مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISSN: 1605-9719
سال ۲۷، شماره ۱۲۱، صفحات ۵۰–۵۹

توسعه تکنیک‌های مداوم به منظور اصلاح فرایند فشردن در کانال همسان زاویه‌دار

حسن غفوریان نصرتی[۱ و *]، خلیل خلیلی[۲]، مهدی گردویی[۳]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند
[۲] استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند
[۳] استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
*مسئول مکاتبات: h.ghafuriannosrati@birjand.ac.ir

◄ چکیده

یکی از موثرترین تکنیک‌های روش تغییرشکل پلاستیک شدید به منظور ایجاد ساختار فوق‌ریزدانه در مواد، تکنیک فشردن در کانال همسان زاویه‌دار یا (ایکپ) می‌باشد. در دو دهه گذشته شاهد تحولات زیادی در نحوه‌ی طراحی قالب و ایجاد تغییرات در تکنیک ایکپ بوده‌ایم. در مقاله حاضر به توصیف انواع مختلفی از تکنیک‌های ایکپ که اخیرا توسعه یافته و درصدد حل مشکلات فرایند ایکپ سنتی بوده؛ پرداخته شده است. همچنین نگاه ویژه‌ای به استفاده از تکنیک فشردن در کانال همسان زاویه‌دار به صورت مداوم یا ایکپ_کانفرم (ECAP-Conform) در ایجاد ساختار فوق‌ریزدانه شده است. این تکنیک در واقع ترکیبی از تکنیک فشردن در کانال همسان زاویه‌دار یا ایکپ و فرایند کانفرم می‌باشد؛ که به عنوان یک راه حل برای تولید مداوم مواد ریزساختار ارائه شده است. نتایج نشان دهنده موثر بودن استفاده از این تکنیک در تولید مواد ریزدانه به عنوان روش تغییرشکل پلاستیک شدید و حذف محدودیت‌های موجود در تکنیک ایکپ می‌باشد.

◄ واژگان کلیدی

ساختار فوق‌ریزدانه
ایکپ
ایکپ_کانفرم
مداوم
شکل‌دهی

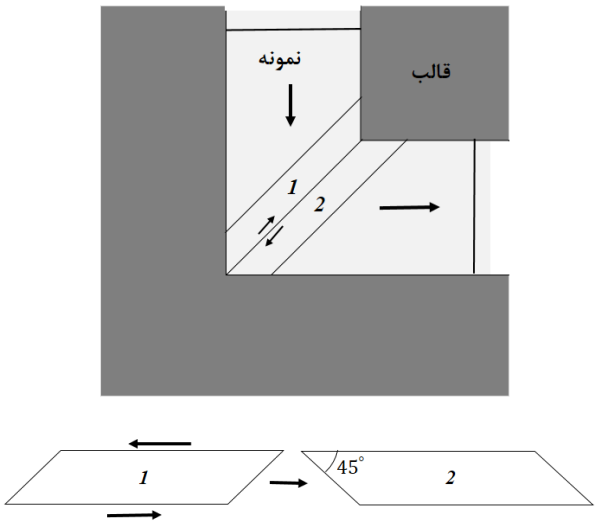
◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۹/۰۳
تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۸/۲۶

۱ مقدمه

مواد فوق‌ریزدانه با اندازه دانه حدود ۱ میکرومتر یا کمتر، خواص مکانیکی و فیزیکی منحصر به فردی دارند و می‌توانند به وسیله روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید تولید شوند [۱]. روش تغییرشکل پلاستیک شدید[۱] (SPD) در واقع انواع مختلفی از فرایندهای شکل‌دهی فلزات است که به منظور اعمال کرنش‌های بالا بر مواد برای ایجاد ساختار فوق‌ریزدانه استفاده می‌گردد [۲]. در میان همه روش‌های SPD ، فرایند فشردن در کانال همسان زاویه‌دار[۲] (ECAP) یا ایکپ و یا به عبارتی دیگر اکستروژن در کانال همسان زاویه‌دار[۳] (ECAE) به دلیل موثر بودن در تولید ساختار فوق‌ریزدانه بیشترین توجه را به سمت خود جذب کرده است. با استفاده از این فرایند کرنشی در حدود ۱ را می‌توان به مواد پلی‌کریستال در یک پاس عبور از قالب اعمال کرد [۳]. به دلیل ثابت ماندن سطح مقطع قطعه بعد از اجرای این فرایند، می‌توان با اجرای آن در چند پاس به کرنش‌های بیشتری دست یافت. فرایند ایکپ برای محدوده وسیعی از فلزات، آلیاژها و کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود و این مزیتی است که ممکن است سبب استفاده از این فرایند برای تولید نمونه‌های نسبتا بزرگ باشد [۲، ۳]؛ البته برخی موانع نیز برای تجاری سازی این روش پرطرفدار SPD وجود دارد.

این فرایند اولین بار در دهه ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ در موسسه‌ای در مینسیک جماهیر شوروی سابق معرفی شد [۴]. ماهیت اعمال تغییرشکل در فرایند ایکپ، برش ساده است که در هر پاس عبور از قالب در نمونه ایجاد می‌گردد؛ این موضوع در شکل ۱ به صورت طرحواره نمایش داده شده است. برای ساده‌سازی در این شکل، زاویه قالب ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است. صفحه برش بین دو المان متوالی با شماره‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند؛ جزئیات مربوط به جابه‌جایی این المان‌ها به وسیله برشی که اتفاق می‌افتد در پایین شکل به تصویر کشیده شده است [۵].



شکل ۱: اصل وجود صفحه برش داخل قالب ایکپ؛ پس و پیش شدن المان‌های ۱ و ۲ از طریق برش [۵]

با این حال فرایند ایکپ در شکل اصلی یا سنتی خود دارای دو نقص می‌باشد:

۱. طول قطعه‌کار، که خود بر روی دو عامل اثر می‌گذارد؛ مورد اول، نسبت

[1] Severe Plastic Deformation (SPD) [2] Equal-Channel Angular Pressing (ECAP) [3] Equal-Channel Angular Extrusion (ECAE)

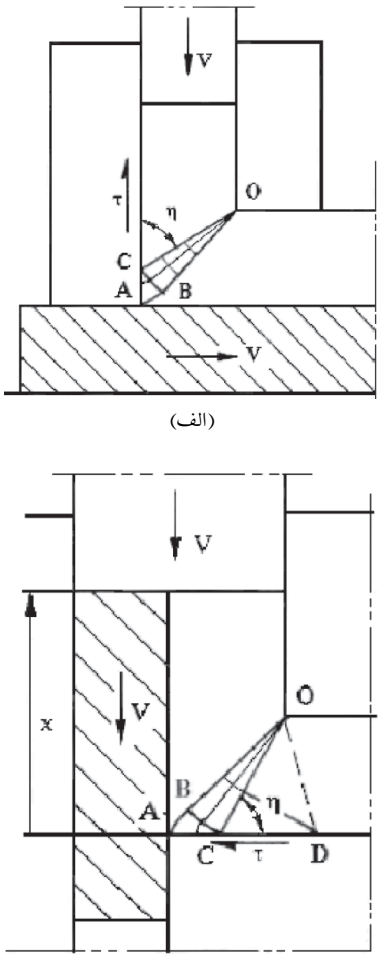
ابعادی (طول به قطر) است که نیاز است کوچکتر از مقدار بحرانی باشد تا قطعه‌کار در طی اجرای فرایند خم نشود و مورد دوم محدودیت در میزان جابه‌جایی رم دستگاه پرس در این فرایند می‌باشد [۶].

۲. نقص دوم؛ ناپیوسته بودن فرایند می‌باشد که نتیجه آن هزینه بالا و کارایی کمتر آن در تولید است (با توجه به قرارگیری نمونه به صورت تکراری در قالب، فشردن و خارج شدن آن و سپس جایگذاری نمونه در قالب برای اعمال کرنش بیشتر).

علاوه بر محدودیت‌های ذکر شده، طول قابل توجهی از دو انتهای قطعه بعد از خروج از قالب معمولا شامل ساختار غیر یکنواخت یا ترک‌های ریز است که باید دور انداخته شود (به دلیل تغییرشکل غیر یکنواخت و انحراف‌های زیاد در ابتدا و انتهای نمونه)؛ در نتیجه باعث هدر رفتن بخشی از قطعه‌کار شده و در نتیجه افزایش هزینه را در پی خواهد داشت. به عنوان مثال، اندازه‌گیری سختی در مقطع طولی از یک نمونه شمش آلومینیومی ۷۰ میلی‌متری که تحت فرایند ایکپ قرار گرفته است، نشان می‌دهد که تنها ۳۸ میلی‌متر از طول شمش دارای جریان یکنواخت است [۷]. این اندازه‌گیری نشان می‌دهد که اجرای فرایند ایکپ به شیوه معمول دور ریزی بیشتر از ۴۰ درصد داشته و این بدین معنی است که عملیات‌هایی در استفاده از تکنولوژی ایکپ موثر خواهند بود که به طور پیوسته اجرا شده تا این دور ریز در تولیدات با ارزش مثل ایمپلنت‌های پزشکی به حداقل برسد [۸].

تلاش‌هایی برای حذف این محدودیت‌ها و صنعتی کردن فرایند ایکپ انجام گرفته است. ناکاشیما و همکاران [۵] در دستیابی به کرنش بیشتر با طراحی قالبی دارای ۵ خم متوالی موفق بوده‌اند اما باز هم فرایند ایکپ ناپیوسته بوده است؛ زیرا در پژوهش آنان باز هم نیاز به حذف و اضافه کردن نمونه از داخل قالب به چشم می‌خورد. راه حل‌های دیگری نیز ارائه شده است، از قبیل کشش در کانال همسان زاویه‌دار[1]، نورد تجمعی[2]، کنگره یا موج‌دار و صاف کردن‌های متوالی[3]، تغییرشکل برشی متوالی[4]، برش موضعی متوالی[5] و فرایند ایکپ مداوم یا پیوسته[6]. فرایند کشش در کانال همسان زاویه‌دار، بر مشکل ناپیوسته بودن به دلیل کاهش سطح مقطع بیشتر از ۱۵ درصد؛ نمی‌تواند غلبه کند [۹]. در فرایندهای نورد تجمعی و کنگره‌دار و صاف کردن‌های متوالی، وجود ترک‌های لبه‌ای و انعطاف‌پذیری ضعیف باعث کمتر شدن اعتبار آنها می‌شود [۱۰، ۱۱]. اخیرا فرایندهای تغییرشکل برشی متوالی و برش موضعی متوالی به عنوان فرایندهای مداوم به‌منظور تولید ورق‌ها و نوارهای نازک فوق‌ریزدانه گزارش شده‌اند. در هر دو این فرایندها از اصطکاک بین غلتک‌ها برای هل دادن قطعه کار به داخل قالب ایکپ استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که برای قطعاتی به شکل میله با مقطع دایره‌ایی یا مستطیل شکل، نیروی اصطکاک بیشتری برای هل دادن قطعات به داخل قالب نیاز است.

اگرچه فرایند ایکپ عموما در مورد فلزات جامد استفاده می‌شود اما ممکن است برای تحکیم پودرهای فلزی هم مورد استفاده قرار گیرد [۷، ۸]. استفاده از روانکار مناسب، مثل دی‌سولفید مولیبدن (MoS_2) برای به حداقل رساندن اثر اصطکاک در قالب ایکپ توصیه می‌شود. اگرچه رویکردهای جایگزینی برای کاهش اصطکاک ارائه شده است که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد. در این شکل دو مثال از وجود دیواره‌های قابل حرکت در قالب (در شکل ۲الف در ورودی کانال و در شکل ۲ب در خروجی کانال) نمایش داده شده است. این دو پیکربندی منجر به ایجاد خطوط لغزش متفاوت در صفحه برش خواهد شد [۱۲].



شکل ۲: استفاده از قالب‌هایی با دیواره متحرک در فرایند ایکپ؛ الف) در کانال ورودی، ب) در کانال خروجی [۱۲]

در ادامه به تکنیک‌های ارائه شده توسط محققین، جهت هموار شدن موانع پیش‌روی تجاری‌سازی شدن فرایند ایکپ خواهیم پرداخت.

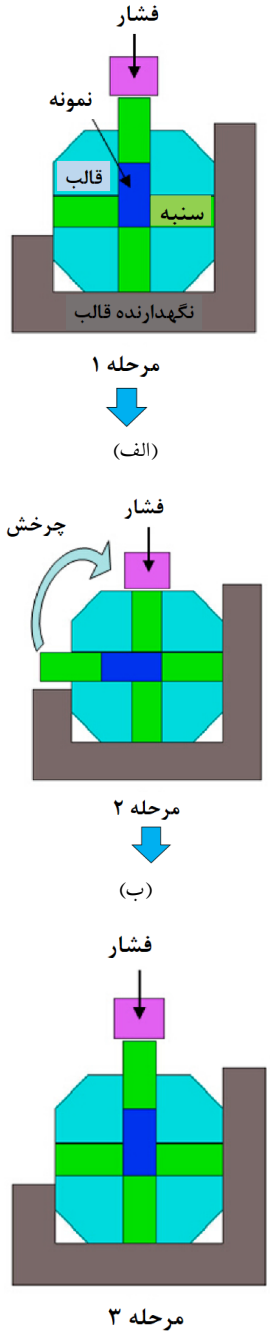
۲ تکنیک‌های اصلاح فرایند ایکپ

۱.۲ استفاده از قالب چرخشی، اکستروژن جانبی و قالب‌های چند پاسه

همانطور که پیشتر بیان شد، یک محدودیت مهم در فرایند ایکپ سنتی این است که به منظور افزایش تعداد پاس و در نتیجه اعمال کرنش بالاتر، نمونه باید از قالب خارج شود و دوباره با چرخش یا بدون چرخش در داخل قالب قرار گیرد. این کار مدت زمان اجرای فرایند را طولانی می‌کند؛ لذا برای جلوگیری از این محدودیت چندین تکنیک ارائه شده‌است. یک تکنیک ساده

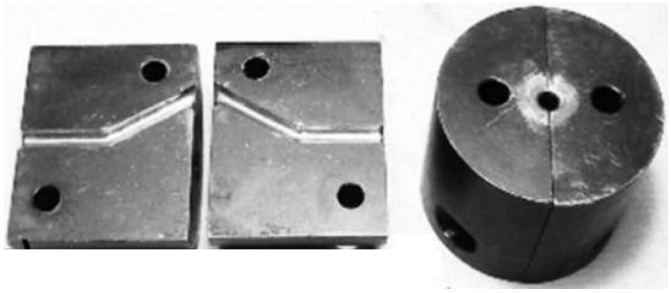
[1]Equal Channel Angular Drawing (ECAD) [2]Accumulative Roll-Bonding (ARB) [3]Repetitive Corrugation and Straightening (RCS)
[4]Conshearing [5]Continues constrained strip shearing (C2S2) [6]ECAP-Conform

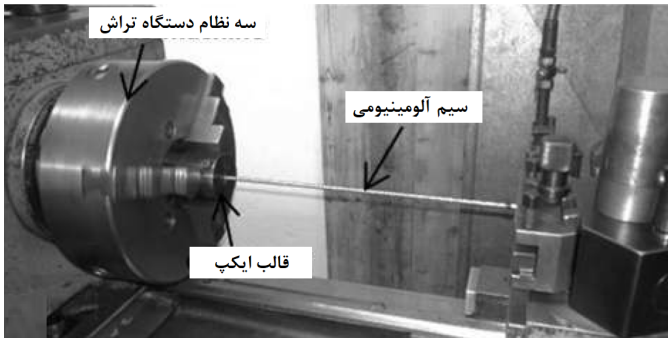
که نیاز به خارج شدن نمونه از قالب و جایگذاری مجدد آن برای اجرای فرایند را بین هر پاس حذف می‌کند، استفاده از قالب‌های چرخشی در فرایند ایکپ می‌باشد. این رویکرد در شکل ۳ نمایش داده شده است [۱۳]. مزیت این تکنیک عملکرد ساده آن است به‌طوری که استفاده از قالب چرخشی در فرایند ایکپ، برای ۳۲ پاس متوالی گزارش شده است [۱۴، ۱۵]. با این حال محدودیتی در تکنیک ارائه شده وجود دارد و آن کوچک بودن نسبت ابعادی نمونه است که منجر به ناهمگنی در نمونه خواهد شد [۱۶].



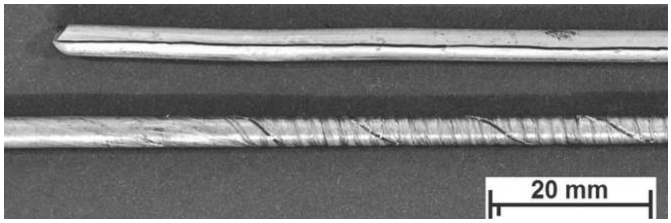
شکل ۳: اجرای فرایند ایکپ با استفاده از قالب چرخشی؛ الف) مرحله اول، ب) بعد از اجرای مرحله اول، ج) بعد از چرخش ۹۰ درجه قالب برای ادامه فرایند [۱۳]

در پژوهشی پوربشیری و همکاران [۱۷] تکنیک جدیدی را تحت عنوان کشش در قالب چرخان دارای کانال همسان زاویه‌دار[1] (ECATD) ارائه کرده‌اند. در این تکنیک سیم آلومینیومی از درون قالبی که دارای کانال همسان زاویه‌دار است، کشیده می‌شود و به طور همزمان حرکت چرخشی به قالب؛ توسط ماشین تراش داده می‌شود. شکل ۴ مجموعه قالب طراحی شده در این تکنیک را نشان می‌دهد. نتایج نشان از توزیع سختی به طور ناهمگن در سطح مقطع سیم آلومینیومی دارد (مقدار سختی ویکرز در سیم آلومینیومی، در مرکز از ۲۲ به ۴۵ و در سطح خارجی آن به ۶۵ افزایش یافته است).





(الف)



(ب)

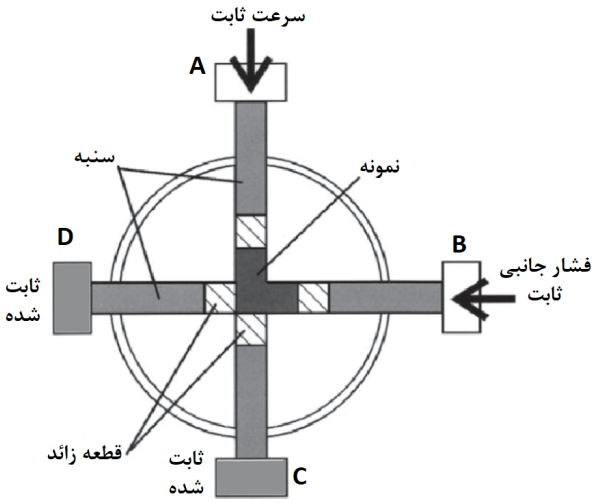
شکل ۴: الف) مجموعه قالب در تکنیک ECATD، ب) سیم آلومینیومی بعد از اجرای یک پاس

تکنیک ارائه شده بعدی که از لحاظ فیزیکی مشابه قبلی می‌باشد؛ فرایند اکستروژن جانبی است که در شکل ۵ نمایش داده شده است. در این تکنیک از ۴ سنبه برای تامین فشار در حین فرایند استفاده می‌شود به این نحو که نمونه نشان داده شده در شکل، توسط سنبه A فشرده شده و همزمان توسط سنبه B نیز تحت فشار جانبی ثابتی قرار می‌گیرد. در این تکنیک همانند تکنیک قبلی اجرای مجدد و تکرار فشردن نمونه ممکن است اعمال شود. آزوشیما و همکاران در پژوهشی از این تکنیک جهت فشردن تا ۱۰ پاس استفاده کرده‌اند [۱۸].

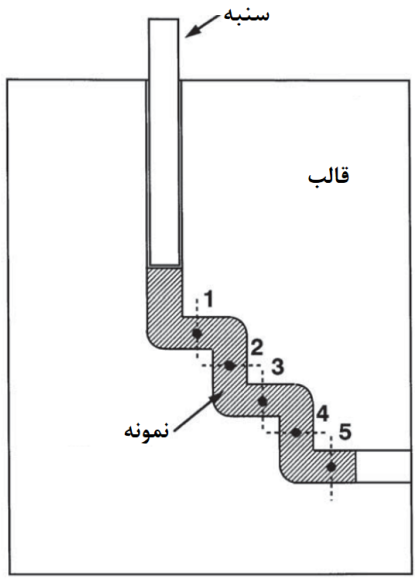
در شکل ۶ تکنیک بعدی ارائه شده است که نیاز به تجهیزات پیچیده هم ندارد و تنها دارای یک قالب با چند مسیر عبور متوالی است. در این شکل، قالب شامل یک کانال با ۵ خم ۹۰ درجه می‌باشد [۵]. استفاده از این تکنیک برای مقایسه مشخصه‌های ساختاری در یک نمونه بعد از اجرای تعداد

[1] Equal Channel Angular Torsion Drawing (ECATD)

پاس‌های مختلف توصیه می‌شود. به عنوان مثال، مکان‌های مشخص شده در شکل ۵ می‌تواند مطابق با فشردن یک نمونه در فرایند ایکپ معمولی با یک تا پنج پاس باشد.



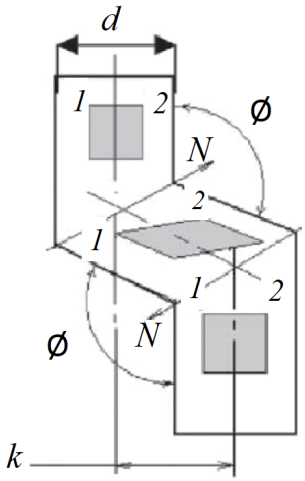
شکل ۵: استفاده از تکنیک اکستروژن جانبی در فرایند ایکپ [۱۸]



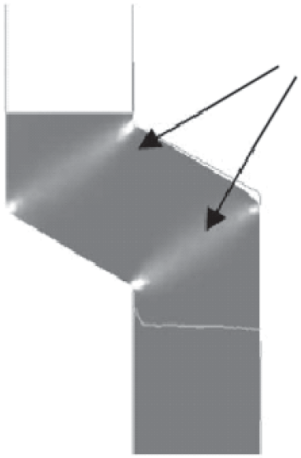
شکل ۶: استفاده از قالب چند پاسه در فرایند ایکپ [۵]

۲.۲ توسعه فرایند ایکپ با کانال‌های موازی

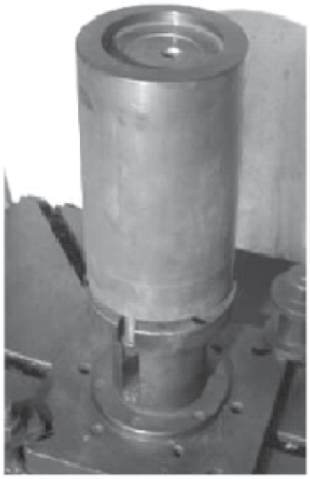
این تکنیک در شکل ۷ نمایش داده شده است. در این شکل ϕ زاویه تقاطع بین کانال‌های موازی و k فاصله بین کانال‌ها می‌باشد. راب در پژوهشی [۱۹] اثر پارامترهای ϕ و k بر روی الگوی جریان و همگنی کرنش یک نمونه مسی با استفاده از شبیه‌سازی دو بعدی فرایند ایکپ با کانال‌های موازی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که به‌منظور رسیدن به کرنش همگن بزرگتر، مقدار بهینه ϕ برابر ۱۰۰ درجه و مقدار k برابر با قطر کانال تخمین زده شده است. تحت شرایط ذکر شده کرنش کل برای یک پاس تقریبا برابر ۲ است. در شکل ۷ج مجموعه قالب ایکپ با کانال‌های موازی برای اجرای فرایند ایکپ نمونه‌های مسی و تیتانیومی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد از طریق ۴ پاس مشخص است. مشاهدات نشان می‌دهد که با استفاده از فرایند ایکپ سنتی برای رسیدن به این ساختار فوق‌ریزدانه نیاز به اجرای این فرایند از طریق ۸ پاس است. همچنین در پژوهشی ناکاشیما و همکاران [۲۰] به این نتیجه دست یافته‌اند که فرایند ایکپ در قالبی با زاویه ۱۳۵ درجه قادر به ایجاد ساختار فوق‌ریزدانه نیست.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷: الف) فرایند ایکپ با کانال‌های موازی (N جهت برش)، ب) نمایی از ناحیه تغییرشکل در شبیه‌سازی دو بعدی، ج)مجموعه قالب [۱۹]

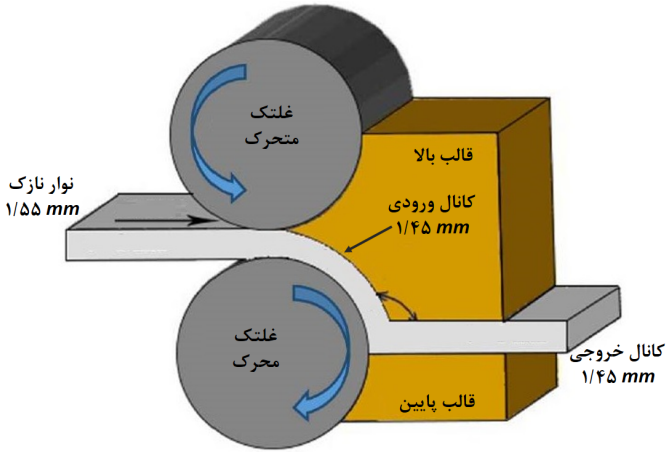
۳ تکنیک‌های فرایند ایکپ به صورت مداوم

۱.۳ C2S2، ECAD و Conshearing

فرایند ایکپ به طور قابل توجهی در تولید مواد ریزساختار که کاربردهای مهمی در صنعت دارند استفاده می‌شود. با این حال، فرایند پر زحمتی است، زیرا در آن نیاز به گذاشتن و برداشتن نمونه از داخل قالب وجود دارد. برخی اقدامات اولیه برای توسعه فرایند ایکپ مداوم در تولید نوار فلزی بلند انجام گرفته است.

اولین اقدام مربوط به استفاده از ترکیب تجهیزات نورد با فرایند ایکپ می‌باشد. این تکنیک در روش‌های مختلفی طراحی و ارائه شده است. روش‌هایی از قبیل برش موضعی متوالی (C2S2)، نورد در کانال همسان زاویه‌دار[1] و فشردن در کانال غیرهمسان زاویه‌دار[2] که این تکنیک در شکل ۸ نمایش داده شده است [۲۱].

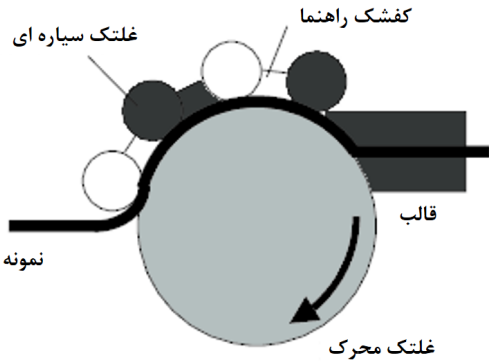
در این تکنیک ماده به شکل نوار فلزی نازک با ضخامت ۱/۵۵ میلی‌متر بین دو غلتک کشیده شده و پس از خارج شدن از آن ضخامتش به ۱/۴۵ میلی‌متر کاهش می‌یابد؛ سپس نوار نازک به داخل کانال خروجی که ضخامت اولیه‌ی ورق را به آن باز می‌گرداند جریان می‌یابد.



شکل ۸: تکنیک DCAP به منظور تولید مداوم [۲۱]

دومین اقدام که به عنوان یک پتانسیل برای استفاده در مورد نمونه‌های میله‌ایی مطرح شده است، تکنیک کشش در کانال همسان زاویه‌دار (ECAD) است. آزمایش‌ها تجربی نشان می‌دهد که این تکنیک منجر به کاهش در سطح مقطع نمونه به مقدار بیشتر از ۱۵ درصد شده و بنابراین برای اجرای فرایند در چند پاس موثر نمی‌باشد [۹].

سومین اقدام انجام شده، تغییرشکل برشی متوالی (Conshearing) است که برای نوارهای فلزی مطرح شده است. این تکنیک مداوم که در آن از ماشین نورد استفاده می‌گردد؛ در شکل ۹ نمایش داده شده است [۲۲]. در این فرایند ماده بین غلتک‌های کوچک و غلتک بزرگ که در وسط قرار دارد تغذیه شده که تمام این غلتک‌ها با سرعت دورانی یکسانی به منظور تولید نیروی بزرگ اکستروژن می‌چرخند. نوار فلزی از بین غلتک‌ها عبور کرده و بلافاصله از داخل قالب که کانالی تحت زاویه ϕ در آن تعبیه شده است، عبور می‌کند. نتایج تجربی که بر روی نوار آلومینیوم خالص تجاری انجام شده است، نشان می‌دهد که شرایط بهینه برای ایکپ وقتی است که زاویه قالب برابر ۶۵ درجه باشد [۲۲].



شکل ۹: تکنیک تغییرشکل برشی متوالی (Conshearing) [۲۲]

۲.۳ تکنیک ECAP-Conform

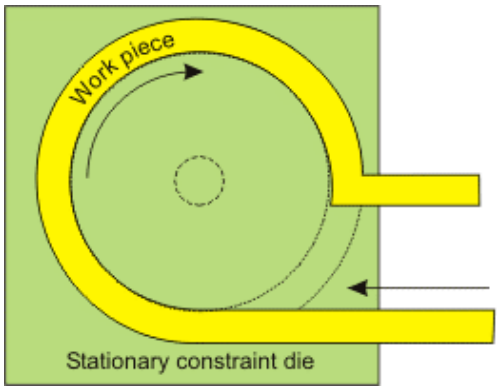
در سال ۱۹۷۴، اترینگون [۲۳] یک ایده جدیدی را برای شکل‌دهی فلزات به وسیله اکستروژن پیوسته تحت نام Conform ارائه کرد. در این فرایند قطعه به داخل شیار مستطیل شکل ایجاد شده بر روی چرخ دواری تغذیه می‌شود.

حرکت چرخ باعث می‌شود تا سه طرف شیار که در تماس با قطعه هستند نیروی محرکه اصطکاک ایجاد کند، در حالیکه شیار با یک کفشک ثابت پوشیده شده است تا محدوده‌ای را برای حرکت قطعه مشخص کند. سطح تماس بین قطعه و کفشک ثابت، باعث ایجاد یک نیروی بازدارنده خواهد شد؛ لذا سه سطح از قطعه‌کار به سمت جلو حرکت کرده و یک سطح آن به سمت عقب کشیده می‌شود. سطح مقطع خروجی قطعه معمولا به شکل شیار نمی‌باشد زیرا هدف از این فرایند تغییر هندسه قطعه یا تحکیم بخشیدن به پودرهاست که معمولا فقط در یک پاس اجرا می‌گردد. در نتیجه یک روزنه که شکل نهایی محصول در آن طراحی شده است بر سر راه حرکت قطعه وجود خواهد داشت تا شکل نهایی را ایجاد کند. این تغییرشکل در قطعه مشابه با فرایند اکستروژن سنتی خواهد بود (شکل ۱۱).

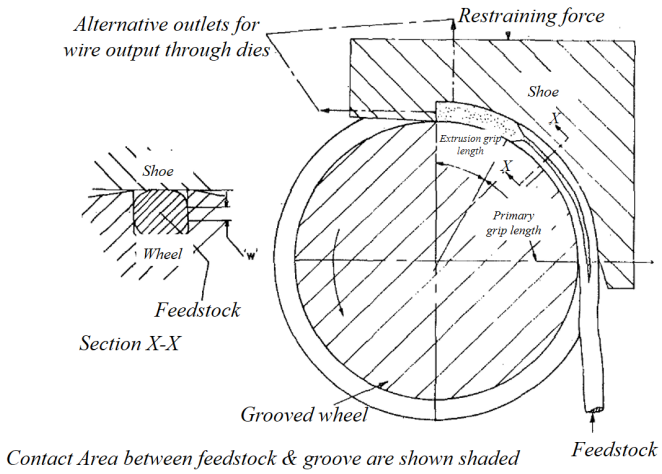
تکنیک ایکپ در شکل معمول خود تنها نمونه‌های کوتاه ایجاد خواهد کرد، در حالیکه فرایند Conform یک روش قابل استفاده برای تغییرشکل مداوم فلزات در اشکال مختلف می‌باشد.

با ترکیب این دو تکنیک، نمونه‌هایی طویل‌تر با ساختار فوق‌ریزدانه و مستحکم‌تر تولید خواهد شد. تکنیک ECAP-Conform ترکیبی از فرایند کانفرم و تکنیک ایکپ است که در آن یک نوار یا میله فلزی به درون قالب ایکپ به وسیله نیروی اصطکاک به طور پیوسته وارد می‌شود. در این تکنیک کفشک علاوه بر محدود کردن محفظه حرکت قطعه‌کار، نیروی لازم برای پیچش تحت یک زاویه توسط برش؛ همانند فرایند ایکپ معمولی را ایجاد می‌کند. نمونه‌هایی با سطح مقطع متفاوت مثل نوار فلزی، شمش، میله و سیم می‌تواند تحت تکنیک ایکپ–کانفرم قرار گیرند. شکل ۱۰ شماتیک این تکنیک را نشان می‌دهد.

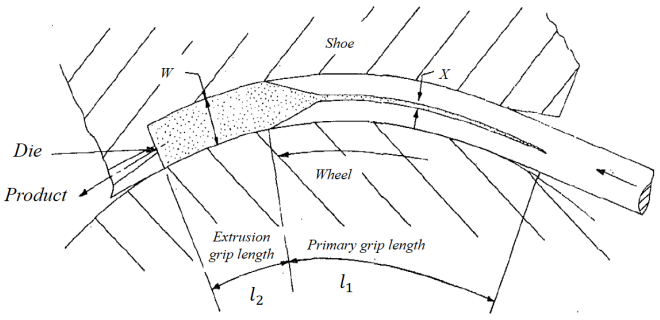
[1]Equal Channel Angular Rolling (ECAR) [2]Dissimilar-Channel Angular Pressing (DCAP)



شکل ۱۰: تکنیک ایکپ_کانفرم [۶]



(الف)



(ب)

شکل ۱۱: الف) شماتیک فرایند اکستروژن مداوم، ب) جزئیات شکل در دهانه قالب [۲۳]

پیشتر نیز بیان شده که قالب ایکپ شامل دو زاویه موثر است: (۱) زاویه کانال قالب (ϕ) که معمولا محدوده‌ای بین ۹۰ تا ۱۵۰ درجه دارد و (۲) زاویه گوشه خارجی قالب (Ψ) که مربوط به انحنای موجود در گوشه خارجی برخورد کانال‌ها در قالب است و محدود آن بین ۰ تا ۹۰ درجه است. تجربیات نشان می‌دهد که حداکثر کرنش موثر زمانیکه زوایای ϕ و Ψ به ترتیب ۹۰ و صفر باشند؛ حاصل خواهد شد. اگرچه مقدار کوچک زاویه قالب، نیروی گشتاور مورد نیاز را افزایش داده و نوار یا میله فلزی در تقاطع قالب ایکپ به سختی کشیده می‌شود که این کار برای فرایند مضر است [۲۴]. تفاوت‌هایی بین تکنیک ایکپ_کانفرم و فرایند کانفرم وجود دارد:

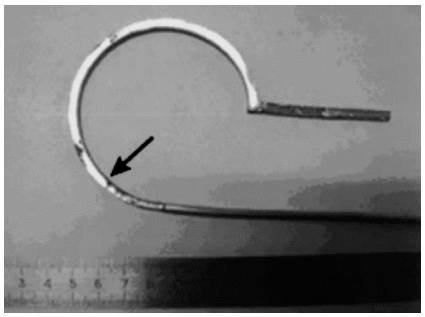
۱. تفاوت اولیه در ماهیت کرنش در محل تقاطع شیار و کانال موجود در قالب می‌باشد. در تکنیک ایکپ_کانفرم قطعه‌کار تحت کرنش برشی خالص قرار داشته که مشابه تکنیک ایکپ معمولی است. در حالیکه فرایند کانفرم، قطعه‌کار را تحت کرنش پیچیده‌ای قرار خواهد داد [۲۵].
۲. کرنش موثر حاصل از اجرای یک پاس تکنیک ایکپ_کانفرم بسیار بیشتر از کرنش موثر حاصل از اجرای یک پاس فرایند کانفرم است.
۳. تکنیک ایکپ_کانفرم شکل و اندازه قطعه‌کار را تنها در پاس اول تغییر داده که این امر باعث می‌شود تا بتوان از آن برای ایجاد ساختار فوق‌ریزدانه در تعداد پاس‌های بیشتر استفاده کرد، این در حالی است که فرایند کانفرم شکل و یا اندازه سطح مقطع قطعه‌کار را تغییر داده و به عنوان یک راه برای تولید یک محصول جدید با شکل و اندازه جدید شناخته می‌گردد.
۴. فرایند کانفرم یک فرایند اکستروژن مداوم است و معمولا یک ناحیه مرده یا غیرفعال (که ماده در داخل آن به دام افتاده و حرکت نمی‌کند) در آن وجود دارد. از طرفی ناحیه‌ایی به عنوان ناحیه مرده در تکنیک ایکپ_کانفرم وجود ندارد.

لازم به ذکر است که در تکنیک ایکپ_کانفرم با تکنیک ایکپ معمولی نیز تفاوت‌هایی علاوه بر ماهیت مداوم بودن آن که تفاوت اصلی آنها به شمار می‌آید، وجود دارد. در تکنیک ایکپ_کانفرم قطعه‌کار قبل از ورود به ناحیه تغییرشکل در قالب؛ خم می‌شود. اگر سطح مقطع قطعه‌کار متفاوت با سطح مقطع شیار باشد، این تکنیک در قطعه‌کار تغییر شکل پلاستیک ایجاد کرده و سطح مقطع آن را مطابق با شکل سطح مقطع شیار تبدیل خواهد کرد. توجه به این نکته دارای اهمیت است که در عمل در تکنیک ایکپ، برای خروج هر نمونه از قالب نیاز به فشردن نمونه دیگری در قالب است. بنابراین نمونه نهایی توسط یک نمونه زائد که در داخل قالب باقی می‌ماند از قالب خارج خواهد شد.

۴ ساختار فوق‌ریزدانه در تکنیک ایکپ_کانفرم

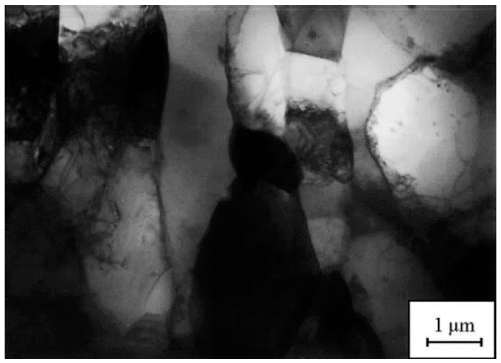
همانطورکه ذکر شد ترکیب تکنیک فشردن در کانال همسان زاویه‌دار (ایکپ) و فرایند کانفرم یک راه حل برای تولید مداوم مواد ریزساختار است. نتایج مربوط به پژوهشی که از تکنیک ایکپ_کانفرم استفاده شده است؛ نشان می‌دهد که این تکنیک قادر به اصلاح دانه‌بندی آلومینیوم خالص تجاری به اندازه دانه ۶۵۰ نانومتر است [۶]. متعاقبا این روش برای تیتانیوم خالص اجرا گردید و نتیجه آن دستیابی به اندازه دانه ۲۰۰ تا ۳۰۰ نانومتر است [۲۶]. والیف از این تکنیک برای رسیدن به ساختار فوق‌ریزدانه از یک سیم آلومینیومی خالص تجاری (۹۹/۹۵٪) درشت دانه به قطر ۳/۴ میلی‌متر و طول ۱ متر در دمای اتاق برای اجرا در یک تا چهار پاس، در قالبی با زاویه ۹۰ درجه استفاده کرده است. نمونه بین هر پاس ۱۸۰ درجه چرخانده می‌شود. سطح مقطع دایره‌ای قطعه‌کار به قطر ۳/۴ میلی‌متر بعد از اولین پاس به مستطیلی به ابعاد ۳/۸۶ × ۲/۷۸ میلی‌متر تبدیل می‌گردد. در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، سطح مقطع مستطیلی سریعا بعد از داخل شدن سیم آلومینیومی به داخل شیار

شکل می‌گیرد (علامت فلش را در شکل ببینید)، که این از ویژگی‌های اصلی فرایند کانفرم می‌باشد [۲۳].

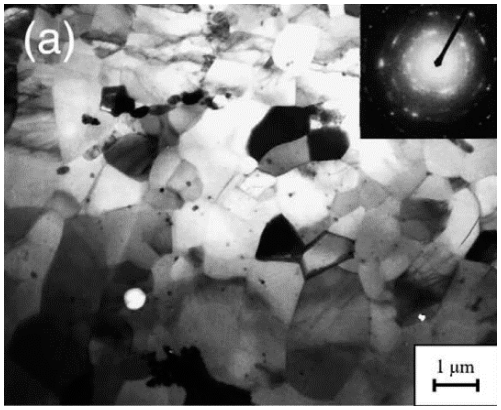


شکل ۱۲: قطعه آلومینیومی بعد از اجرای تکنیک ایکپ–کانفرم [۶]

این تغییر ایجاد شده به دلیل نیروی اصطکاک موجود بین شیار و قطعه‌کار است. بعد از تغییر سطح مقطع به شکل مستطیل، اثر نیروی اصطکاک بر واحد طول سیم به دلیل افزایش سطح تماس بین شیار و قطعه بیشتر خواهد شد. مشاهدات TEM نشان داده است که این تکنیک منجر به تکامل ریزساختار نمونه می‌شود [۶، ۱۱]. بعد از اجرای یک تا دو پاس، نابجایی‌ها و مرز دانه‌ها با زاویه کم شکل می‌گیرد (شکل ۱۳الف) و عمدتا بعد از انجام ۴ پاس ساختار فوق‌ریزدانه پدیدار می‌گردد (شکل ۱۳ب). اندازه دانه در این ساختار فوق‌ریزدانه حدود ۶۵۰ نانومتر است و خواص مکانیکی نمونه‌های آلومینیومی بعد از اجرای یک تا ۴ پاس از این فرایند در جدول ۱ آورده شده است [۲۳].



(الف)



(ب)

شکل ۱۳: الف) تصویر TEM سطح مقطع طولی سیم آلومینیومی بعد از اجرا تکنیک ایکپ–کانفرم در دو پاس، ب) ساختار فوق‌ریزدانه بعد از اجرای این تکنیک در چهار پاس [۶]

واضح است که تکنیک ایکپ–کانفرم به طور قابل توجهی استحکام تسلیم و استحکام نهایی را افزایش می‌دهد؛ در حالی‌که تغییرشکل تا شکست در محدوده ۱۲ تا ۱۴ درصد باقی می‌ماند که با افزایش تعداد پاس از یک پاس، کاهش انعطاف‌پذیری مشاهده نمی‌شود. نتایج ارائه شده با نتایج حاصل از اجرای تکنیک ایکپ معمولی بر روی آلومینیوم سازگار است [۳]. قابل توجه است که خواص مکانیکی بعد از یک پاس تغییر محسوسی نکرده است.

جدول ۱: مقادیر استحکام تسلیم، نهایی، درصد افزایش طول تا شکست و درصد کاهش سطح مقطع گلویی در نمونه‌های آلومینیومی تحت تکنیک ایکپ–کانفرم [۶]

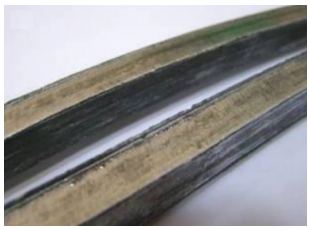
مراحل	$\sigma_{\circ}$ (MPa)	σ_u (MPa)	δ ٪	Ψ ٪
میله آلومینیومی اولیه	۴۷	۷۱	۲۸	۸۶
یک پاس	۱۳۰	۱۶۰	۱۳	۷۳
دو پاس	۱۴۰	۱۷۰	۱۲	۷۲
سه پاس	۱۳۰	۱۶۰	۱۴	۷۶
چهار پاس	۱۴۰	۱۸۰	۱۴	۷۶

در پژوهشی دیگر موراشکن و همکاران [۲۷] به بررسی پیشرفت خواص مکانیکی و هدایت الکتریکی در آلومینیوم آلیاژی ۶۱۰۱ که تحت تکنیک ایکپ–کانفرم قرار گرفته است، پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با اجرای این تکنیک با زاویه قالب ۱۳۰ درجه و انجام شش پاس بر روی نمونه می‌توان به ساختار فوق‌ریزدانه با اندازه دانه حدود ۴۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر دست پیدا کرد. در این پژوهش از یک میله آلومینیومی به طول ۱/۵ متر که در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد تحت عملیات حرارتی آنیل قرار گرفته و سپس در آب کوئینچ شده است استفاده می‌گردد؛ قطر میله برابر با ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۱۴).

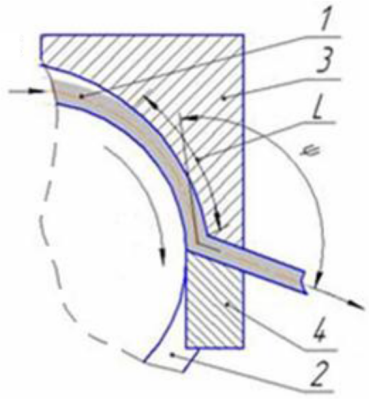
والیف و همکاران [۸] به بررسی این تکنیک با هدف بررسی دو موضوع که اطلاعاتی در مورد آن وجود نداشته است پرداخته‌اند. موضوع اول، استفاده از سختی نمونه برای ارزیابی مقدار همگنی درون ساختار بعد از اجرای تکنیک در دو راستای طولی و عرضی میله است؛ و موضوع دوم، تخمین مقدار ناهمسانگردی پلاستیک که ممکن است در میله‌ها بعد از اجرا به وجود آید. در این پژوهش از میله آلومینیومی ۶۰۶۱ به قطر ۴ میلی‌متر و طول ۲۵ سانتی‌متر در دمای اتاق استفاده شده است. این تکنیک در سرعت ثابت ۰/۲ میلی‌متر بر ثانیه تا حداکثر ۴ پاس اجرا شده است و میله‌ها حول جهت طولی خود ۹۰ درجه در بین هر پاس چرخانده شده‌اند. شکل ۱۵ نمونه‌ای از میله‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد که میله بالایی قبل از انجام آزمایش و دو میله بعدی به ترتیب تحت یک و چهار پاس قرار گرفته‌اند. ابتدای میله‌ها در سمت چپ و انتهای آنها در سمت راست تصویر قرار دارد.

توجه به این نکته دارای اهمیت است که تکنیک ایکپ–کانفرم بر روی میله‌ها تحت بهترین شرایط و بدون هیچ گونه ترک ماکروسکوپی بر روی آنها اجرا شده است. در ادامه این پژوهش دیسک‌هایی با ضخامت ۳ میلی‌متر در مکان‌های A-C که در طول میله (شکل ۱۵) قرار دارند، بریده شده است (مکان نزدیک به ابتدای میله (A) ، در مرکز طولی میله (B) و نزدیک به انتهای میله (C)). میکروسختی ویکرز بر روی تمامی سطح دیسک‌ها اندازه‌گیری

و ثبت شده است. این اندازه‌گیری با الگوی ۰٫۵ میلی‌متر فاصله بین هر اندازه‌گیری در مسیر مستقیم الخط اجرا گردیده است. برای سنجیدن مقدار ناهمسانگردی پلاستیک در جهت عمود بر محور اکستروژن، نمونه‌ها تحت تست برش ساده طبق استاندارد قرار گرفته‌اند [۸]. برای این ارزیابی از نمونه‌های برش شده در دو جهت متفاوت استفاده شده است که این جهت‌ها در شکل ۱۵ قابل مشاهده است. X جهت اکستروژن و جهت‌های Y و Z جهات عمود بر جهت اکستروژن می‌باشند.

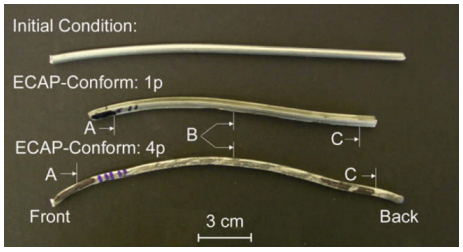


(الف)

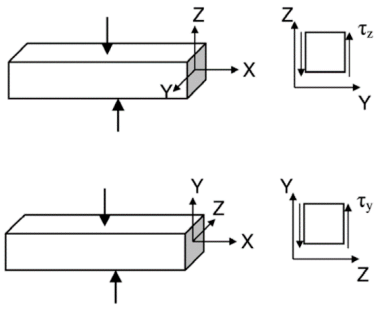


(ب)

شکل ۱۴: الف) نمونه‌های آلومینیوم ۶۱۰۱ بعد از اجرای شش پاس تکنیک ایکپ‌ـ کانفرم، ب) شماتیک این تکنیک [۲۷]



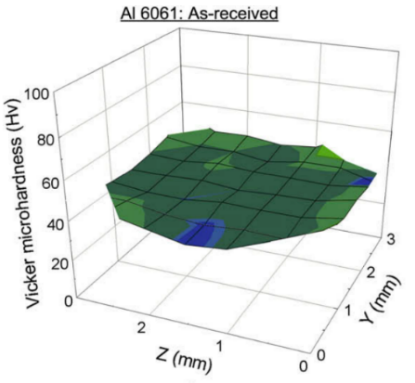
(الف)



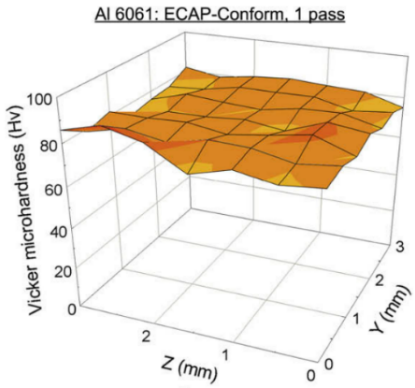
(ب)

شکل ۱۵: الف) نمونه‌هایی از آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱، قبل از اجرای فرایند (بالاترین میله)، بعد از اجرای فرایند در یک و چهار پاس، ب) شماتیک جهت‌های مورد استفاده برای تست برش: محور X در امتداد جهت اکستروژن [۸]

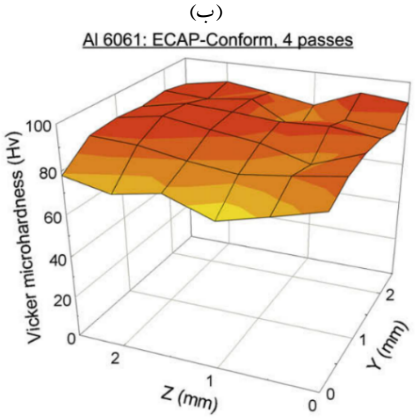
نتایج نشان می‌دهد که بعد از یک پاس، ناهمگنی صفحه‌ایی در سطوح نزدیک ابتدا و انتهای میله وجود دارد؛ در حالی‌که مقادیر سختی در ناحیه مرکزی میله‌ها همگن‌تر هستند. نتایج مربوط به اجرای این تکنیک در ۴ پاس نشان دهنده این است که توزیع سختی همگنی بیشتری دارد. همانگونه که در شکل ۱۵الف هم مشخص است، مقادیر سختی به طور همگنی در سرتاسر سطح مقطع توزیع شده است و مقدار آن به طور میانگین حدود ۴۰ ویکرز است. بعد از اجرای یک پاس این مقدار به ۲ برابر افزایش یافته که مقدار این افزایش بعد از اجرای ۴ پاس مقدار کوچکی خواهد بود. البته توزیع سختی بعد از اجرای ۴ پاس همگن‌تر به نظر می‌رسد (شکل ۱۶ج). مقادیر موجود در جدول ۲ نیز نشان دهنده این است که با افزایش تعداد پاس مقدار سختی افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۶: توزیع سه‌بعدی سختی در سطح مقطع وسط میله آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱؛ الف) قبل از اجرای تکنیک ایکپ‌ـ کانفرم، ب) بعد از اجرای یک پاس، ج) بعد از اجرای ۴ پاس از تکنیک [۸]

جدول ۲: مقدار میانگین میکرو سختی [۸]

تعداد پاس (N)	موقعیت سطح مقطع میله		
	جلو	وسط	انتها
۰		۴۳/۷ ± ۰/۶	
۱	۷۹/۳ ± ۱/۴	۸۰/۴ ± ۰/۹	۷۹/۳ ± ۰/۹
۴	۸۶/۲ ± ۱	۸۵/۵ ± ۱/۹	۸۶/۶ ± ۱/۷

پژوهش حبیبی‌پارسا و همکاران [۲۸] که به بررسی عددی و تجربی تاثیر استفاده از تکنیک ایکپ ـ کانفرم بر روی خواص مکانیکی و ساختار آلومینیوم آلیاژی ۱۱۰۰ (به قطر ۵ میلی‌متر) پرداخته‌اند؛ باز هم نشان می‌دهد که این تکنیک به طور قابل توجهی بر روی ساختار ماده اثرگذار است. موراشکین و همکاران نیز در پژوهشی به ارائه راهی برای دستیابی به ماده فوق‌ریزدانه از جنس آلیاژ Al-Mg-Zr با هدایت الکتریکی بیش از ۵۷ درصد و مقاومت حرارتی تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد پرداخته‌اند. در این پژوهش از تکنیک ایکپ ـ کانفرم به همراه کشش سرد استفاده شده است [۲۹].

۵ نتیجه‌گیری

تکنیک فشردن در کانال همسان زاویه‌دار در تولید نمونه‌های فلزی با ساختار فوق‌ریزدانه بسیار موثر است. اخیرا پیشرفت قابل توجه‌ای در اصلاح این تکنیک برای دستیابی به یک روش مداوم و موثر انجام شده است. این اصلاحات به گونه‌ایی طراحی شده‌اند که اصول و مزایای تکنیک ایکپ را با فرایندهای پیشرفته‌تری از قبیل نورد و کانفرم ادغام کرده و تکنیکی موثر ارائه دهند. خلاصه‌ای از مهمترین نتایج در ادامه بیان شده است.

۱. محدودیت طول قطعه‌کار (قطعه‌کار باید کوچکتر از مقدار بحرانی باشد تا در طی اجرای فرایند خم نشود) در میزان جابه‌جایی رم دستگاه پرس و ناپیوسته بودن فرایند ایکپ سنتی که نتیجه آن هزینه بالا و کارایی کمتر آن در تولید است، از عیوب این فرایند به شمار می‌آید.

۲. علاوه بر محدودیت‌های ذکر شده، طول قابل توجهی از دو انتهای قطعه بعد از خروج از قالب ایکپ معمولا شامل ساختار غیر یکنواخت یا ترک‌های ریز است که باید دور انداخته شود؛ در نتیجه باعث هدر رفتن بخشی از قطعه‌کار شده و در نتیجه افزایش هزینه را در پی خواهد داشت.

۳. ترکیب تکنیک فشردن در کانال همسان زاویه‌دار (ایکپ) و فرایند کانفرم یک راه حل برای تولید مداوم مواد ریزساختار است. نتایج مربوط به پژوهش‌ها نشان می‌دهد که این تکنیک قادر به اصلاح دانه‌بندی مواد در حد نانومتر است.

۴. تکنیک ایکپ ـ کانفرم با تکنیک ایکپ معمولی نیز تفاوت‌هایی علاوه بر ماهیت مداوم بودن آن که تفاوت اصلی آنها به شمار می‌آید، دارد. در تکنیک مداوم ایکپ قطعه‌کار قبل از ورود به ناحیه برش در تقاطع کانال قالب و شیار غلتک به طور پلاستیکی خم می‌شود. همچنین در صورتی که سطح مقطع قطعه‌کار متفاوت با سطح مقطع شیار باشد، این تکنیک در قطعه‌کار تغییر شکل پلاستیک ایجاد کرده و سطح مقطع آن را مطابق با شکل سطح مقطع شیار تبدیل خواهد کرد.

۵. توجه به این نکته دارای اهمیت است که در عمل در تکنیک ایکپ، برای خروج هر نمونه از قالب نیاز به فشردن نمونه دیگری در قالب است. در صورتی که با استفاده از تکنیک ایکپ به صورت مداوم این نقص نیز بر طرف خواهد شد.

مراجع

[1] Wei, Wei, Zhang, Wei, Wei, Kun Xia, Zhong, Yi, Cheng, Gang, and Hu, Jing. Finite element analysis of deformation behavior in continuous ecap process. *Materials Science and Engineering: A*, 516(1-2):111–118, 2009.

[2] Valiev, Ruslan Z, Estrin, Yuri, Horita, Zenji, Langdon, Terence G, Zechetbauer, Michael J, and Zhu, Yuntian T. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. *Jom*, 58(4):33–39, 2006.

[3] Iwahashi, Y, Horita, Z, Nemoto, M, and Langdon, TG. An investigation of microstructural evolution during equal-channel angular pressing. *Acta materialia*, 45(11):4733–4741, 1997.

[4] Segal, VM, Reznikov, VI, Dobryshevshiy, AE, and Kopylov, VI. Plastic working of metals by simple shear. *Russian Metallurgy (Metally)*, (1):99–105, 1981.

[5] Nakashima, Kiyotaka, Horita, Zenji, Nemoto, Minoru, and Langdon, Terence G. Development of a multi-pass facility for equal-channel angular pressing to high total strains. *Materials Science and Engineering: A*, 281(1-2):82–87, 2000.

[6] Raab, Georgy J, Valiev, Ruslan Z, Lowe, Terry C, and Zhu, Yuntian T. Continuous processing of ultrafine grained al by ecap–conform. *Materials Science and Engineering: A*, 382(1-2):30–34, 2004.

[7] Prell, Michaela, Xu, Cheng, and Langdon, Terence G. The evolution of homogeneity on longitudinal sections during processing by ecap. *Materials Science and Engineering: A*, 480(1-2):449–455, 2008.

[8] Xu, Cheng, Schroeder, Steven, Berbon, Patrick B, and Langdon, Terence G. Principles of ecap–conform as a continuous process for achieving grain refinement: Application to an aluminum alloy. *Acta Materialia*, 58(4):1379–1386, 2010.

[9] Alkorta, Jon, Rombouts, Marleen, De Messemaeker, Joke, Froyen, Ludo, and Sevillano, Javier Gil. On the impossibility of multi-pass equal-channel angular drawing. *Scripta materialia*, 47(1):13–18, 2002.

[10] Saito, Y. Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (arb) process. *Scripta Mater.*, 39(9):1221–1227, 1998.

[11] Huang, JY, Zhu, YT, Jiang, H, and Lowe, TC. Microstructures and dislocation configurations in nanostructured cu processed by repetitive corrugation and straightening. *Acta Materialia*, 49(9):1497–1505, 2001.

[12] Segal, Vladimir M. Engineering and commercialization of equal channel angular extrusion (ecae). *Materials Science and Engineering: A*, 386(1-2):269–276, 2004.

[13] Nishida, Yoshinori, Arima, Hiroaki, Kim, Jin-Chun, and Ando, Teiichi. Rotary-die equal-channel angular pressing of an al–7 mass% si–0.35 mass% mg alloy. *Scripta Materialia*, 45(3):261–266, 2001.

[14] Ma, Aibin, Suzuki, Kazutaka, Nishida, Yoshinori, Saito, Naobumi, Shigematsu, Ichinori, Takagi, Makoto, Iwata, Hiroyuki, Watazu, Akira, and Imura, Toru. Impact toughness of an ultrafine-grained al–11mass% si alloy processed by rotary-die equal-channel angular pressing. *Acta Materialia*, 53(1):211–220, 2005.

[15] Ma, Aibin, Suzuki, Kazutaka, Saito, Naobumi, Nishida, Yoshinori, Takagi, Makoto, Shigematsu, Ichinori, and Iwata, Hiroyuki. Impact toughness of an ingot hypereutectic al–23 mass% si alloy improved by rotary-die equal-channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 399(1-2):181–189, 2005.

[16] Ma, Aibin, Nishida, Yoshinori, Suzuki, Kazutaka, Shigematsu, Ichinori, and Saito, Naobumi. Characteristics of plastic deformation by rotary-die equal-channel angular pressing. *Scripta Materialia*, 52(6):433–437, 2005.

[17] Pourbashiri, Mojtaba, Sedighi, Mohammad, Poletti, Cecilia, and Sommitsch, Christof. Enhancing mechanical properties of wires by a novel continuous severe plastic deformation method. *International Journal of Materials Research*, 108(9):741–749, 2017.

[18] Azushima, Akira and Aoki, Koshiro. Properties of ultrafine-grained steel by repeated shear deformation of side extrusion process. *Materials Science and Engineering: A*, 337(1-2):45–49, 2002.

[19] Raab, GI. Plastic flow at equal channel angular processing in parallel channels. *Materials Science and Engineering: A*, 410:230–233, 2005.

[20] Nakashima, Kiyotaka, Horita, Zenji, Nemoto, Minoru, and Langdon, Terence G. Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal-channel angular pressing. *Acta materialia*, 46(5):1589–1599, 1998.

[21] Lee, Jae-Chul, Shu, Jin-Yoo, and Ahn, Jae Pyung. Work-softening behavior of the ultrafine-grained al alloy processed by high-strain-rate, dissimilar-channel angular pressing. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 34(3):625–632, 2003.

[22] Utsunomiya, H, Hatsuda, K, Sakai, T, and Saito, Y. Continuous grain refinement of aluminum strip by conshearing. *Materials Science and Engineering: A*, 372(1-2):199–206, 2004.

[23] Etherington, C. Conform—a new concept for the continuous extrusion forming of metals. *Journal of Engineering for Industry*, 96(3):893–900, 1974.

[24] Xu, Shubo, Zhao, Guoqun, Ren, Xufang, and Guan, Yanjin. Numerical investigation of aluminum deformation behavior in three-dimensional continuous confined strip shearing process. *Materials Science and Engineering: A*, 476(1-2):281–289, 2008.

[25] Cho, JR and Jeong, HS. Parametric investigation on the curling phenomenon in conform process by three-dimensional finite element analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 110(1):53–60, 2001.

[26] Raab, Georgy I, Valiev, Ruslan, Gunderov, Dmitriy, Lowe, Terry C, Misra, Amit, and Zhu, Yun Tian. Long-length ultrafine-grained titanium rods produced by ecap-conform. in *Materials Science Forum*, vol. 584, pp. 80–85. Trans Tech Publ, 2008.

[27] Murashkin, Maxim, Medvedev, Andrey, Kazykhanov, Vil, Krokhin, Alexander, Raab, Georgy, Enikeev, Nariman, and Valiev, Ruslan Z. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained al 6101 alloy processed via ecap-conform. *Metals*, 5(4):2148–2164, 2015.

[28] Ayati, Vahid, Parsa, Mohammad Habibi, and Mirzadeh, Hamed. Deformation of pure aluminum along the groove path of ecap-conform process. *Advanced Engineering Materials*, 18(2):319–323, 2016.

[29] Murashkin, M Yu, Medvedev, AE, Kazykhanov, VU, Raab, GI, Ovid'ko, IA, and Valiev, RZ. Microstructure, strength, electrical conductivity and heat resistance of an al-mg-zr alloy after ecap-conform and cold drawing. *Reviews on Advanced Materials Science*, 47, 2016.