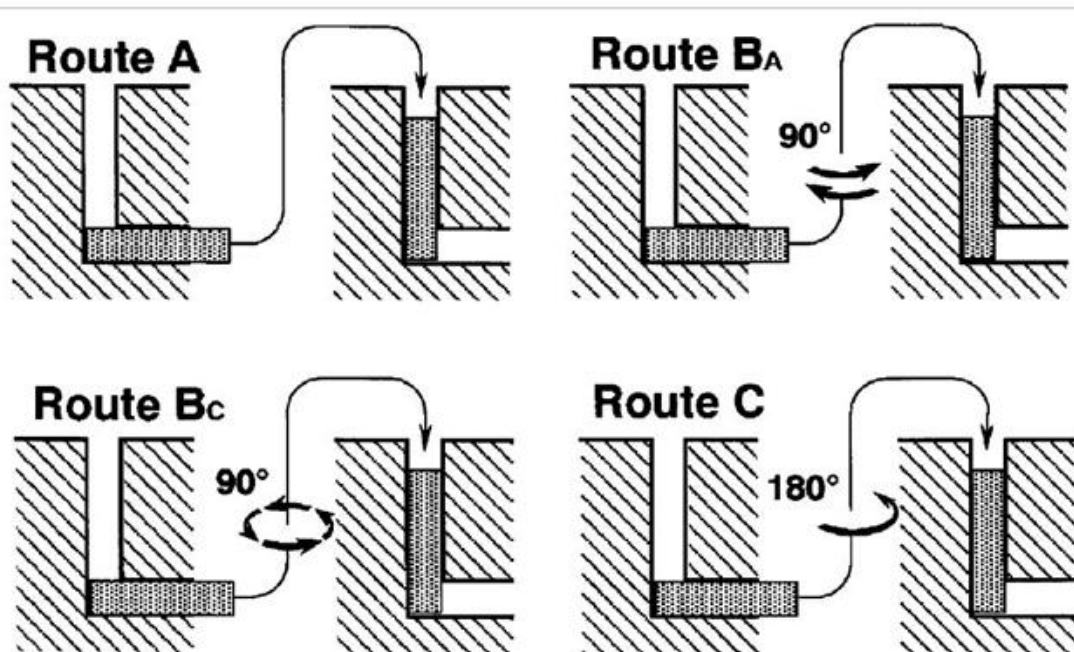
مورد نظر است که در وسط مسیر کانال، دارای یک تغییر زاویه است. شکل شماتیک این روش در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- شکل شماتیک فرآیند ECAP با هندسه مکعبی (مقطع چهارگوش) و زاوی کانال ۹۰ درجه

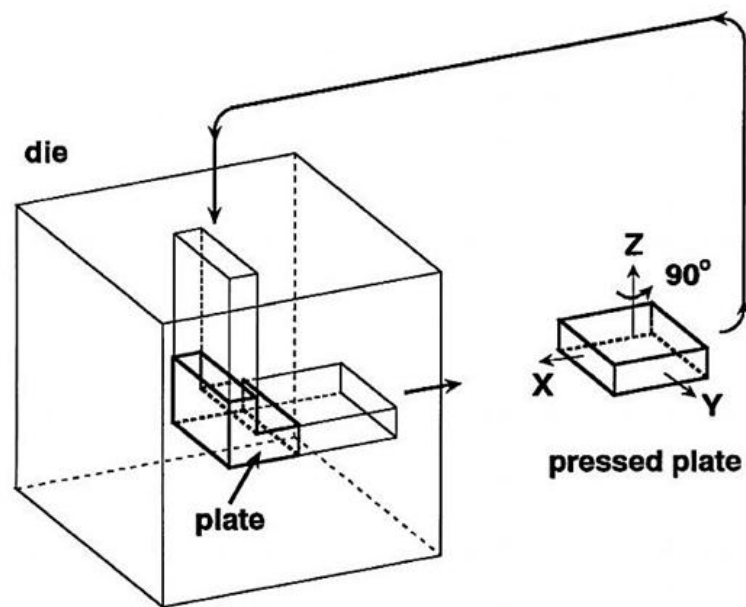
در این روش، فلزی که قرار است تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار بگیرد، در کانال قرار گرفته و از بالا توسط یک سنبه به داخل کانال، فشرده می شود. قطعه فلزی حین عبور از کانال، با رسیدن به محل تغییر زاویه، شروع به خم و سپس بازخم می کند. در اثر این تغییر شکل سرتاسری که در قطعه اتفاق می افتد، کل قطعه به شدت تغییر شکل یافته و از انتهای دیگر قالب خارج می شود. شدت تغییر شکل به زاویه کانال بستگی داشته و همچنین شعاع گوشه ها و انحنای رئوس کانال در محل تغییر زاویه نیز از جمله پارامترهای کنترلی این فرآیند است. در اینجا باید توجه شود که چون قطعه فلزی تحت فرآیند، درون قالب مقید است و تحت تنش هیدرواستاتیک فشاری بالایی قرار دارد، امکان ترک خوردن و شکست قطعه وجود ندارد که این موضوع، همان وجه تمایز روش های تغییر شکل پلاستیک شدید با روش های مرسوم شکل دهی است. توجه به سطح مقطع نمونه ی تحت ECAP، می

توان مسیرهای (Route) مختلفی برای این فرآیند انتخاب نمود. این مسیرها می تواند شامل چرخاندن نمونه برای پاس بعدی به میزان 180° درجه حول محور اصلی نمونه و یا 90° درجه (در صورت وجود تقارن) و همچنین شامل سر و ته کردن نمونه باشد. برخی از این مسیرها تنها برای نمونه های با مقطع چند ضلعی قابل اعمال است. شکل ۴ نمونه ای از این مسیرها را که به عنوان مسیرهای اصلی هستند، مشخص کرده است. هر کدام از این مسیرها، میدان های تنش های متفاوتی در نمونه ها ایجاد می کند.



شکل ۴- مسیرهای مختلف اصلی برای روش ECAP

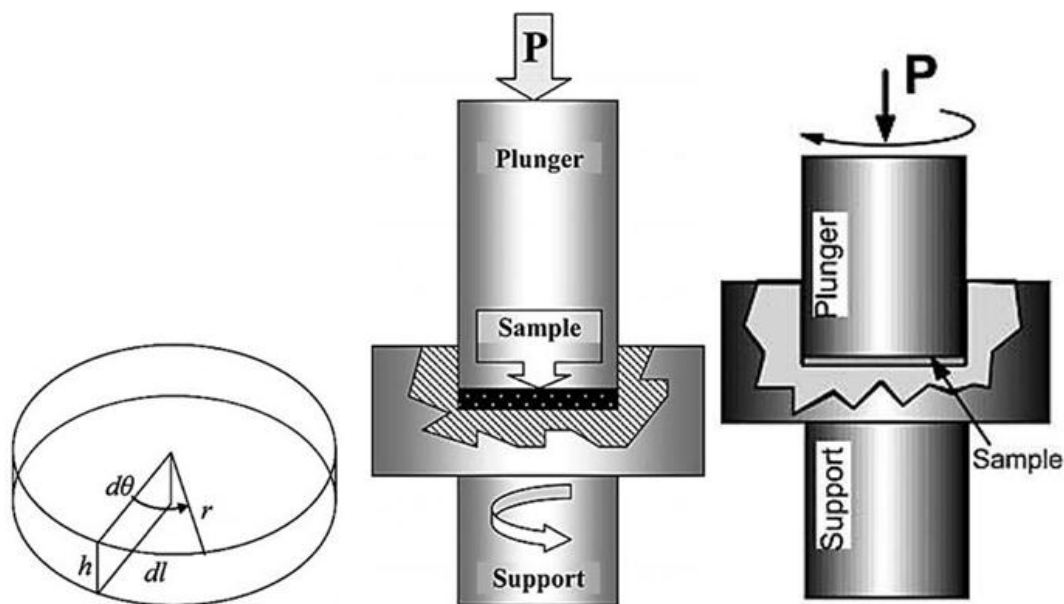
روش ECAP قابلیت اعمال بر روی ورق های ضخیم (Plate) را هم دارد که در این حالت، مسئله مسیرهای مختلف، بیشتر خود را نشان می دهد (شکل ۵).



شکل ۵- فرآیند ECAP برای ورق های ضخیم

پیچش با فشار بالا (High Pressure Torsion [HPT])

در این روش که شکل شماتیک آن در شکل ۶ آمده است، یک قطعه دیسکی شکل، همزمان تحت فشار عمودی و نیروی پیچشی قرار می گیرد. به این صورت که ابتدا دیسک فلزی درون قالب قرار گرفته، سپس یک سنبه وارد قالب شده و بر روی دیسک فشار مشخصی را وارد می کند، سپس همزمان و در حالی که فشار در حال اعمال شدن به دیسک فلزی است، سنبه شروع به چرخش خواهد نمود. البته در برخی حالت ها، به پس از اعمال فشار، سنبه ثابت بوده و در عوض، قالب می چرخد.

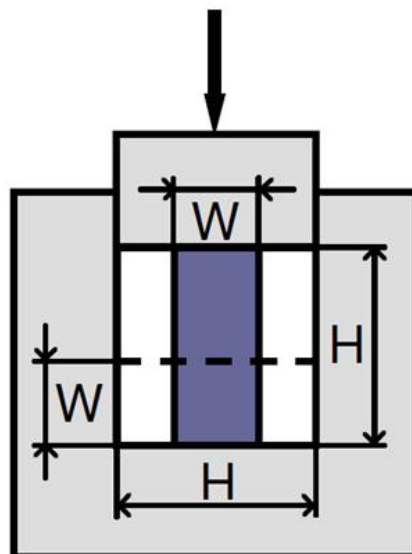


شکل ۶- فرآیند پیچش با فشار بالا، از سمت راست به ترتیب: با سنبه چرخان، با قالب چرخان، نمونه تحت فرآیند

این فرآیند نیاز به نیروهای نسبتاً بالایی دارد. پارامترهای کنترلی اصلی در اینجا، یکی مقدار فشار اعمالی است و دیگری مقدار زاویه دوران. در اینجا باید توجه که در این فرآیند، مقدار تغییر شکلی که به ماده دیسکی شکل اعمال می شود، با حرکت از لبه ها به سمت مرکز دیسک کاهش می یابد؛ به طوری که مرکز دیسک تقریباً کرنشی را متحمل نمی شود. بنابر این باعث می شود که از نظر توزیع کرنش، به جای یکنواختی، شیب کرنشی در راستای شعاعی وجود داشته باشد.

فرآیند فورج چند جهته (Multi-directional forging =MDF)

در این فرآیند، یک قطعه مکعب مسطیل شکل از یک محور با مقطعی به عرض W و ارتفاع H ، درون قالبی به عرض H تا ارتفاع W فشرده می شود. شکل ۷، به طور شماتیک این فرآیند را نشان می دهد.

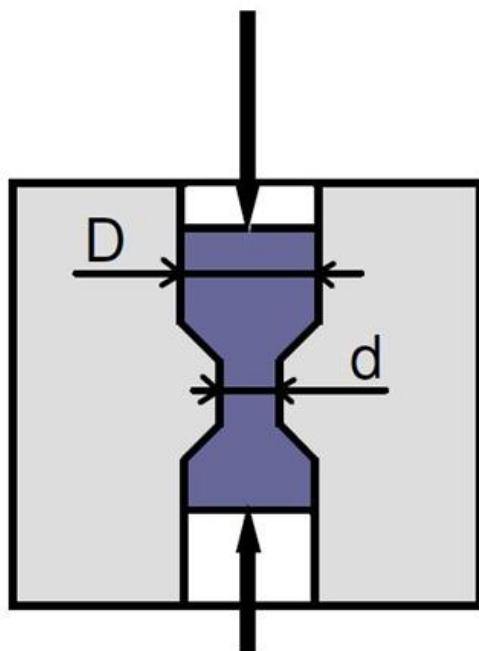


شکل ۷- شماتیک فرآیند فورج چند جهته

طی این فرآیند، قطعه پس از یک تغییر شکل پلاستیک با درصد بالا، مجدداً به شکل مکعب مستطیلی با ابعاد اولیه باز می گردد. این فرآیند نیز همانند فرآیند ECAP می تواند مسیرهای مختلفی را برای پاس های بعدی تجربه کند؛ به خصوص اگر بعد سوم قطعه نیز دارای عرض W باشد. در این فرآیند باید دقت شود که نمونه به طور کامل در وسط قالب قرار بگیرد تا میزان کرنش به طور کنترل شده اعمال شود.

فرآیند اکستروژن- فشردن تناوبی (Cyclic extrusion-compression = CEC)

تصویر شماتیک فرآیند CEC در شکل ۸ نشان داده شده است. در این فرآیند، یک میله با قطر D ، از قالبی که قطر داخلی آن در وسط مسیر به d کاهش می یابد توسط یک سنبه از بالا فشار داده شده تا این کانال کوچکتر اکستروژن شود. بلافاصله پس از خروج ماده از کانال اکستروژن، یک سنبه با فشار، نمونه را به سمت بالا فشرده می کند ولی فشار سنبه پایین به گونه ای است که مانع از اکستروژن ماده به سمت پایین نمی شود.



شکل ۸- تصویر شماتیک فرآیند اکستروژن- فشار تناوبی

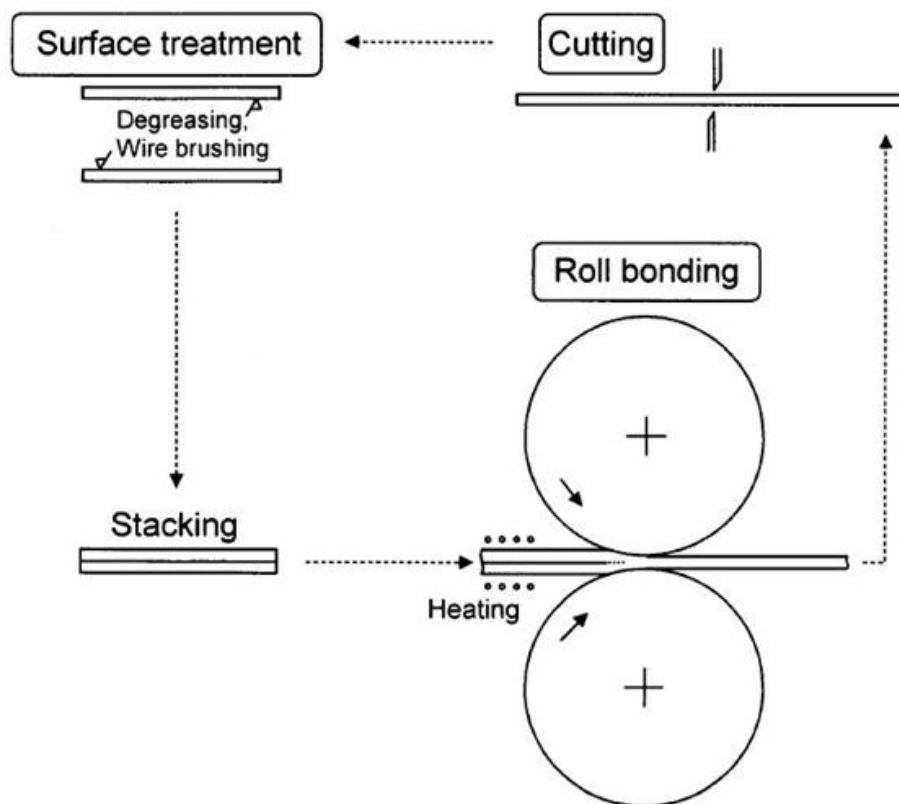
این فرآیند قابلیت انجام روی میله های با مقطع مستطیلی را نیز دارد که در این حالت و به خصوص در صورت مربع بودن مقطع، باز هم می توان همانند دو فرآیند MDF و $ECPA$ ، مسیرهای مختلفی برای پاس های بعدی فرآیند تعریف نمود.

فرآیندهای تغییر شکل شدید برای ورق ها

ورق ها به دلیل اینکه یکی از بعدهای سطح مقطع آنها خیلی کوچکتر از بعد دیگر است، امکان اعمال فشارهای بالا از سمت مقطع را ندارند و به ناچار باید اعمال تغییر شکل بالا از سمت بعد بزرگتر آنها انجام بگیرد.

فرآیند پیوند نوردی انباشتی (ARB=Accumulative roll bonding)

در این فرآیند، دو ورق با ضخامت t که یک سمت از هر کدام مقداری زبر شده است، از قسمت زبر شده روی همدیگر قرار گرفته و تحت عملیات نورد قرار می گیرند. فرآیند نورد باید به گونه ای باشد که ضخامت هر دو ورق را که روی همدیگر قرار دارند (t_2)، را به ضخامت t برساند (یعنی میزان تغییر شکل برابر ۵۰% باشد). سپس این ورق دولایه که اکنون ضخامت t دارد، از وسط نصف شده، یک سمت از هر کدام زبر شده و روی هم قرار می گیرد. سپس مجدداً تحت فرآیند نورد به صورت ذکر شده قرار خواهند گرفت. تکرار این فرآیند باعث می شود که در هر پاس تغییر شکل نسبتاً بالای به هر لایه اعمال گردد و تغییر شکل پلاستیک شدیدی را در کل ورق سبب شود. این فرآیند به صورت شماتیک در شکل ۹ آورده شده است.

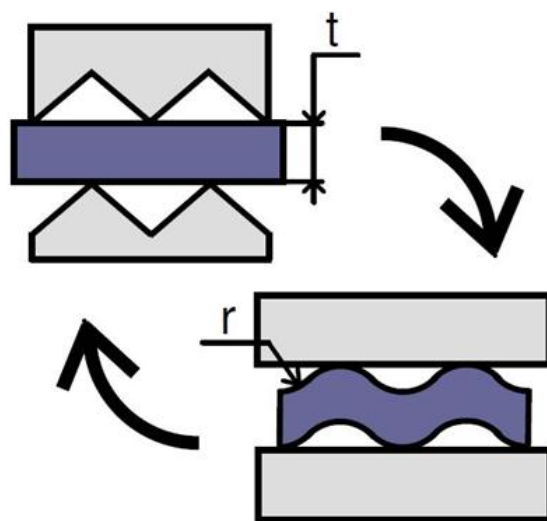


شکل ۹- تصویر شماتیک و مراحل فرآیند ARB

طبق این روش، اگر فرآیند تا ۱۰ پاس ادامه پیدا کند، در نهایت ورقی خواهیم داشت با ساختار لایه ای متشکل از ۱۰۲۴ لایه که هر کدام از این لایه ها دچار تغییر شکل پلاستیک شدید شده اند.

روش کنگره دار کردن و صاف کردن متوالی (RCS = Repetitive corrugation and straightening)

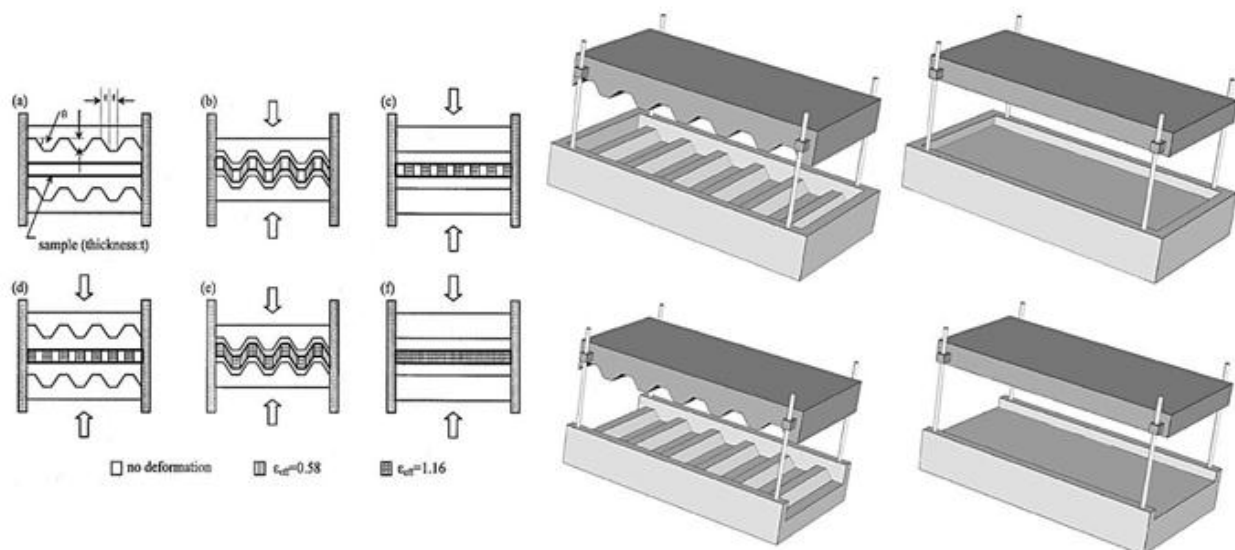
در این روش، ورق ابتدا در یک قالب قرار گرفته تا به صورت کنگره ای شکل در بیاید. سپس این ورق کنگره ای در قالب دیگری قرار داده شده و مجدداً صاف می شود. تکرار این فرآیند سبب کرنش های پلاستیک شدید در ورق می شود. شکل ۱۰ این فرآیند را نشان می دهد.



شکل ۱۰- شمای کلی از فرآیند RCS

این روش، همانند برخی از روش های ذکر شده در بالا، خود دارای زیر مجموعه هایی است که به نوعی مدل های اصلاح شده این فرآیند است. به طور مثال، کنگره دار شدن ورق می تواند به جای یک مرحله، در دو مرحله انجام بگیرد، یعنی در پاس اول، نوارهایی از ورق بدون تغییر شکل باقی بماند. یکی از مشکلاتی که در روش RCS

وجود دارد، مقداری افزایش در طول نمونه است که منجر به کرنش ناهمگن در ورق می شود. به همین خاطر روش پرس کاری در قالب شیاردار (CGP) که به نوعی منتج شده از روش RCS است ابداع گردید. در این روش نیز همانند روش قبل، کنگره دار شدن ورق در دو مرحله اتفاق می افتد. شکل ۱۱، مقایسه ای بین دو روش RCS و CGP را از نظر نوع قالب را نشان می دهد و همچنین نحوه فرآیند کنگره دار کردن در دو مرحله را نشان می دهد.

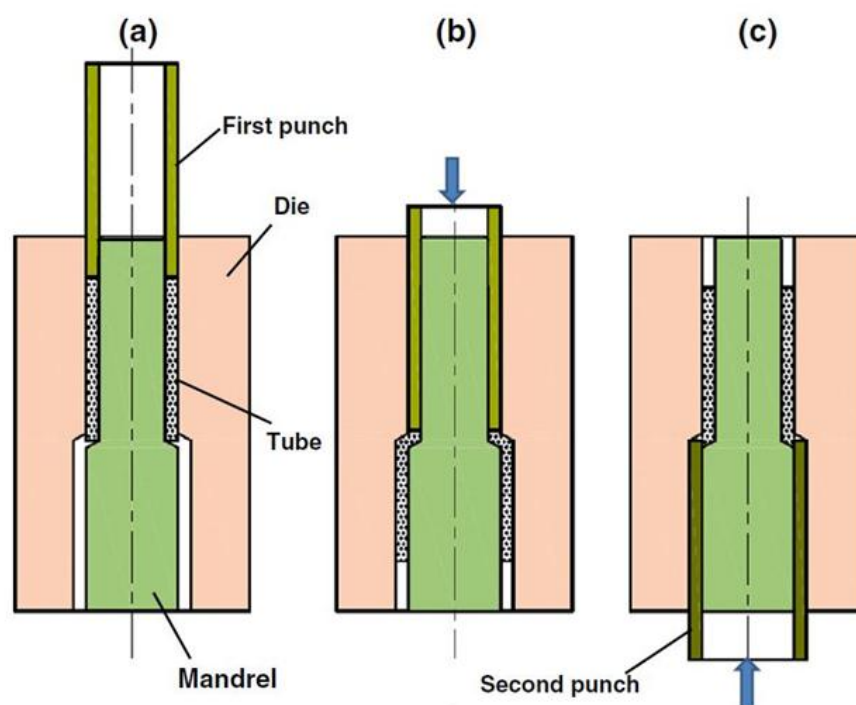


شکل ۱۱- سمت راست: مقایسه تفاوت دو روش (CGP بالا) و (RCS پایین)، سمت چپ: فرآیند کنگره دار کردن در دو مرحله ای

فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید برای لوله ها

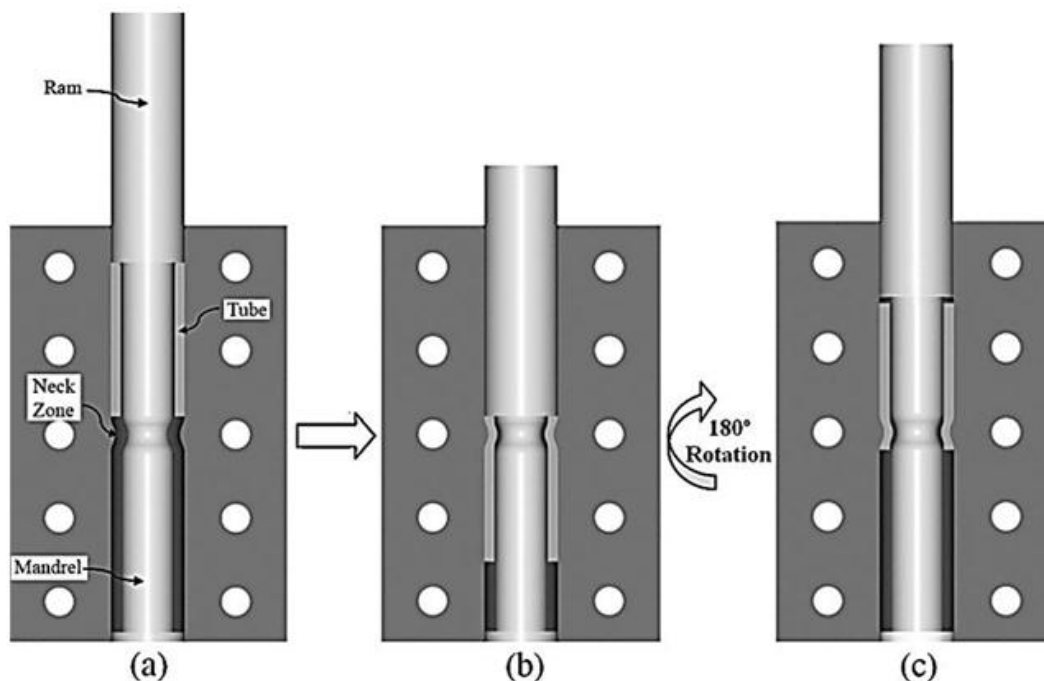
روش های تغییر شکل پلاستیک شدید برای لوله ها، از جمله روش های نسبتاً جدید است و قدمت کمتری نسبت به سایر روش های SPD دارد. از جمله برخی از این روش ها می توان به پیچش لوله با فشار بالا (High-pressure tube twisting) [۱۱] و یا روش پیوند چرخشی تجمعی (Accumulative spin-bonding) [۱۲] اشاره نمود. ولی روش بهتری توسط فرجی و همکارانش [۱۳] با نام روش فشردن در کانال

زاویه دار لوله ای موازی (Parallel tubular channel angular pressing =PTCAP) ارائه شده که به نوعی شبیه فرآیند ECAP است. تصویر این فرآیند در شکل ۱۲ آورده شده است



شکل ۱۲- مراحل مختلف فرآیند PTCAP برای ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید روی لوله ها

در این فرآیند دو مرحله ای، ابتدا لوله به درون منطقه با قطر بزرگتر اکستروژد شده که در نتیجه آن، قطر لوله بیشتر می شود، سپس مجدداً از همان مسیر اکستروژن معکوس شده تا به قطر اولیه خود باز گردد. دو مرحله ای بودن و همچنین افزایش قطر لوله در اثر این فرآیند می تواند یکی از عیوب این فرآیند محسوب شود. شاید بهترین روشی که اخیراً برای لوله ها پیشنهاد شده است، روشی باشد که توسط زنگی آبادی و کاظمی نژاد [۱۴] با عنوان فشردن در کانال لوله ای (Tube Channel Pressing =TCP) ارائه شده است. تصویر شماتیک این فرآیند در شکل ۱۳ آورده شده است.



شکل ۱۳- شمای کلی و مراحل فرآیند TCP

این فرآیند شامل یک قالب با کانال استوانه ای است که در وسط مسیر کانال، دارای یک گلوگاه با قطر کمتر از قطر اولیه می باشد. قطر داخلی لوله توسط ماندل (Mandrel) کنترل می شود که در وسط میله ماندل، جایی که به گلوگاه کانال می رسد، قطر آن مشابه با گلوگاه کاهش می یابد؛ به طوری که فاصله بین گلوگاه و ماندل همواره برابر قطر اولیه لوله است. سپس با یک سنبه لوله ای شکل (هم قطر با لوله تحت فرآیند) از بالا، لوله به داخل کانال فشرده می شود.

طی این فرآیند (که به نوعی با فرآیند CEC برای مواد بالک مشابهت دارد)، لوله با رسیدن به گلوگاه، قطر آن کاهش یافته و با ادامه حرکت داخل کانال، مجدداً به قطر اولیه باز می گردد. هنگامی که سنبه به گلوگاه قالب رسید (شکل ۱۲، b)، برای انجام پاس بعدی، فرآیند را می توان از سمت دیگر تکرار نمود. با توجه به ابعاد قالب، می توان از دو لوله پشت سر هم استفاده کرد تا کل لوله SPD شده از سمت دیگر بتواند خارج شود.

همانطور که مشاهده می شود، یکی از نکات قابل توجه در تمامی روش های تغییر شکل پلاستیک شدید، عدم تغییر ابعاد اولیه قطعه می باشد که این موضوع علاوه بر نانساختار کردن و بهبود خواص ماده، از ویژگی های منحصر به فرد روش تغییر شکل پلاستیک شدید است. میله ای فلزی را تصور کنید که پس از انجام فرآیند SPD، استحکام آن به شدت افزایش یافته، نرمی آن تقریباً حفظ شده و در عین حال، تغییر ابعادی ندارد. حال از این موضوع می توان به اهمیت بسیار بالای این روش در کاربردهای مهندسی پی برد.

گاهی اوقات جهت کنترل خواص متالورژیکی نمونه و یا سایر خواص ماده، تغییر شکل پلاستیک شدید را در حالت گرم یا داغ انجام می دهند. برخی اوقات نیز بین پاس های مختلف فرآیند و یا پاس از پاس نهایی، نمونه های SPD شده را در کوره قرار داده و آنیل می کنند تا به خواص مورد نظر دست پیدا کنند. در برخی از موارد هم انجام آنیل باعث می شود که بتوان تعداد پاس های بیشتری را بدون ترک خوردن نمونه اعمال نمود. البته باید توجه شود که انجام فرآیند در دمای بالا و یا انجام آنیل های میانی و پایانی، نیاز به دقت های متالورژیکی بسیار بالایی دارد و باید طراحی بسیار دقیقی انجام بگیرد.

تغییر شکل پلاستیک شدید نانوکامپوزیت های زمینه فلزی

نانوکامپوزیت

نانوکامپوزیت به مواد چندفازی گفته می شود که حداقل یکی از فازهای آن در یک بعد، ابعادی کمتر از ۱۰۰ نانومتر داشته باشد. نانوکامپوزیت ها می تواند ساختارهای جامدی با ابعاد نانومتری در نظر گرفته شوند که بین فازهای مختلف تشکیل دهنده ساختار، تکرار می شوند.

نانوکامپوزیت های زمینه فلزی

کامپوزیت های زمینه فلزی یکی از مهمترین دسته های نانوکامپوزیت ها می باشد که به خاطر برخی خواص ویژه آن همواره مورد توجه قرار گرفته است. کامپوزیت های زمینه فلزی به منظور ترکیب انعطاف پذیری و چقرمگی زمینه فلزی و استحکام و سفتی زیاد تقویت کننده ها (که عمدتاً سرامیکی هستند) توسعه داده شده اند و در کاربردهای مهندسی مهم مانند صنایع خودروسازی و هوافضا استفاده می شوند. فرآیند تولید این نوع کامپوزیت، نیازمند دما و فشار بالا و نیز کنترل دقیق اتمسفر برای جلوگیری از اکسیداسیون فلز است. در نتیجه، تولید این دسته از کامپوزیت ها، نیازمند تجهیزاتی با طراحی خاص است.

واژه نانوکامپوزیت های زمینه فلزی (Metal Matrix Nanocomposite = MMNC) به طور وسیع به سیستم های کامپوزیتی گفته می شود که بر مبنای فلزات یا آلیاژ بنا نهاده شده که با تقویت کننده های نانومتری فلزی یا غیرفلزی ترکیب و مخلوط شده باشد.

اخیراً نانوکامپوزیت های زمینه فلزی به طور وسیع مورد مطالعه قرار گرفته است به خصوص اینکه روش ها و فرآیندهای تولید این نوع کامپوزیت مقداری چالش برانگیز است. یکی از بزرگترین مزیت های نانوکامپوزیت های زمینه فلزی، کارایی مکانیکی عالی، قابلیت استفاده در دماهای بالا، مقاومت سایشی خوب و نرخ خزش پایین آنهاست. کامپوزیت های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات بخاطر ایزوتروپ بودن، سهولت تولید و گاهی هم قیمت پایین تر، نسبت به کامپوزیت های تقویت شده با الیاف پیوسته که خواص مکانیکی بهتری در راستای الیاف دارند، بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند.

تغییر شکل کامپوزیت های زمینه فلزی

وسعت پژوهش های انجام شده بر روی تغییر شکل کامپوزیت های زمینه فلزی به وسعت پژوهش های مرتبط باتغییرشکل فلزات و آلیاژها است. از فرآیندهای تغییر شکل رایج مانند نورد، اکستروژن گرفته تا بررسی ها و آزمون های تغییر شکل مختلف در شرایط دما و نرخ کرنش مختلف مانند آزمون فشار داغ و کشش داغ. در پژوهش های انجام گرفته پارامترها و عوامل مختلفی مدنظر بوده است، از جمله مقاومت به خستگی، مقاومت به سایش، ایجاد خاصیت سوپر پلاستیسیته، تغییرات خواص کششی و فشاری، خواص فیزیکی و مسائلی از این دست که به وفور آنها را می توان در منابع علمی یافت.

با توجه به نتایج جالب تغییر شکل شدید فلزات و آلیاژهای مهندسی، چندسالی است که بررسی های انجام شده در حیطه تغییر شکل کامپوزیت های زمینه فلزی، متوجه این دسته از فرآیندهای شکل دادن شده است. از سوی دیگر با گسترش کاربردها و خواص منحصر به فرد نانوکامپوزیت ها، توجه پژوهشگران به سمت ترکیب این دو ویژگی معطوف شد تا اثر تغییر شکل شدید را بر روی نانوکامپوزیت های زمینه فلزی بررسی کنند که در بخش بعدی به آن پرداخته خواهد شد

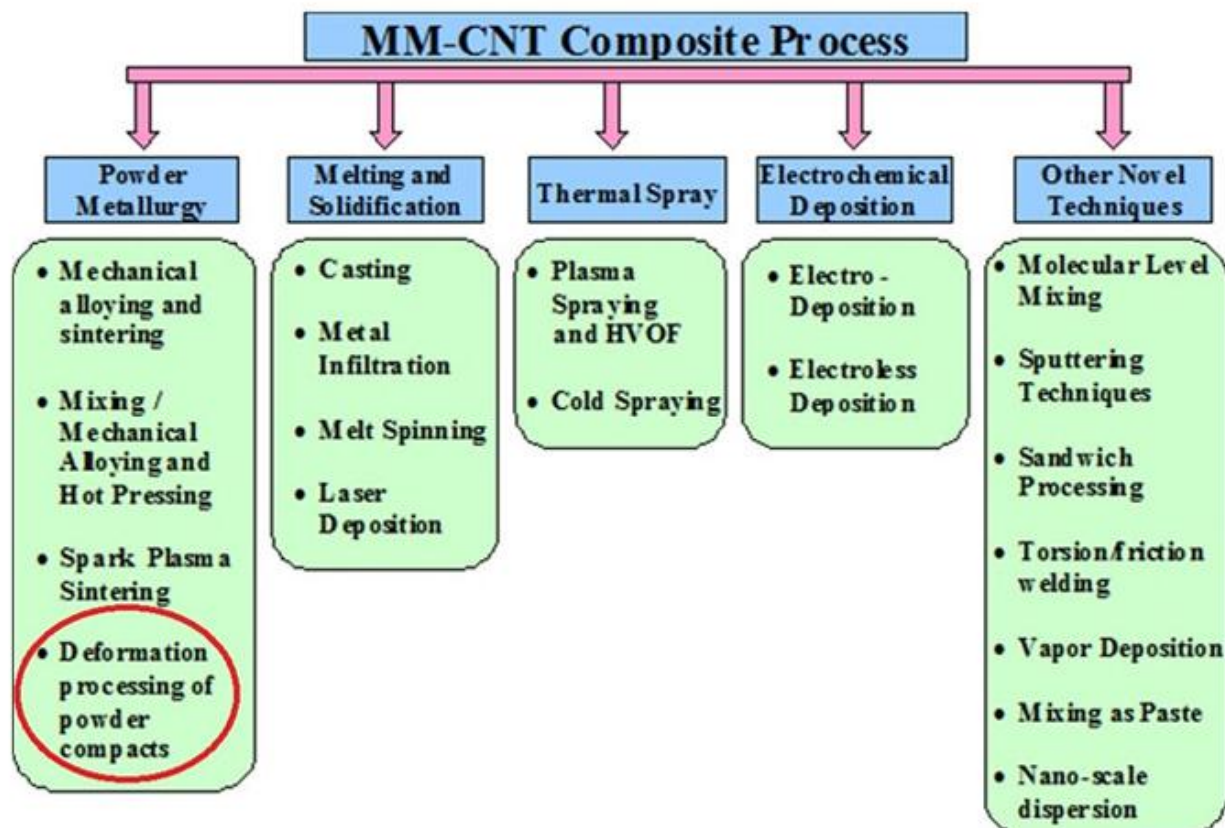
تغییر شکل شدید نانو کامپوزیت های زمینه فلزی

با بررسی پژوهش های انجام شده در زمینه تغییر شکل شدید نانوکامپوزیت های زمینه فلزی، چندین هدف اصلی از این فرآیند به چشم می خورد که به آنها پرداخته می شود.

تغییر شکل شدید به منظور تولید نانوکامپوزیت های زمینه فلزی

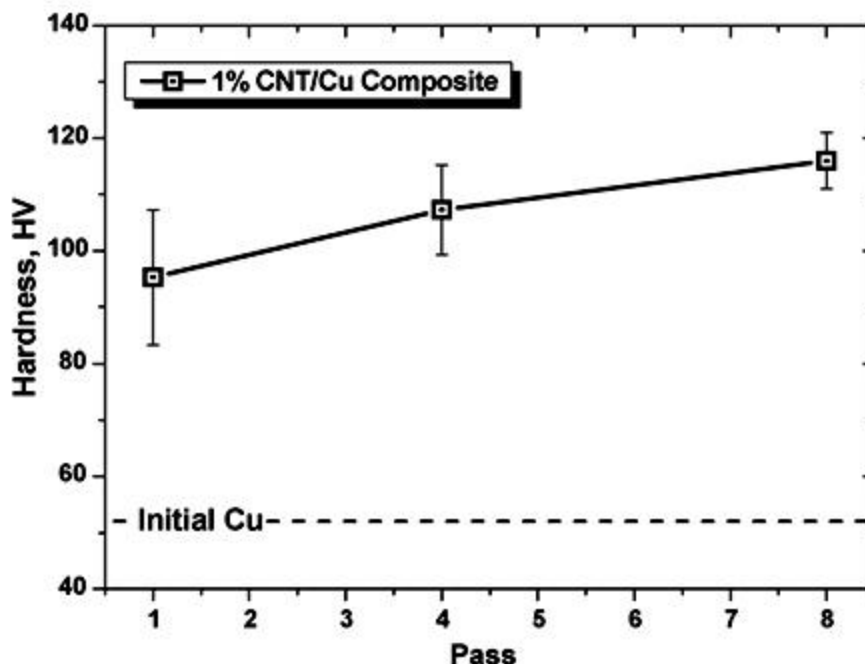
در بسیاری از پژوهش ها از تغییر شکل پلاستیک شدید به منظور روشی برای تولید نانو کامپوزیت زمینه فلزی و به طورهمزمان، اعمال تغییر شکل استفاده می کنند. در این شرایط مواد اولیه به صورت پودر هستند و تغییر شکل پلاستیک شدید نقش متراکم کردن (Consolidation) را بر عهده دارد. بدیهی است که این هدف، استفاده از روش های تغییر شکل شدیدی را که تنش فشاری حداکثر و کششی حداقل دارند مانند ECAP و HPT می طلبد.

روش تغییر شکل شدید، می تواند در تولید نانوکامپوزیت های زمینه فلزی تقویت شده با نانولوله های کربنی استفاده شود. نانولوله های کربنی به عنوان تقویت کننده هایی مناسب برای فلزات سبک و استحکام بالا شناخته می شوند. روش های گوناگونی برای تولید این نوع کامپوزیت ها وجود دارد (شکل ۱۴) که تغییر شکل پودر یکی از این روش هاست.



شکل ۱۴- روش های مختلف تولید نانوکامپوزیت های زمینه فلزی تقویت شده با نانولوله های کربنی

تغییر شکل شدید پودر به منظور تولید نانوکامپوزیت های زمینه فلزی تقویت شده بوسیله فرآیند ECAP در پژوهش های متعددی به چشم می خورد. در یکی از پژوهش ها، تولید کامپوزیت Cu/CNT بوسیله این فرآیند، محصولی با چگالی کامل (Fully Density)، ریزساختار همگن و استحکام بالا را نتیجه داد. استحکام مکانیکی بالای این نانوکامپوزیت به علت مستحکم شدن زمینه فلزی (Cu) و بهبود چسبندگی ذرات تقویت کننده در حین فرآیند بوده است. در این نانوکامپوزیت، افزایش تعداد پاس های فرآیند ECAP، استحکام نانوکامپوزیت را افزایش می دهد شکل ۱۵ تغییرات سختی نانوکامپوزیت CNT %vol ۱/Cu را با افزایش تعداد پاس های ECAP نشان می دهد. به اختلاف فلز زمینه و نانوکامپوزیت توجه شود.

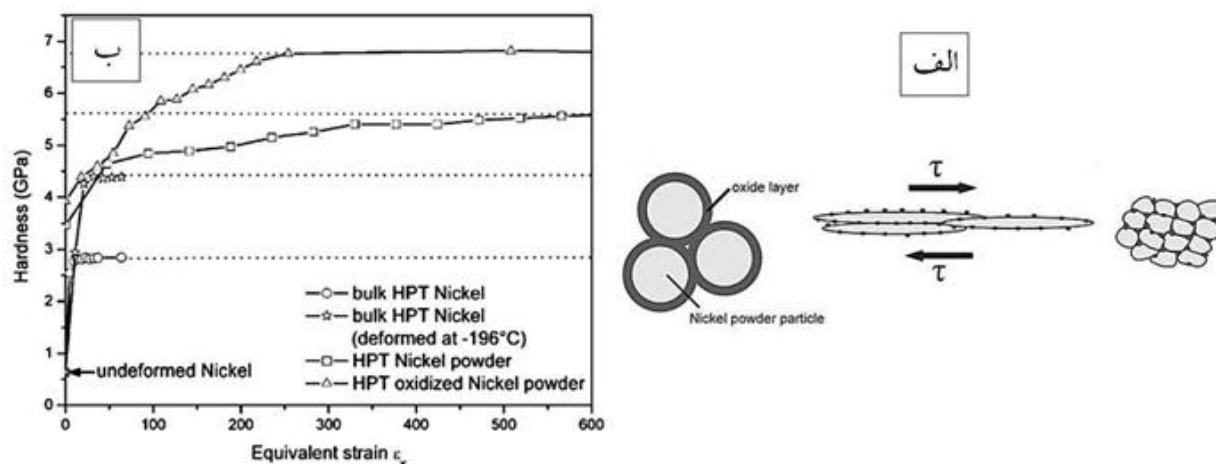


شکل ۱۵- تغییرات سختی نانوکامپوزیت Cu/۱ % vol CNT با افزایش تعداد پاس های فرآیند ECAP

افزایش تعداد پاس های ECAP باعث شکسته شدن آگلومره های CNT شده و توزیع بهتری را فراهم می کند و در نتیجه افزایش استحکام مکانیکی را به دنبال دارد

همچنین اعمال تغییر شکل بر روی نانوکامپوزیت های تقویت شده با CNT باعث جهتگیری خوشه های CNT در راستای تنش برشی می شود. بنابر با توجه به جهت اعمال تنش برشی در فرآیند ECAP، انتظار جهتگیری CNT ها در راستای صفحات مشخصی وجود دارد. البته باید توجه شود که در فرآیندهای تغییر شکل شدید، به دلیل اعمال میزان تغییر شکل بالا بر روی فازهای تشکیل دهنده، احتمال آسیب به نانولوله های کربنی وجود خواهد داشت.

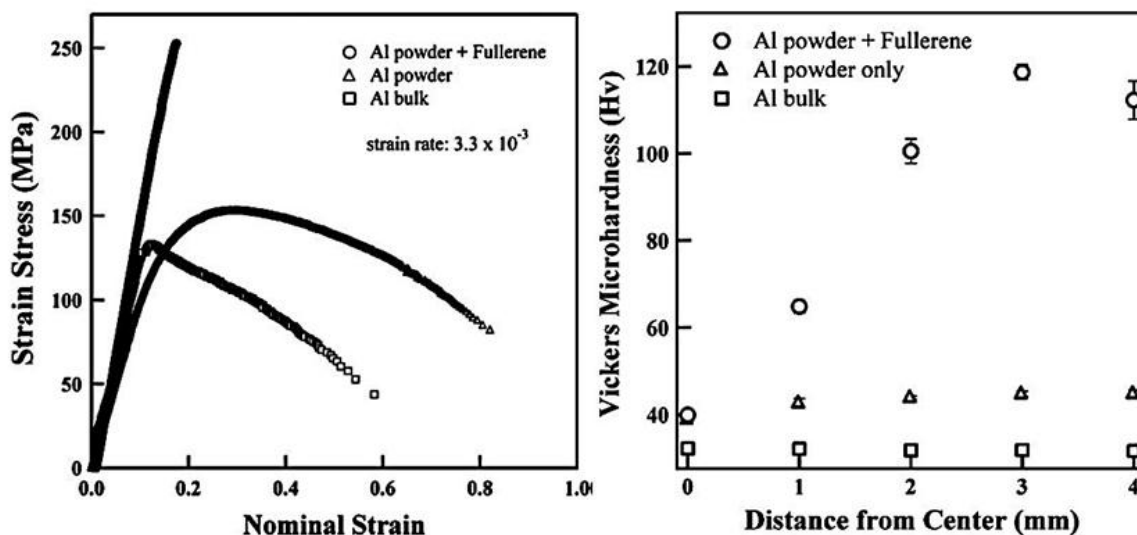
استفاده از فرآیند HPT نیز برای تولید نانوکامپوزیت های زمینه فلزی در پژوهش های متعددی به چشم می خورد. تولید نانوکامپوزیت Ni/Ni-Oxide بوسیله این فرآیند، نانوکامپوزیتی با زمینه بسیار ریزدانه به همراه ذرات اکسید نیکل در مرزدانه ها را نتیجه داد که در مقایسه با خواص فلز خالص HPT شده، دارای استحکام بالاتری است. پودر نیکل با ابعاد تقریبی ۸۰ میکرون در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۱۰ دقیقه آنیل شد تا لایه اکسیدی با ضخامت مورد نظر بر روی آن ایجاد شود. پودرهای با لایه اکسیدی سپس در دمای محیط تحت فرآیند HPT قرار گرفتند. در حین این فرآیند مغز نیکی پودر تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفته و بعد از کشیده شدن، ریزدانه شده و لایه های اکسیدی نیز خرد می شوند (شکل ۳، الف). افزایش میزان تغییر شکل در نهایت نیکل ریزدانه و ذرات پراکنده اکسید نیکل را به دست خواهند داد. با توجه به ریزدانه بودن نیکل، ذرات اکسیدی در مرزدانه ها قرار می گیرند که تصاویر TEM هم آن را تایید می کند. این ذرات اکسیدی نابجایی ها و مرزدانه ها قفل نموده و از سویی جلوی رشد دانه گرفته می شود و از سوی دیگر افزایش استحکام را برای زمینه به دنبال خواهد داشت (شکل ۱۶، ب).



شکل ۳- (الف) تصویر شماتیک تولید نانوکامپوزیت Ni/Ni-oxide با استفاده از پودر اکسید شده نیکل تحت فرآیند HPT. (ب)

تغییرات سختی نیکل، پودر نیکل و نانوکامپوزیت Ni/Ni-oxide با تغییرات مقدار کرنش اعمالی در حین فرآیند HPT

نانوکامپوزیت زمینه فلزی Al/Fulleren برای اولین بار توسط فرآیند HPT تولید گردید که باعث حذف فرآیندهای اضافی حرارت دادن و زینترینگ برای تولید این نانوکامپوزیت شد. محصول تولید شده دارای زمینه-ی آلومینیومی با اندازه دانه ۸۰ نانومتر است [۹]. سختی حداکثر این نانوکامپوزیت نسبت به نمونه غیر پودری HPT شده آلومینیوم بیش از ۶ برابر و نسبت به نمونه پودری آلومینیوم حدود ۳ برابر شده است. استحکام این نانوکامپوزیت نیز نسبت به موارد ذکر شده بالاتر بوده و دارای شکل پذیری قابل قبولی است. تغییرات سختی و نیز منحنی تنش کرنش این نانوکامپوزیت در شکل ۱۷ آمده است. اگر چه مقدار کرنش تا شکست این نانوکامپوزیت نسبت به نمونه های بدون Fulleren کمتر است، ولی مقدار کرنش یکنواخت این نانوکامپوزیت تقریباً ثابت مانده است.



شکل ۱۷ تغییرات سختی و همچنین منحنی تنش-کرنش نانوکامپوزیت Al/Fulleren تولید شده به روش HPT در مقایسه با نمونه های HPT شده پودری و غیر پودری فلز زمینه

تغییر شکل شدید به منظور بهبود خواص نانوکامپوزیت های زمینه فلزی

اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید علاوه بر روشی برای تولید نانوکامپوزیت از مواد پودری شکل، می تواند به منظور تغییر در خواص نانوکامپوزیت ها و یا تولید نانوکامپوزیت از کامپوزیت نیز استفاده شود. همانطور که پیش

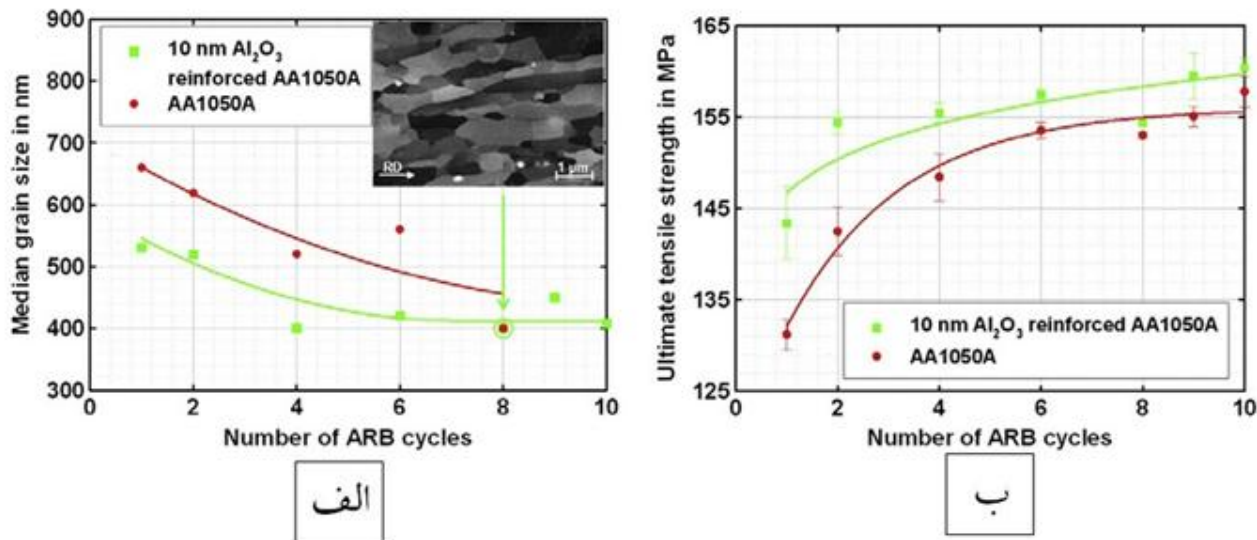
تر به طور ضمنی نیز بیان شد، نانوکامپوزیت های تولید شده به این روش خواص متفاوتی نسبت به سایر روش ها دارند. بهبود و یا به طور کلی تغییر خواص نانوکامپوزیت های زمینه فلزی با اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید، دلایل گوناگونی دارد که می توان به صورت بسیار کلی به دو مورد عمده از آنها اشاره نمود.

توزیع مناسب فاز تقویت کننده و بهبود خواص زمینه فلزی بوسیله ریزدانه کردن

کامپوزیت زمینه فلزی $\text{Cu}/0.5 \text{ wt. \% Al}_2\text{O}_3$ که به وسیله فرآیند اکستروژن تولید شده است، توسط روش HPT تحت تغییر شکل شدید قرار گرفت. بررسی های انجام شده توسط TEM نشان دهنده یک ساختار با پراکندگی بالا (Highly Dispersed) و زمینه ای با اندازه دانه تقریبی 80 nm است [۱۰]. نکته جالب توجه این است که وجود ذرات Al_2O_3 به ریزدانه تر شدن زمینه مسی کمک کرده است، چرا که HPT مس بدون ذرات Al_2O_3 در همان شرایط تغییر شکل، دارای اندازه دانه ای در حدود 150 nm است. نانوکامپوزیت $\text{Cu}/0.5 \text{ wt. \% Al}_2\text{O}_3$ تولید شده به این روش ترکیبی از استحکام بالا (در حدود 680 MPa ، میکروسختی بالا) و هدایت الکتریکی بالا را از خود نشان داد که به نوبه خود تولیدی موفقیت آمیز از این نانوکامپوزیت به حساب می آید.

ریزدانه تر شدن دانه های زمینه فلزی نانوکامپوزیت حین تغییر شکل پلاستیک شدید در اثر حضور فاز تقویت کننده، علاوه بر مرجع. در گزارش های دیگری نیز به چشم می خورد. استفاده از ذرات نانومتری (10 nm) سرامیکی در فرآیند ARB در بین لایه های ایجاد شده در هر مرحله، باعث ریزدانه تر شدن فلز زمینه نسبت به حالت بدون ذرات تقویت کننده در مقدار کرنش یکسان شده است. علاوه بر این، تولید نانوکامپوزیت به این روش، توزیع بسیار همگنی را از ذرات سرامیکی در فلز زمینه فراهم می آورد. شکل ۵ تغییرات اندازه دانه و خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت را با افزایش مقدار کرنش (یا همان تعداد پاس های فرآیند) نشان می دهد. این افزایش

ریزدانه شدن ذرات در نانوکامپوزیت نسبت به فلز زمینه بدون ذرات تقویت کننده، به علت ایجاد کرنش موضعی اضافی در اطراف نانوذرات سرامیکی و ایجاد استحکام بخشی بیشتر ذکر شده است.



شکل ۱۸ تغییرات اندازه دانه (الف) و استحکام تسلیم (ب) نانوکامپوزیت تقویت شده با ذرات سرامیکی با افزایش تعداد پاس های

نورد در فرآیند ARB

همگن کردن ساختار و توزیع فاز تقویت کننده نیز از جمله اهدافی است که در برخی از پژوهش ها به چشم می خورد. در نانوکامپوزیت زمینه مسی به همراه فیلرهای الیاف آهن به ضخامت ۵۰ nm، از تغییر شکل پلاستیک شدید HPT به منظور همگن سازی ترکیبی بین زمینه مسی و الیاف آهن استفاده شده است. تغییر شکل پلاستیک شدید باعث افزایش انحلال اتم های آهن در زمینه مسی شده و یک محلول جامد فوق اشباع کاملاً همگن (تا ۱۲٪ اتمی آهن) را در این نانوکامپوزیت ایجاد نموده است. این انحلال سبب ایجاددانه های نانومتری با ابعاد ۱۰ تا ۵۰ نانومتر می شود. در پژوهش مشابهی با همین نوع نانوکامپوزیت و همین فرآیند، مناطقی از زمینه که دارای غلظت بیشتری از اتم های آهن است، اندازه دانه کوچکتری نسبت به مناطق با غلظت کمتر گزارش شده است

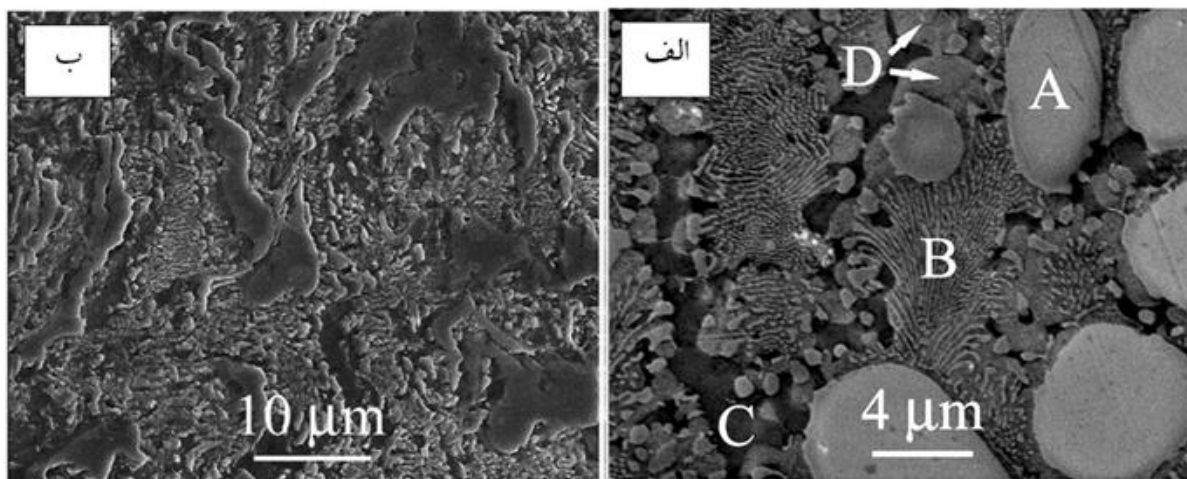
لازم به تذکر است که استفاده از روش تغییر شکل پلاستیک شدید در همگن کردن ساختار علاوه بر نانوکامپوزیت ها در کامپوزیت های زمینه فلزی نیز گزارش شده است که از آن جمله می توان به کامپوزیت با زمینه Al-6061 و با ۱۰ درصد حجمی فاز تقویت کننده SiC با ابعاد تقریبی ۱ میکرون اشاره نمود [۱۴]. انجام فرآیند تغییر شکل شدید، خوشه های SiC را که در کامپوزیت تولید شده توسط فرآیند اکستروژن وجود داشته، خرد نموده و توزیع بسیار همگنی از آنها را رقم زده است. البته در پژوهش ذکر شده توضیحی در مورد خواص مکانیکی داده نشده است. در این کامپوزیت، بعد از اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید، اندازه دانه های فلز زمینه و نیز ابعاد ذرات تقویت کننده هیچ کدام در مقیاس نانومتری ظاهر نشده اند.

دگرگونی فازی در فلز زمینه و ایجاد فازهای نانومتری

روش تغییر شکل شدید، به عنوان عاملی برای ایجاد فازهای نانومتری در جا (In-situ) در کامپوزیت های زمینه فلزی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. اگر چه به طور کلی برای رسیدن به هدف ذکر شده، استفاده از این روش کمتر به چشم می خورد، ولی عمده گزارش های رسیده به جای استفاده از فاز تقویت کننده γ جداگانه و غیر مرتبط با ترکیب فلز زمینه، بیشتر معطوف به سیستم های آلیاژی است.

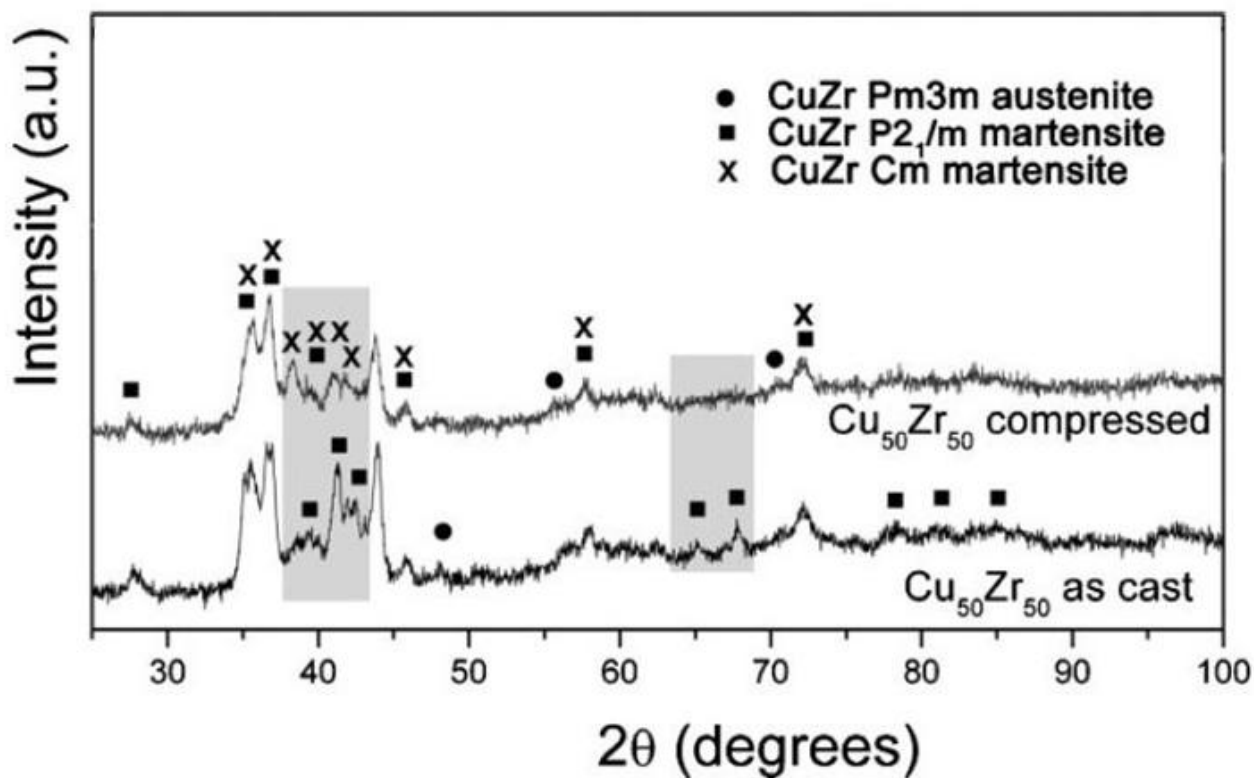
از آن جمله می توان به نانوکامپوزیت زمینه تیتانیومی $\text{Ti}_{60}\text{Cu}_{14}\text{Ni}_{12}\text{Sn}_4\text{Nb}_{10}$ اشاره کرد که فازهای یوتکتیکی و همچنین دندریت های ایجاد شده در حین انجماد آلیاژ را به وسیله تغییر شکل شدید پلاستیک شدید به روش HPT، به ابعاد نانومتری و همچنین توزیع مناسبی رسانیده و خواص مکانیکی مطلوبی ایجاد شده است [۱۵]. پس از تغییر شکل پلاستیک شدید، دندریت ها کشیده و دچار تغییر شکل شده و فازهای یوتکتیکی نیز تغییر شکل می یابند که در شکل ۱۹ نشان داده شده است. در حین HPT، به علت ظریف شدن ساختاری (Structural Refinement) تمامی فازهای تشکیل دهنده، دندریت ها و فازهای یوتکتیکی به طور مکانیکی سخت شده و استحکام کل نانوکامپوزیت را بالا می برد. اندازه گیری استحکام فازها به وسیله روش نوین نانوسختی سنجی

(Nanoindentation) انجام گرفته است. پس تفاوت اساسی این نانوکامپوزیت نسبت به انواع ذکر شده در بخش های قبل، افزایش استحکام خود فازهای تقویت کننده و نانومتری علاوه بر زمینه است که افزایش استحکام کل نانوکامپوزیت را به همراه دارد.



شکل ۱۹- تصاویر SEM از نانوکامپوزیت $\text{Ti}_6\text{Cu}_{14}\text{Ni}_{12}\text{Sn}_4\text{Nb}_1$ الف (قبل از HPT، موضع A: دندریت ها و B: فازهای یوتکتیکی، (ب) بعد از HPT هر دو تصویر مربوط به لبه نمونه قرصی شکل تغییر شکل شدید یافته است)

تغییر شکل (شدید و یا غیر شدید) همچنین می تواند باعث ایجاد دگرگونی فازی شود که البته گزارش های موجود در مورد استفاده از روش تغییر شکل در ایجاد دگرگونی فازی نانوکامپوزیت های زمینه فلزی بسیار محدود است. در نانوکامپوزیت مارتنزیتی $\text{Cu}_{50}\text{Zn}_{50}$ ، تغییر شکل فشاری باعث تغییر در نوع فازهای موجود می شود که ریزساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت را نیز تحت تاثیر قرار می دهد. شکل ۲۰ این الگوی پراش اشعه ایکس را قبل و بعد از تغییر شکل نشان می دهد. در این تصویر مشخص است که انجام تغییر شکل بر روی شدت پیک فازهای موجود اثر گذار بوده و تعدادی را نیز حذف نموده است.



شکل ۲۰- الگوی پراش اشعه ایکس نانوکامپوزیت مارتنزیتی $\text{Cu}_{50}\text{Zr}_{50}$ قبل و بعد از تغییر شکل

استحکام و شکل پذیری ایجاد شده در این نانوکامپوزیت در حین تغییر شکل به علت تعداد زیاد مرزهای دوقلو (Twin Boundaries) و دگرگونی فازی القا شده توسط تغییر شکل (Deformation-Induced Phase Transformation) در درون فاز مارتنزیتی گزارش شده است. حال اینکه اثر تغییر شکل پلاستیک شدید بر روی دگرگونی این نانوکامپوزیت چگونه است، از موارد جالبی است که می تواند در ادامه این پژوهش انجام شود. انجام تغییر شکل بر روی نانوکامپوزیت های زمینه فلزی، خواص آنها را تحت تاثیر قرار می دهد، حال در صورتی که تغییر شکل شدید روی آنها انجام گیرد، این تاثیر می تواند متفاوت باشد. استفاده از روش های تغییر شکل شدید بر روی نانوکامپوزیت های زمینه فلزی، می تواند اهداف مختلفی داشته باشد که عمده ترین آنها، تولید بوسیله پودر است که همزمان اثر تغییر شکل و نیز فشرده سازی اعمال می شود. این فرآیندها همچنین به بهبود

توزیع ذرات تقویت کننده، ریزدانه کردن زمینه نانوکامپوزیت و نیز ایجاد دگرگونی فازی در سیستم های آلیاژی کمک می کند. به هر حال وسعت پژوهش های انجام شده در این حوزه در مقایسه با سایر موضوعات در زمینه نانوکامپوزیت بسیار کم است، و تحقیقات بسیار زیادی برای فهم بهتر خواص نانوکامپوزیت های فلزی و پلیمری تغییر شکل شدید یافته مورد نیاز است..

تغییر شکل پلاستیک شدید نانوکامپوزیت های زمینه پلیمری

نانوکامپوزیت های زمینه پلیمری

نانوکامپوزیت های زمینه پلیمری، یک سیستم دوفازی شامل زمینه پلیمری و فازهای تقویت کننده که عمدتاً سرامیکی (مانند نانوکامپوزیت های تقویت شده با صفحات نانومتری خاک رس)، کربنی (مانند نانوکامپوزیت های تقویت شده با نانولوله های کربنی) و بعضاً پلیمری (مانند نانوکامپوزیت های تقویت شده با نانوذرات لاستیک) است. این نوع نانوکامپوزیت ها، به دلیل سهولت تولید بیشتر نسبت به نانوکامپوزیت های زمینه فلزی و همچنین کاربردهای خاص، مورد توجه بیشتری نسبت به سایر نانوکامپوزیت ها قرار گرفته است.

تغییر شکل کامپوزیت ها و نانوکامپوزیت های زمینه پلیمری

در این بخش، ابتدا به طور کلی اشاره ای به تغییر شکل کامپوزیت ها و نانوکامپوزیت های زمینه پلیمری خواهد شد، سپس تغییر شکل شدید در پلیمرها بررسی شده و سپس تغییر شکل شدید در نانوکامپوزیت های زمینه پلیمری مورد مطالعه قرار می گیرد.

تغییر شکل کامپوزیت های زمینه پلیمری

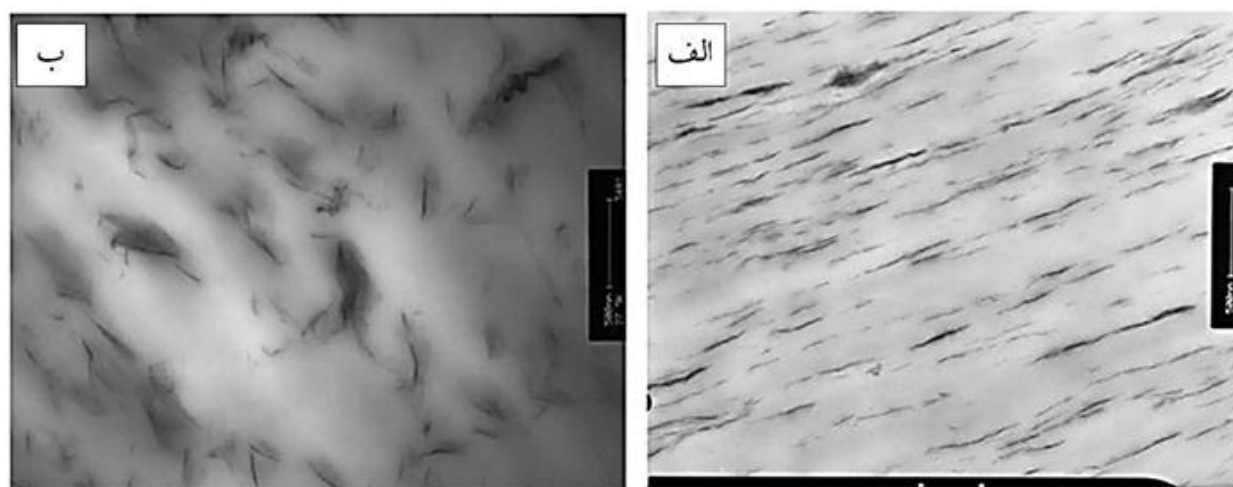
به طور کلی، شاید این طور به ذهن بیاید که تغییر شکل، بیشتر مخصوص فلزات است، در حالی که تغییر شکل در پلیمر ها و به دنبال آن کامپوزیت های زمینه پلیمری نیز به چشم می خورد. همانند تغییر شکل در کامپوزیت های زمینه فلزی که بیشترین توجه و دقت های مهندسی به تغییر شکل در زمینه فلزی آن است، در کامپوزیت های زمینه پلیمری نیز توجه بیشتر به تغییرات زمینه پلیمری، می تواند به سادگی تغییر شکل در کامپوزیت های پلیمری را توجیه و تفسیر کند. لذا بررسی تاثیر تغییر شکل در پلیمرها نیز یکی از مباحث علمی جالب توجه است.

به طور مثال، در فرآیند نورد پلیمر پلی پروپیلن، برخی از تغییرات در پلیمر از جمله تغییر در ریزساختار، جهت گیری های مولکولی و میزان بلورینگی (crystallinity) مشاهده شده است. همچنین، تغییر شکل باعث شده است که انیزوتروپی (Anisotropy) قوی تری نسبت به حالت قبل از تغییر شکل، در ماده پلیمری ایجاد شود. بررسی فعالیت های انجام گرفته نشان می دهد که تغییراتی مشابه موارد ذکر شده در ماده پلیمری، در کامپوزیت های زمینه پلیمری نیز اتفاق می افتد و این تغییرات، جزء اهداف اصلی تغییر شکل می باشد.

تغییر شکل به خصوص تغییر شکل شدید بر روی کامپوزیتهای زمینه پلیمری با اهداف مختلفی از جمله ایجاد انیزوتروپی (ناهمسانگردی) و جهتگیری مولکولی (Molecular Orientation)، بهبود توزیع فاز تقویت کننده و نیز تغییر در میزان بلورینگی زمینه پلیمری انجام گرفته است که منجر به بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت زمینه پلیمری می شود.

تغییر شکل نانوکامپوزیت های زمینه پلیمری

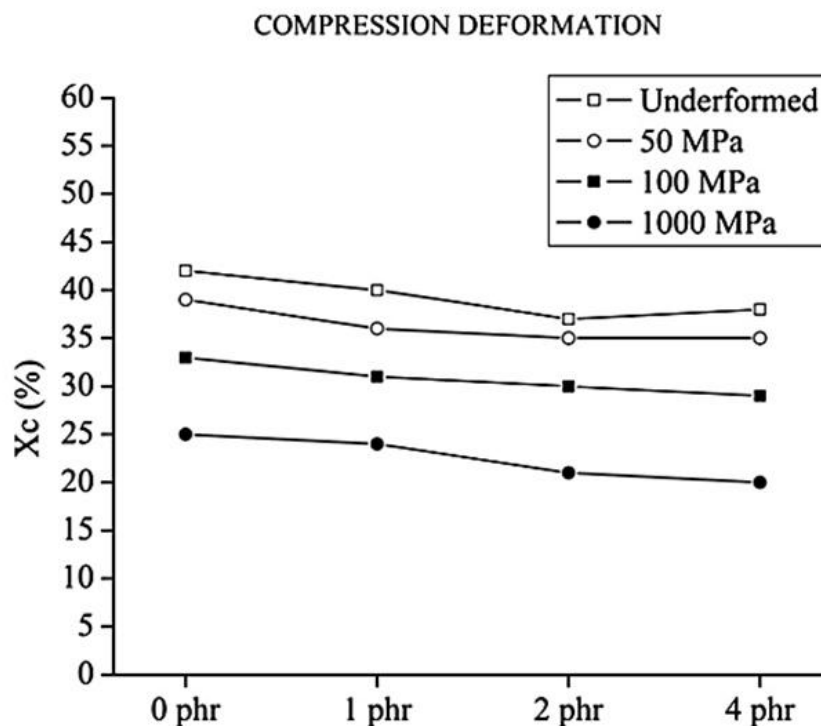
انجام تغییر شکل دوماحوری (Biaxial Deformation) بر روی نانوکامپوزیت پلی پروپیلین تقویت شده با خاک رس نانومتری (Nanoclay) تاثیر به سزائی بر تنش تسلیم، ازدیاد طول شکست و همچنین بر روی تورق (Exfoliation) و جهتگیری صفحات خاک رس داشته است. شکل ۲۱ جهتگیری صفحات خاک رس را قبل و بعد از این تغییر شکل نشان می دهد. پژوهشگران، علت افزایش تنش تسلیم را حاصل تورقلایه های خاک رس و در نتیجه افزایش درجه تورق در اثر تغییر شکل دو محوری دانسته اند. لازم به ذکر است که نرخ کرنش نیز در این فرآیند تأثیر گذار است. نمونه کشیده شده در نرخ کرنش بالاتر دارای مدول و تنش تسلیم بیشتری بوده است.



شکل ۲۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانوکامپوزیت (الف) PP/Nanoclay قبل از تغییر شکل، (ب) بعد از تغییر

شکل در نرخ کرنش 3.5×10^{-1} از

تغییر شکل همچنین بر روی میزان بلورینگی زمینه پلیمری نانوکامپوزیت تأثیر گذار است. شکل ۲ این تاثیر را برای نانوکامپوزیت i-PP/EPDM/organoclay که تحت فشار تک محوری قرار گرفته است بر حسب تغییر غلظت خاک رس نشان می دهد.



شکل ۲۲- تغییرات درصد بلورینگی (X_c) بر حسب غلظت Nanocaly در فشارهای مختلف تک محوری

همانطور که مشاهده می شود، افزایش فشار تغییر شکل باعث کاهش درصد بلورینگی در زمینه پلیمری نانوکامپوزیت می شو.

از دیگر مواردی که می توان از تغییر شکل نانوکامپوزیت ها بهره جست، در مبحث سنسورها می باشد که سال هاست بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تغییر شکل نانوکامپوزیت های زمینه پلیمری رسانای جریان الکتریکی، می تواند باعث تغییر در جریان الکتریکی عبوری از این نانوکامپوزیت شود. این ویژگی، استفاده از این نوع نانوکامپوزیت ها را به عنوان سنسور تغییر شکل ممکن کرده است

تغییر شکل شدید در پلیمرها

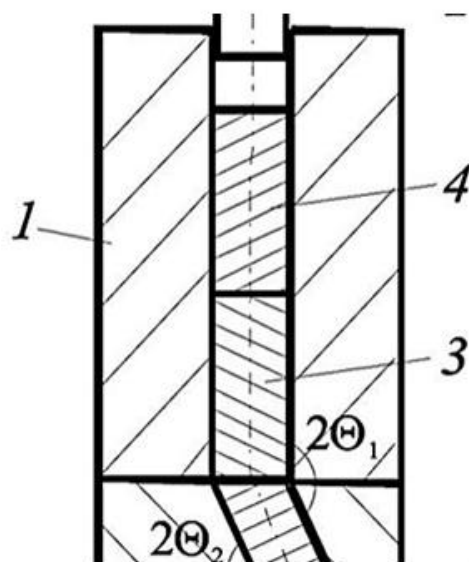
آنچه بیشتر در مورد تغییر شکل پلاستیک شدید در مقالات و فعالیت های پژوهشی مختلف بیان می شود، این فرآیند را بیشتر متخصص مواد فلزی می دانند. ولی اخیراً و با توجه به نتایج جالب به دست آمده از تغییر شکل شدید بر روی فلزات، مواد پلیمری تحت تغییر شکل شدید نیز مورد توجه و بررسی های پژوهشی قرار گرفته است. موفقیت های به دست آمده از فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید از جمله ECAP در بهبود خواص فلزات، منجر به بررسی امکان پذیر بودن این فرآیندها در بهبود خواص پلیمرها گردید. فرآیندهایی مانند ECAP، یک تغییر شکل برشی یکنواخت را در حالت جامد بر روی ماده تحت فرآیند اعمال می کند و از آنجایی که ماده پلیمری در حالت جامد تحت چنین تغییر شکلی قرار می گیرد، میزان قابل توجهی جهت گیری مولکولی در اثر این درجه بالا از تغییر شکل پلاستیک به وسیله برش ساده ایجاد می شود که بسیار بیشتر از میزان قابل اعمال توسط اکستروژن مذاب است جدول ۱، تغییرات خواص فیزیکی و مکانیکی پلیمر Nylon-۶ را بعد از تغییر شکل شدید توسط فرآیند ECAP نشان می دهد.

جدول ۱- جدول تاثیر تغییر شکل شدید بر خواص مکانیکی و فیزیکی پلیمر Nylon-۶ از مرجع [۷]

شرایط ماده	مقدار کرنش اعمالی	چگالی (g/cm^3)	مدول الاستیک (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	کرنش تسلیم (%)	کرنش نهایی (%)
ماده اولیه	۰	۱/۱۳۵	۹۰۰	۶۷	۶۹	۱۴/۶	۱۴۸
بعد از تغییر شکل شدید	۱/۲	۱/۱۴۱	۱۱۹۰	۱۲۹	۱۳۳	۹/۹	۱۲۸

همانطور که مشاهده می شود، تغییرات قابل توجهی در مدول الاستیک و تنش تسلیم و استحکام نهایی پلیمر در اثر تغییر شکل شدید ایجاد شده است. افزایش چگالی نیز به علت فشار هیدرواستاتیک اعمالی در حین فرآیند است

باید توجه داشت که تغییر شکل پلاستیک شدید در پلیمرها در مقایسه با فلزات، نیاز به اعمال تنش بالایی ندارد، به همین خاطر روش های جدیدتری نیز برای اعمال بیشتر تغییر شکل پلاستیک در یک پاس مورد بررسی قرار گرفته است، به خصوص اگر این روش ها، قابلیت پیوسته بودن فرآیند را فراهم کند که به روش صنعتی نزدیک تر است. به طور مثال می توان به روش (ECMAE=Equal-channel multiple-angle extrusion) اشاره نمود که تصویر شماتیک آن در شکل ۲۳ آمده است. این روش، مدول الاستیک و استحکام بالاتری نسبت به روش ECAP دارد، در حالی که همان داکتیلیتی را حفظ کرده است.

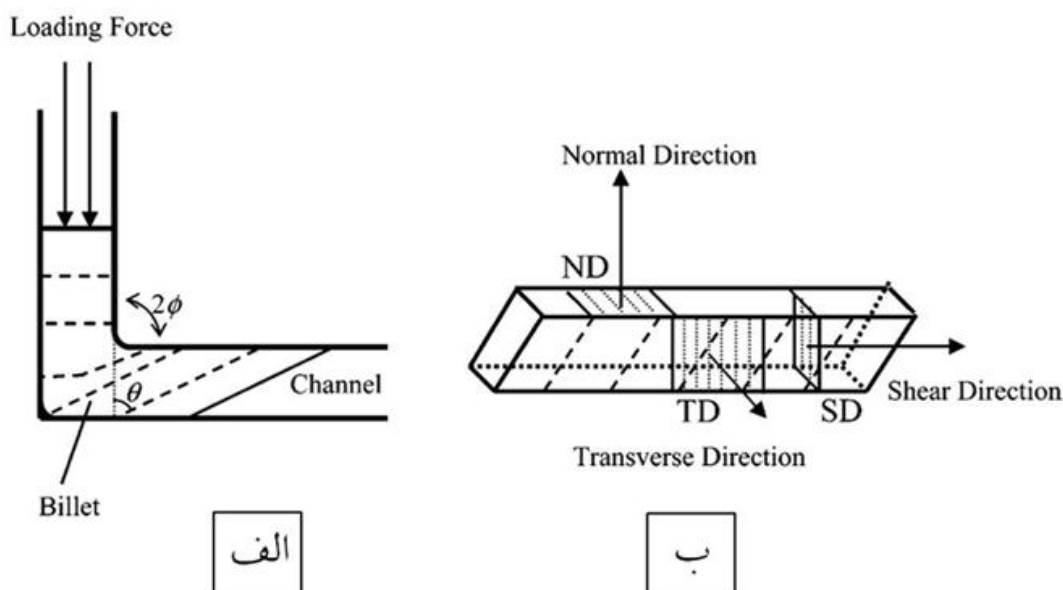


شکل ۲۳- شمای کلی فرآیند ECMAE از مرجع

تغییر شکل شدید نانوکامپوزیت های زمینه پلیمری

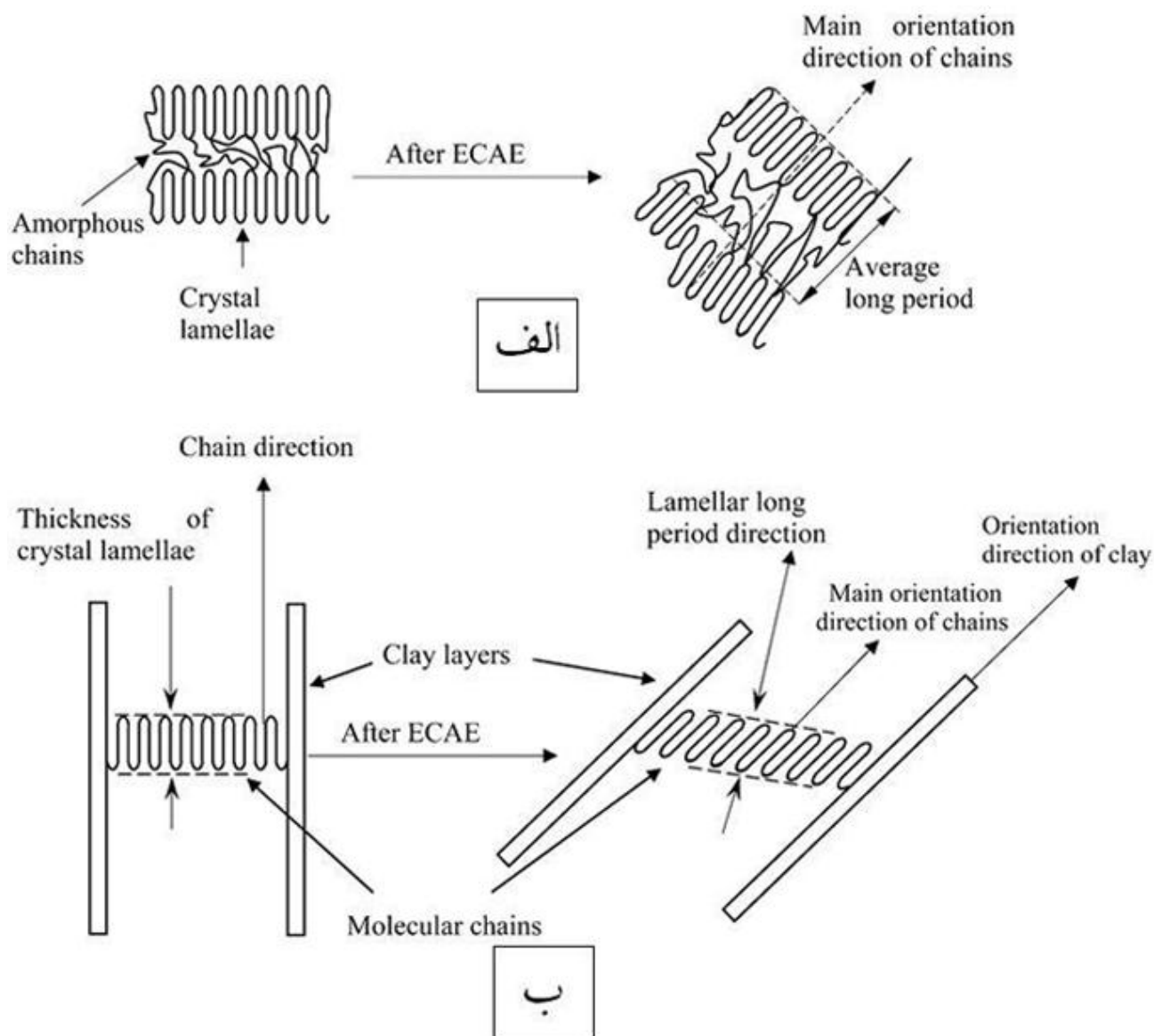
پس از موفقیت های به دست آمده و نتایج جالب توجه تغییر شکل شدید پلیمرها، تحقیقات مختلف بر روی بررسی تغییر شکل شدید کامپوزیت های زمینه پلیمری به خصوص نانوکامپوزیت ها انجام گرفت. در پژوهشی که توسط یک تیم تحقیقاتی انجام شد، پلیمر Nylon-۶ و نانوکامپوزیت با زمینه همین پلیمر و تقویت شده با

Nanocaly توسط فرآیند ECAP تحت تغییر شکل قرار گرفت. شکل ۲۴ شمایی از این فرآیند و جهت گیری های صفحات را در اثر اعمال آن نشان می دهد.



شکل ۲۴ (الف) شکل شماتیک فرآیند ECAP و نحوه تغییرات صفحات ماده نسبت به جهت اعمال نیرو. (ب) مشخص کردن جهات روی ماده ECAP شده برای بررسی های بعدی

برای داشتن بیشترین مقدار تنش برشی دائمی برای قالب ECAP با زاویه ۹۰ درجه، فرآیند در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد انجام گرفت. وجود صفحات Nanocaly در زمینه پلیمری Nylon-۶ و تغییرات جهتگیری آنها حین فرآیند ECAP باعث دستیابی به تنش برشی بیشتری در نانوکامپوزیت نسبت به ماده پلیمری بدون فیلر گردید. مکانیزم لغزش لایه های خاک رس نشان داد که نیروی برشی در حین فرآیند ECAP باعث لغزش و چرخش لایه های خاک رس در مناطق کریستالی می شود؛ این مسئله سبب ایجاد لغزش پیوسته و صاف شدن زنجیره های پلیمری می شود (شکل ۵) که نسبت به حالت بدون خاک رس، جهت گیری بیشتری دارد.



شکل ۲۵ تصویر شماتیک مکانیزم لغزش و جهتگیری صفحات خاک رس در حین فرآیند (ECAP، الف) پلیمر ۶-Nylon، (ب)

نانوکامپوزیت Nylon-۶/Nanoclay از مرجع

نکته قابل توجه دیگر این است که ECAP این قابلیت را دارد که در قسمت خروجی دستگاه های اکستروژن رایج نصب شود و به عنوان یک فرآیند پیوسته به کار گرفته شود.

تغییر شکل شدید پلاستیک، به خاطر ماهیت فشاری بالا و نیز ایجاد برش های شدید در ساختار ماده، باعث تغییرات عمده ای در ریزساختار مواد و به دنبال آن خواص فیزیکی و مکانیکی مواد می کند. پلیمرها پلیمری

هنگامی که تحت تغییر شکل شدید قرار می گیرند، در میزان بلورینگی و چگالی فاز پلیمری، دچار تغییرات عمده می شوند. در کامپوزیت ها و به خصوص نانوکامپوزیت ها نیز علاوه بر تغییرات ذکر شده در زمینه پلیمری، در جهتگیری و توزیع فاز زمینه نیز تغییرات قابل توجهی ایجاد می شود که منجر به تغییر و غالباً بهبود خواص مکانیکی نیز می شود. افزایش مدول الاستیک، استحکام تسلیم و استحکام نهایی از جمله مواردی است که در نانوکامپوزیت زمینه پلیمری تغییر شکل شدید یافته مشاهده شده است.