

مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری نانو • گزارش شماره ۴۷

روش تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) در تولید فلزات نانوساختار

سال انتشار: ۱۳۹۴

ویرایش نخست

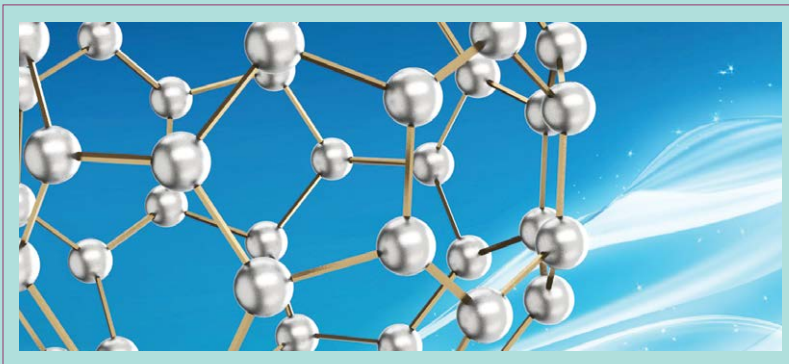


ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

طراحی و اجرا:	توسعه فناوری مهر و بژن	تلفن:	۰۲۱-۶۳۱۰۰
نظارت:	داود قرایلو report@nano.ir	نمابر:	۰۲۱-۶۳۱۰۶۳۱۰
تهیه کننده:	ساعد صیاد رضایی نژاد metals@nano.ir	پایگاه اینترنتی:	www.nano.ir
		صندوق پستی:	۱۴۵۶۵-۳۴۴

۳	فناوری نانو چیست و در کجا کاربرد دارد؟
۳	فلزات نانو ساختار
۴	اساس روش تغییر شکل پلاستیک شدید در ایجاد فلزات نانو ساختار
۴	مزایای روش تغییر شکل پلاستیک شدید
۵	کاربرد فلزات نانو ساختار در صنایع مختلف
۷	انواع روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید
۹	روش نورد تجمعی (ARB) در تولید نانو ساختارها
۹	روش ECAP در ایجاد دانه‌های نانومتری
۱۰	روش تغییر شکل پیچشی تحت فشار بالا (HPT) در ایجاد نانو ساختار
۱۰	روش اکستروژن پیچشی (TE) در ایجاد دانه‌های نانومتری
۱۱	روش SMAT در تولید سطوح نانو ساختار
۱۱	روش RCS در تولید فلزات نانو ساختار
۱۲	فعالیت‌های انجام گرفته در داخل کشور
۱۳	جمع‌بندی

فناوری نانو توانایی ساخت، کنترل و استفاده از مواد در ابعاد نانومتری (۱ تا ۱۰۰ نانومتر) است. در این مقیاس، ابعاد ماده در خصوصیات آن بسیار تأثیر گذار است. به طوری که خواص فیزیکی، شیمیایی و زیستی هریک از اتم‌ها و مولکول‌ها با خواص توده‌ای آن متفاوت است. در واقع فناوری نانو، فهم و به کارگیری خواص جدیدی از مواد و سیستم‌هایی در این ابعاد است که اثرات فیزیکی جدیدی از خود نشان می‌دهند. از آنجایی که این فناوری به شدت میان‌رشته‌ای^۱ بوده، در صنایع مختلف از قبیل صنعت خودرو، الکترونیک، ساخت‌وساز، انرژی، پزشکی، کشاورزی، نساجی و سایر صنایع کاربرد فراوانی دارد.



شکل ۱. به مقیاس ۱ تا ۱۰۰ نانومتر، ابعاد نانومتری گفته می‌شود

فلزات نانو ساختار

مواد فلزی نانو ساختاری که با اهداف تحقیق و توسعه‌ای ساخته می‌شوند، معمولاً دارای توزیع گسترده‌ای از اندازه دانه، از چند ده نانومتر تا یک میکرون هستند. به همین دلیل، تصور می‌شود آلیاژهای نانو ساختاری که در آینده در ابعاد توده‌ای برای کاربردهای صنعتی مختلف ساخته می‌شوند نیز، ریز ساختاری متشکل از دانه‌های نانومتری (از چند ده نانومتر تا زیر یک میکرون) داشته باشند.

تحقیقات نشان داده‌اند [۱] که فلزات نانو ساختار و فوق ریز دانه دارای خاصیت سوپر پلاستیسیته^۲ دمای پایین فوق‌العاده‌ای هستند و نسبت به نمونه‌های مشابه درشت دانه خود، از سختی و استحکام بالاتری برخوردارند. همچنین به دلیل اینکه اغلب شکست‌ها و تخریب‌ها (شکست‌های خستگی، انواع ساییش‌ها و فرسایش‌ها، تخریب‌های حاصل از تشعشع و خوردگی‌ها) از سطح ماده شروع می‌شوند، به نظر می‌رسد، تشکیل ساختارهای نانومتری یا فوق ریز دانه در سطح یک ماده توده‌ای^۳ با اندازه دانه‌های درشت می‌تواند تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد و خواص کلی آن داشته باشد. به عنوان مثال بر اساس آمار منتشر شده توسط مرکز تحقیقات خوردگی دانشگاه ایالتی اوهاو آمریکا (RPI) در هر ثانیه بالغ بر یک تن فولاد در اثر خوردگی از بین می‌رود. با ایجاد ساختارهای ریز دانه می‌توان مقاومت به خوردگی فولادها را افزایش داد و از این خسارت هنگفت کاست.

اساس روش تغییر شکل پلاستیک شدید در ایجاد فلزات نانو ساختار

هدف اصلی از تحقیق و توسعه روی فلزات فوق‌ریزدانه و نانو ساختار، رسیدن به خواص مکانیکی و یا



تریبولوژیکی^۳ هر چه بهتر است. بدین جهت دانشمندان و مهندسان همیشه در تلاش بوده‌اند تا اندازه دانه مواد فلزی را از ابعاد میکرونی به زیر میکرونی و نانومتری برسانند. که در همین راستا، روش‌های مختلفی برای اصلاح اندازه دانه^۵ فلزات ابداع شده است. به طور کلی برای تولید نانو ساختارها و ساختارهای فوق‌ریزدانه دو رویکرد اصطلاحاً پایین به بالا^۶ و بالا به پایین^۷ وجود دارد. یکی از روش‌های تولید مواد

با رویکرد بالا به پایین، تغییر شکل پلاستیک شدید^۸ (SPD) است. در این رویکرد، اندازه دانه فلز پایه بدون اینکه نیاز باشد ترکیب شیمیایی یا ساختار فازی آن تغییر کند، تا ابعاد زیر میکرونی و نانومتری کاهش داده می‌شود. به گونه‌ای که با اعمال کرنش‌های شدید به نمونه، اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری کاهش یافته و در مقابل، خواص مکانیکی فلز بهبود چشم‌گیری می‌یابد.

در اکثر کاربردهای صنعتی، خواص سطحی قطعه در اولویت قرار داشته و تعیین‌کننده عمر و دوام آن است. از مهم‌ترین خواص سطحی که در صنایع به آن توجه می‌شود، ویژگی‌های سایشی ماده است. در این گونه موارد گاهی نیاز است که تنها لایه‌ای از سطح قطعه استحکام و مقاومت خوبی از خود نشان دهد و ترکیب و ساختار اولیه حجم درونی قطعه^۹ ثابت باقی بماند. در اکثر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، معمولاً سطح ماده تحت کرنش قرار گرفته و ریزدانه می‌شود. پهن‌های مرتبط با روش تغییر شکل پلاستیک شدید ثبت شده در پایگاه جهانی ثبت پتنت به بیش از ۵۰۰ مورد می‌رسد. که در این بین ۲۱۷ مورد از آن‌ها متعلق به بعد از سال ۲۰۱۰ است. این نشان می‌دهد که این روش در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

مزایای روش تغییر شکل پلاستیک شدید

تاکنون روش‌های زیادی از قبیل پاشش پلاسما^{۱۰}، عملیات ذوبی با لیزر انرژی بالا^{۱۱} و عملیات با قوس تنگستن به منظور تولید ساختارهای ریزدانه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، که پرکاربردترین آن‌ها روش لیزر است. هر یک از این روش‌ها، پیچیدگی‌ها، مزایا و مشکلات خاص خود را دارد، ولی همگی آن‌ها یک مشکل مشترک دارند و آن وقوع ذوب در حین انجام فرآیند است. این در حالی است که با انجام فرآیند SPD در دماهای زیر نقطه ذوب فلز زمینه، می‌توان از تشکیل فازها و ترکیبات ناخواسته و مخرب جلوگیری نمود. همچنین از آنجایی که تغییرات ابعادی ماده می‌تواند مانعی در مقابل میزان کرنش اعمالی باشد، لذا اکثر روش‌های تغییر

شکل پلاستیک شدید به نحوی طراحی شده‌اند که ابعاد نمونه حین فرآیند تغییر نکند. به طور خلاصه مزایای مختلف روش تغییر شکل پلاستیک شدید عبارتند از:

- مقرون به صرفه بودن
- قابلیت انجام فرآیند با دستگاه‌ها و قالب‌های معمولی و موجود در بازار
- زیست‌سازگاری و عدم تولید گازهای سمی
- امکان اعمال کرنش‌های شدید پلاستیکی بدون تغییر در ابعاد نمونه‌ها
- امکان تولید قطعات فلزی با ابعاد بزرگ و اندازه دانه‌های نانومتری

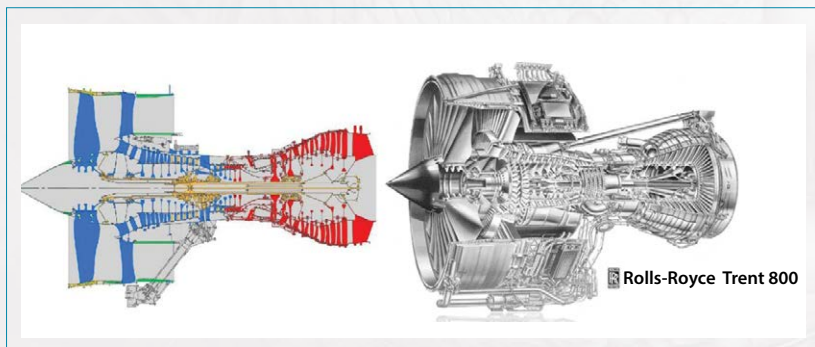
کاربرد فلزات نانوساختار در صنایع مختلف

در مدت بسیار کوتاهی فلزات نانوساختار کاربردهایی را در صنایع هوا فضا، خودروسازی، حمل و نقل، کشتی‌سازی، تسلیحات دفاعی، نفت، گاز و پتروشیمی یافته است. به عنوان مثال قطعات ساخته شده از فولادهای نانوساختار که کارخانه‌های خودروسازی جهان روی آن‌ها کار می‌کنند؛ عبارتند از: بدنه خودرو، سپرها و میله سپرها، صفحات ترمز، اجزاء حساس به برخورد، واشر دهانه سیلندر، محفظه موتور، میله‌های داخلی خودرو و بسیاری از قسمت‌های دیگر.



» شکل ۲. کاربرد فولاد نانوساختار در صنعت خودروسازی

همچنین در تجهیزات هوا فضا که وزن قطعه یک فاکتور مهم است، فناوری نانو کمک می‌کند تا بتوان با بالا بردن استحکام و خواص مکانیکی، وزن را کاهش داد. برای نمونه، استفاده از آلیاژهای نانوساختار در مهندسی، طراحی و ساخت موتورهای صنعت هوانوردی^{۱۱} به کار می‌رود. در شکل زیر موتور جت شرکت Rolls-Royce نشان داده شده است. بخش‌های مرکزی کمپرسور (رنگ نارنجی) این موتورها از فولادهای نانوساختار ساخته شده است. بخش دیگر کمپرسور و فن این موتور از آلیاژ تیتانیوم (آبی رنگ)، و بخش‌های دما بالای محفظه احتراق از آلیاژهای سوپر آلیاژ نیکل ساخته شده است (قرمز رنگ) [۲].



شکل ۳. موتور جت شرکت Rolls-Royce، بخش‌های قرمز، آبی و نارنجی به ترتیب از جنس فلزات نیکل، تیتانیوم و فولادهای نانوساختار ساخته شده است [۲]

مثال‌هایی از کاربرد مواد نانوساختار تولید شده با روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید در صنایع مختلف عبارتند از: ساخت تجهیزات پزشکی، پروتزهای نانوساختار، ایمپلنت‌های استحکام بالا و سبک دارای مدول الاستیسیته مناسب. در صنایع الکترونیک و مخابرات: مواد با خواص مغناطیسی عالی مورد استفاده در ترانسفورمرهای سیگنال meso/micro و در دیگر شبکه‌های مخابراتی. در صنایع نظامی برای ساخت قطعات سبک با استحکام بالا و دارای پایداری حرارتی. برای مصارف در محیط‌های دمای پایین^۳ و ساخت بدنه انواع



شکل ۴. مثال‌هایی از کاربرد فلزات نانوساختار تولید شده به روش تغییر شکل پلاستیک شدید در صنایع مختلف

خودرو و هواپیما.

با همه این اوصاف، به علت مشکلات و چالش‌های فنی و مهندسی زیادی که در فراوری صنعتی فلزات نانو ساختار وجود دارد، تولید آن‌ها با کیفیت بالا در ابعاد بالک (به خصوص به شکل ورق) محدود است. به طور کلی، همه مواد نانو ساختاری که به روش‌های مختلف در ابعاد توده‌ای فراوری می‌شوند، دارای عیوب ساختاری مختلفی هستند که خواص وابسته به ساختار ماده را تحت تأثیر قرار می‌دهند. به طوری که پژوهشگران پیوسته در تلاش هستند که این عیوب را به تدریج بهبود بخشند.

به عنوان مثال با شروع سال ۲۰۱۴ میلادی، دانشگاه کمبریج انگلستان اعلام کرد که برای اولین بار در جهان موفق به تولید صنعتی نوع خاصی از فولاد شده است [۳]. بنابراین از آنجایی که تولید فولادهای نانو ساختار در کارخانه‌های فولادسازی به راحتی میسر نبوده است، در نتیجه انجام عملیات‌های مختلف برای ریزدانه کردن فولادها و رسیدن به ساختار نهایی نانومتری ضرورت پیدا می‌کند.



» شکل ۵. ورق‌های فولادی پیش از انجام فرآیندهای اصلاح ساختار سطحی

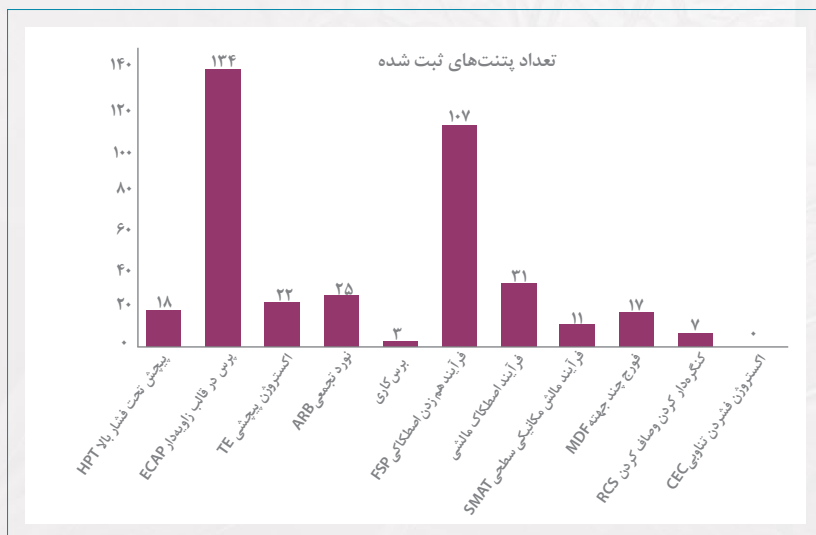
انواع روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید

مهم‌ترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید عبارت است از:

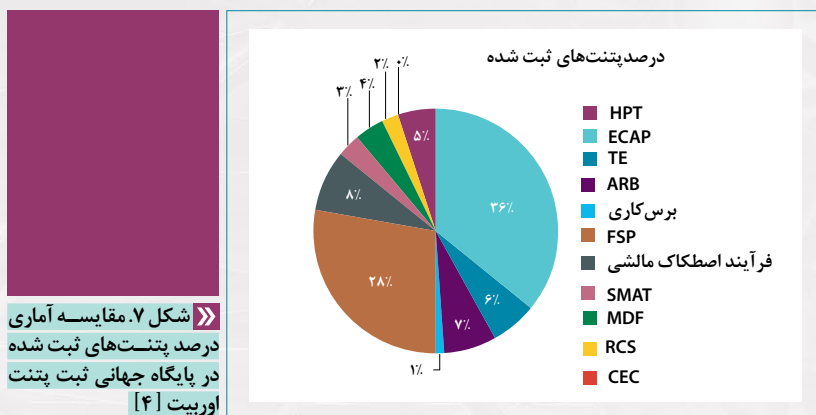
- پیچش تحت فشار بالا^{۱۴} (HPT)
- پرس در قالب زاویه‌دار^{۱۵} (ECAP)
- اکستروژن پیچشی^{۱۶} (TE)
- نورد تجمعی^{۱۷} (ARB)
- برس کاری^{۱۸}
- فرآیند همزن اصطکاکی^{۱۹} (FSP)
- فرآیند اصطکاک سطحی^{۲۰}
- فرآیند مالش مکانیکی سطحی^{۲۱} (SMAT)
- فرآیند فورج چند جهته^{۲۲} (MDF)
- فرآیند اکستروژن فشردن تناوبی^{۲۳} (CEC)

هر کدام از این روش‌ها ویژگی‌های خاص خود را داشته و برای ایجاد ساختار نانو در فلزات و تولید محصولات

در اشکال مختلف ورق، لوله و بالک ماده به کار برده می‌شوند. طی بررسی‌های انجام شده در پایگاه‌های بین‌المللی ثبت پتنت، نمودار زیر تنظیم شده است که نشان‌دهنده‌ی میزان توجه پژوهشگران در سال‌های اخیر به هریک از این روش‌ها است. در شکل ۷ نیز مقایسه‌ی آماری این پتنت‌ها صورت گرفته است.



شکل ۶. نمودار مقایسه تعداد پتنت‌های مرتبط با روش‌های مختلف SPD که بعد از سال ۲۰۰۰ میلادی در پایگاه جهانی اوربیت ثبت شده‌اند (مجموع پتنت‌های ثبت شده در حوزه تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) به بیش از ۵۰۰ عدد می‌رسد) [۴]

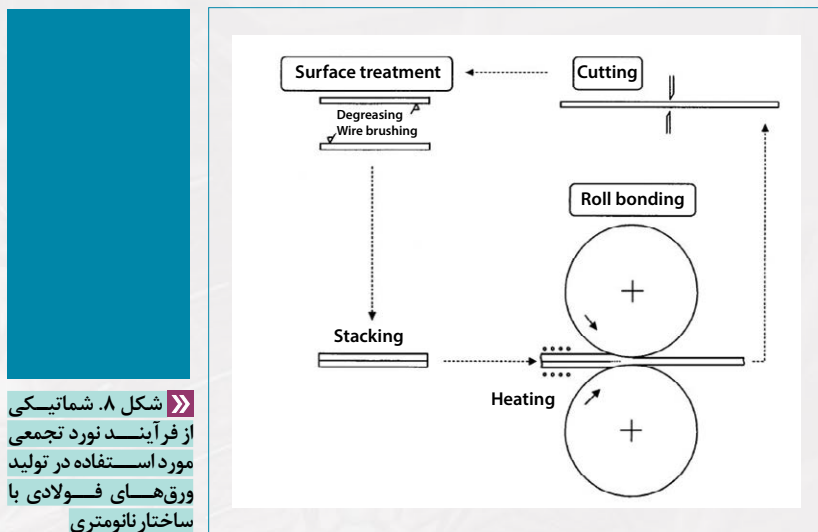


شکل ۷. مقایسه آماری درصد پتنت‌های ثبت شده در پایگاه جهانی ثبت پتنت اوربیت [۴]

برای آشنایی بیشتر با هر کدام از این روش‌ها، در ادامه به تعریف اجمالی از چند روش مهم از فرآیند SPD پرداخته می‌شود.

■ روش نورد تجمعی (ARB) در تولید نانو ساختارها

از این روش برای تولید ورق‌های فولادی فوق ریزدانه استفاده می‌شود. در حال حاضر روش ARB تنها روشی است که می‌توان توسط آن بزرگترین نمونه‌های فلزی از نظر ابعاد محصول با ساختار نانومتری را تولید کرد. اجرای این روش با استفاده از دستگاه‌های نورد معمولی امکان پذیر است. شماتیکی از این روش و ساختار حاصل از آن در شکل ۸ نشان داده شده است.

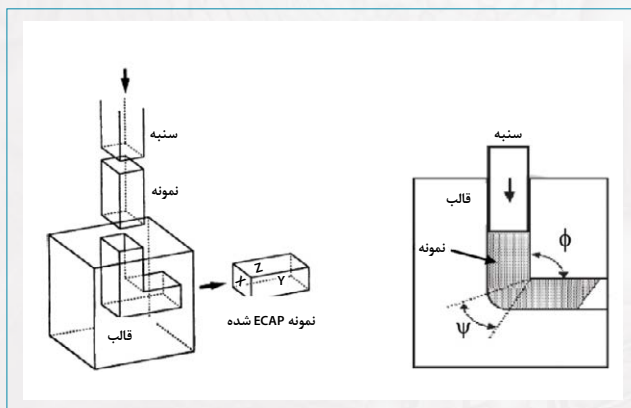


» شکل ۸. شماتیکی از فرآیند نورد تجمعی مورد استفاده در تولید ورق‌های فولادی با ساختار نانومتری

■ روش ECAP در ایجاد دانه‌های نانومتری

همانگونه که در شکل ۹ نشان داده شده است، ابعاد سطح مقطع نمونه در حین اعمال کرنش از طریق این فرآیند ثابت باقی می‌ماند. لذا می‌توان نمونه را به دفعات متوالی از قالب عبور داد و در هر عبور مقداری کرنش پلاستیک در فلز ذخیره کرد.

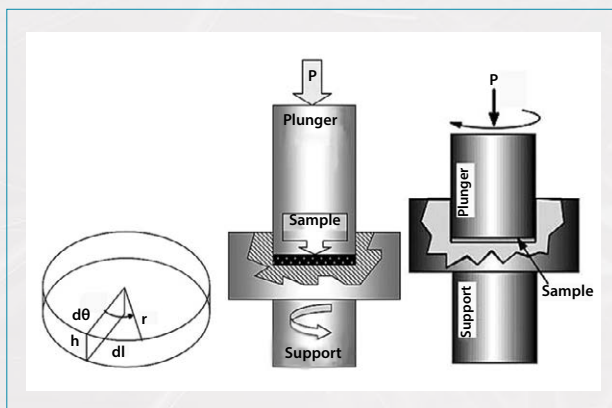
یکی از محدودیت‌های این روش وقت گیر بودن آن است. به طوری که برای دستیابی به کرنش‌های مورد نظر باید نمونه را هر بار از قالب خارج کرد و دوباره به داخل قالب وارد کرد و عملیات پرس کاری را انجام داد. تلاش‌های زیادی برای حذف این مرحله انجام گرفته و پروسه‌های مختلفی در این زمینه در حال توسعه است. بنابراین از روش ECAP برای تولیدات انبوه صنعتی استفاده نمی‌شود زیرا یک روش پیوسته^{۲۴} نیست.



» شکل ۹. شماتیکی
از روش پرس در قالب
زاویه دار

روش تغییر شکل پیچشی تحت فشار بالا (HPT) در ایجاد نانو ساختار

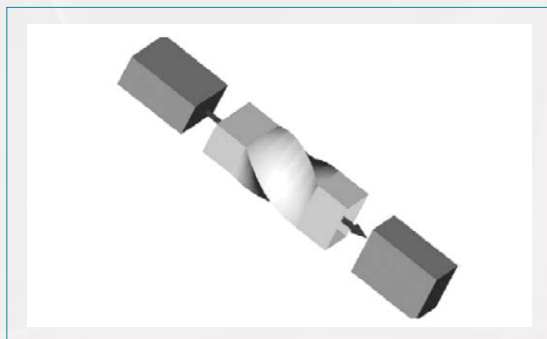
در این روش نمونه اولیه معمولاً به شکل دیسک نازک بوده که به طور همزمان تحت فشار هیدرواستاتیک و تنش‌های برشی قرار می‌گیرد. اصول این روش به صورت شماتیک در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



» شکل ۱۰. شماتیکی از
فرآیند تغییر شکل پیچشی
تحت فشار بالا

روش اکستروژن پیچشی (TE) در ایجاد دانه‌های نانومتری

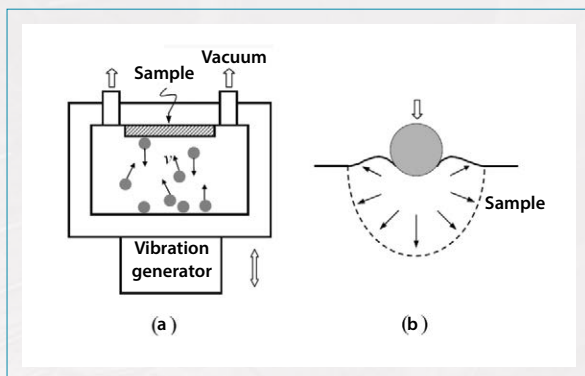
در این روش، نمونه در داخل قالب با اندازه زاویه خاصی حول محور مرکزی پیچانده می‌شود. طراحی این قالب به گونه‌ای است که شکل و ابعاد نمونه، بعد از خارج شدن از قالب تغییری نمی‌کند. در نتیجه کرنش شدیدی را با ثابت بودن ابعاد نمونه، می‌توان به آن اعمال کرد و ماده‌ای با ساختار فوق العاده ریز بدست آورد.



➤ شکل ۱۱. شماتیکی از روش اکستروژن پیچشی

■ روش SMAT در تولید سطوح نانو ساختار

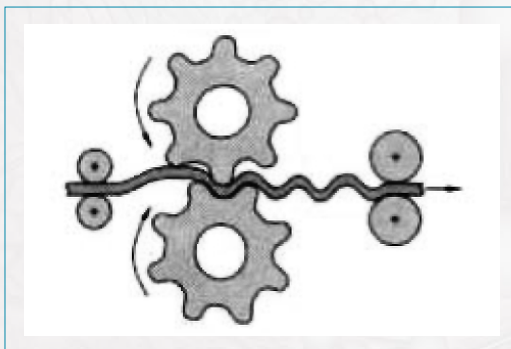
عملیات سایشی مکانیکی سطح (SMAT) با ضربات مکرر چندبعدی به وسیله ساچمه‌های معلق برای سخت کردن سطح انجام می‌شود. این ضربات بر روی نمونه‌های حجمی باعث تغییر شکل پلاستیک شدید لایه‌های سطح نمونه مورد نظر می‌شود که متعاقباً ساختارهای فوق ریزدانه و نانو ساختارها شکل می‌گیرند.



➤ شکل ۱۲. شماتیکی از روش SMAT

■ روش RCS در تولید فلزات نانو ساختار

در روش کنگره‌دار کردن و صاف کردن (RSC[®]) ورق اولیه توسط دو عدد غلتک کوچک به سمت غلتک‌های بزرگ میانی کالیبردار هدایت شده و توسط این غلتک‌ها تغییر شکل پلاستیکی شدید به صورت خمشی اعمال می‌گردد. سپس توسط دو غلتک دیگر، ورق تولیدی به سمت بیرون کشیده می‌شود. این عمل در چند پاس متوالی انجام می‌گیرد و موجب اعمال تغییر شکل شدید به ورق و در نهایت منجر به ایجاد ساختار فوق ریزدانه یا نانو ساختار می‌شود (شکل ۱۳). به وسیله‌ی این روش انواع ورق‌های آلومینیومی و مسی را می‌توان ریزدانه کرد. علاوه بر فرآیندهای مذکور، در سال‌های اخیر فرآیندهای دیگری نیز برای اعمال کرنش‌های شدید پلاستیک در



➤ شکل ۱۳. شماتیک روش RCS در تولید فلزات ریزدانه

مواد فلزی و کاهش اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری پیشنهاد شده است. این فرآیندها با نام‌های فورج سیکلی در قالب بسته (${}^{\circ}\text{CCDF}$)، اکستروژن هیدرواستاتیک (${}^{\circ}\text{HE}$)، ${}^{\circ}\text{ECAP}$ ، ${}^{\circ}\text{ECAP-Conform}$ ، ${}^{\circ}\text{ECAP-Forging}$ ، ${}^{\circ}\text{APB}$ ، ${}^{\circ}\text{CCGC}$ و ${}^{\circ}\text{CGP}$ ، ${}^{\circ}\text{C2S2}$ شناخته می‌شوند. اصول این روش‌ها نیز مشابه فرآیندهای قبلی بر پایه اعمال کرنش‌های شدید پلاستیک به نمونه فلزی بدون تغییر ابعاد ظاهری آن است. توجه به اصول این روش می‌تواند زمینه‌های لازم جهت ابداع و معرفی روش‌های جدیدتر و کارآمدتر تولید مستقیم مواد فلزی با اندازه دانه نانومتری را فراهم آورد.

فعالیت‌های انجام گرفته در داخل کشور

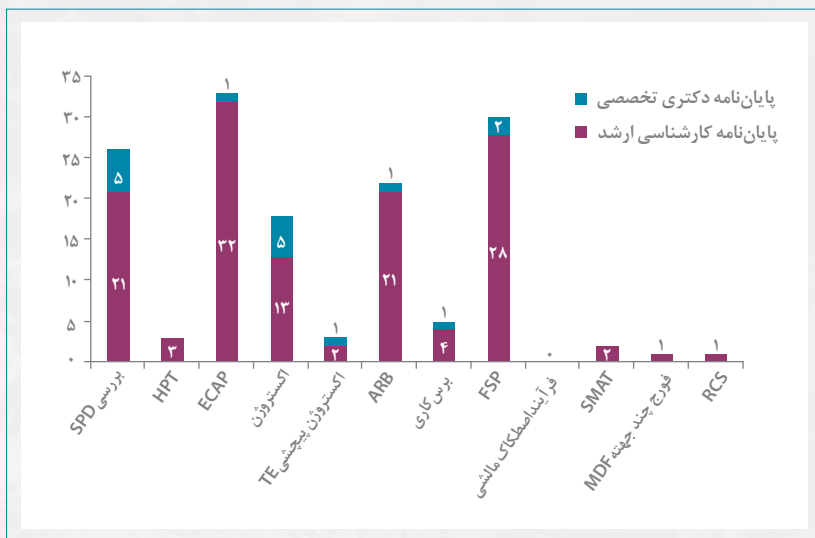
با توجه به این که اکثر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، نو محسوب می‌شوند، در طی چند سال گذشته استفاده از این روش‌ها برای تولید فلزات فوق ریزدانه و نانو ساختار پیشرفت فراوانی داشته است. به طوری که تعداد پایان‌نامه‌های دانشجویی مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری تخصصی در رابطه با فلزات نانو ساختار تولید شده به روش تغییر شکل پلاستیک شدید ثبت شده در پایگاه فناوری نانو [۵] به بیش از ۱۵۰ مورد می‌رسد که بخشی از این آمار در نمودار زیر لحاظ شده است.



علی رغم ویژگی‌های یاد شده در ایجاد فولادهای نانو ساختار از طریق روش تغییر شکل پلاستیک شدید، تاکنون در داخل کشور، بخش خصوصی سرمایه‌گذاری اندکی برای گسترش تولید محصولات نانو ساختار فولادی در ابعاد صنعتی نموده است. با این وجود بخش‌های مختلف صنایع در صدد ایجاد خط تولید نانو ساختار بر روی

فولاد از طریق روش های SPDند.

پژوهشگران دانشگاه امیرکبیر در سال ۱۳۹۳ با همکاری محققان اسپانیایی مؤسسه CENIM-CSIC از روش تغییر شکل پلاستیک شدید استفاده کردند و موفق به تولید آلومینیوم تجاری ۱۰۵۰ با ساختار نانومتری شدند. این آلیاژ سبک تر بوده و استحکامی چندین برابر نمونه های متداول دارد، به گونه ای که از آن به عنوان محکم ترین آلیاژ آلومینیوم نام برده می شود. استفاده از روش SPD منجر به کاهش هزینه های تولیدی و همچنین افزایش راندمان محصول نهایی شده است [۶].



شکل ۱۴. نمودار بررسی تعداد پایان نامه های ثبت شده کارشناسی ارشد و دکتری مربوط به تولید فلزات نانو ساختار به روش های مختلف SPD ثبت شده در پایگاه سایت ستاد نانو [۵]

جمع بندی

در طی یک دهه گذشته، روش تغییر شکل پلاستیک شدید به عنوان یکی از روش های جدید برای تولید مستقیم مواد فلزی با اندازه دانه نانومتری مطرح شده است. مبنای این روش، کاهش اندازه دانه ها در نمونه های فلزی با ابعاد بزرگ از طریق اعمال کرنش های شدید بدون ایجاد تغییرات ابعادی در نمونه است. از جمله مهمترین این روش ها می توان به ECAP، ARB، TE، FS، SMAT اشاره کرد. این روش ها دارای مزایای زیادی هستند که مهمترین آن ها عبارت است از: زیست سازگاری، کنترل دقیق ابعادی نمونه، مقرون به صرفه بودن، در دسترس بودن و عدم ایجاد ذوب در حین انجام فرآیند. با گذشت زمان این روش ها به دلیل مزایای متعددی که دارند، روز به روز بیشتر مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران قرار می گیرد.

پی‌نوشت‌ها

- ۱ Multidisciplinary
- ۲ Super-Plasticity
- ۳ Bulk
- ۴ Tribological
- ۵ Grain structure refinement
- ۶ Down-to-top
- ۷ Top-to-down
- ۸ Sever plastic deformation
- ۹ Bulk
- ۱۰ Plasma spray
- ۱۱ High-energy laser treatment
- ۱۲ Aviation engines
- ۱۳ Cryogenic temperature
- ۱۴ High pressure torsion
- ۱۵ Equal channel angular pressing
- ۱۶ Twist extrusion
- ۱۷ Accumulative roll bonding
- ۱۸ Brushing
- ۱۹ Friction stir processing
- ۲۰ Friction surfacing
- ۲۱ Surface mechanical attrition treatment
- ۲۲ Multi-directional forging
- ۲۳ Cyclic extrusion-compression
- ۲۴ Continuous
- ۲۵ Repetitive corrugation and straightening
- ۲۶ Cyclic Closed Die Forging
- ۲۷ Hydrostatic Extrusion
- ۲۸ Continuous Conshearing ECAP
- ۲۹ Continuous Confined Strip Shearing Process
- ۳۰ Constraint Groove pressing
- ۳۱ Cyclic Die Channel Compression
- ۳۲ Accumulative Press Bonding

مراجع

۱. صیاد رضایی نژاد س.، ایجاد ساختار نانو در فولاد زنگ‌زن آستینیتی به روش فرآیند همزن اصطکاکی و بررسی خواص سایشی و فرسایشی آن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس؛ تهران، ۱۳۹۱

۲. Hicks, M.A and M.C Thomas (2003) Advances in Aeroengine Materials presented at Parsons Conference, Dublin, 2003.

۳. www.isna.ir

۴. www.orbit.com

۵. www.nano.ir

۶. Sajjad Amir Khanlou, Mostafa Ketabchi, Nader Parvin, Alberto Orozco-Caballero, Fernando Carreño, Homogeneous and ultrafine-grained metal matrix nanocomposite achieved by accumulative press bonding as a novel severe plastic deformation process, Scripta Materialia, Volume 100, 15 April 2015, Pages 40-43.

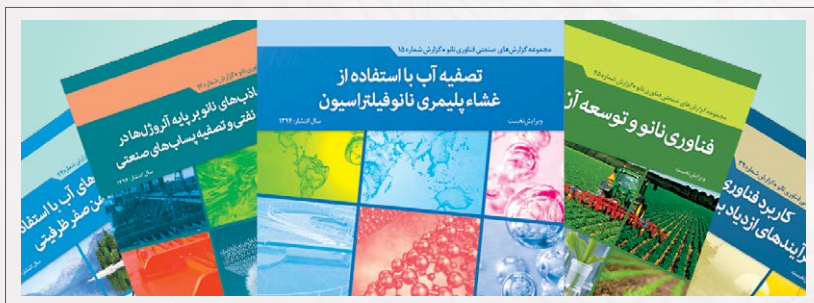
مجموعه نرم‌افزارهای «نانو و صنعت»

مجموعه نرم‌افزارهای نانو و صنعت با هدف معرفی کاربردهای فناوری نانو در بخش‌ها و صنایع مختلف طراحی و منتشر شده است. در این نرم‌افزار اطلاعاتی مفید و کاربردی در قالب فیلم مستند، مقاله، کتاب الکترونیکی و مصاحبه با کارشناسان، در اختیار فعالان صنعتی کشور و علاقمندان به فناوری نانو قرار داده شده است. تاکنون شش عنوان از مجموعه نرم‌افزارهای نانو و صنعت با موضوع کاربردهای فناوری نانو در صنایع «نفط»، «خودرو»، «نساجی»، «ساخت‌وساز»، «بهداشت و سلامت» و «کشاورزی»، ارائه شده است.

مرکز پخش: ۶۶۸۷۱۲۵۹ - www.nanosun.ir



از مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری نانو منتشر شده است



- نانومیسرها و نقش آنها در رهایش دارو
- نانوبلورهای دارویی فرمولاسیون جدید داروهای کم‌محلول
- نقش فناوری نانو در توسعه پیچ‌های پوستی
- کاربردهای فناوری نانو در سیمان حفاری
- کاربردهای فناوری نانو در گل حفاری
- کاربردهای فناوری نانو در صنعت نساجی
- بهره‌گیری از جاذب‌های نانو بر پایه آئروژل‌ها در حذف آلاینده‌های نفتی و تصفیه پساب‌های صنعتی
- کاربرد فناوری نانو در رنگ‌های آنتی استاتیک داروهای متصل شده به پادتن
- تصفیه آب با استفاده از غشاء پلیمری نانوفیلتراسیون
- نانوحسگرها جهت آزمایش‌های بیوشیمیایی متداول خون (تعیین میزان قند، چربی و...)
- نانو کامپوزیت‌های زیست تخریب پذیر برای بسته‌بندی مواد غذایی
- کاربرد فناوری نانو در رنگ‌های خود تمیز شونده
- کاربرد فناوری نانو در رنگ‌های ضدخش
- فناوری نانو در رنگ‌های آنتی باکتریال
- کاربرد فناوری نانو در عایق‌های حرارتی
- کاربرد فناوری نانو در عایق‌های صوتی
- افزایش تولید و کیفیت محصولات کشاورزی با استفاده از نانوکودهای بیولوژیک
- کاربرد فناوری نانو در صنعت چوب
- کاربرد فناوری نانو در تصفیه آب
- کاربرد فناوری نانو در تصفیه هوا
- کاربرد فناوری نانو در بتن‌های سبک
- کاربرد فناوری نانو در بتن
- نانولیپوزومها و نقش آنها در رهایش دارو
- کاربرد فناوری نانو در محیط‌های بیمارستانی
- کاربرد فناوری نانو در حسگرهای ساختمانی
- کاربرد فناوری نانو در عایق‌های رطوبت
- کاربرد فناوری نانو در لوله‌های بی‌صدای فاضلاب
- حذف آلاینده‌های آب با استفاده از نانوذرات آهن صفر ظرفیتی
- کاربرد فناوری نانو در صنعت ساختمان
- استفاده از غشاء نانولوله کربنی جهت نمک‌زدایی و تصفیه آب
- کاربرد فناوری نانو در کاشی و سرامیک
- غنی‌سازی محصولات کشاورزی با نانوکودهای کلاته آهن و روی
- کاربرد فناوری نانو در فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت خام
- خشک کردن انجمادی پاششی
- کیتوسان پلیمری زیست تخریب پذیر در سامانه‌های دارو رسانی
- فناوری نانو و بتن‌های ویژه
- کاربرد فناوری نانو در آنالیزگرهای جدید صنایع بالادستی نفت
- کاربردهای فناوری نانو در بخش انتقال شبکه برق رسانی
- فناوری نانو و توسعه آن در کشاورزی
- نقش فناوری نانو در ارتقای کیفی سیمان و مصالح پایه سیمانی