سال ۲۹، شماره ۱۳۲، صفحات ۳۴–۴۶، نوع مقاله: ترویجی

مجله علمی مهندسی مکانیک

ISSN: 1605-9719

مروری بر فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی

حسین یوسفی[۱]، مهدی دیانتی[۱]، امید کهن ترابی[۲]، پرویز اسدی[۳ و *]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، مؤسسه آموزش عالی پارسیان، قزوین، ایران

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

[۳] استادیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

*مسئول مکاتبات: asadi@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی روشی است که هم برای بازیافت براده‌های ضایعاتی و هم برای شکل‌دهی مواد اولیه مانند یک شفت و تبدیل آن به محصول جدید مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرایند بطور معمول متشکل از یک قالب با سنبه دورانی و ماتریس ثابت است. ابتدا براده‌های فشرده شده یا ماده بالک اولیه در محفظه ماتریس قرار می‌گیرد. سپس با پیشروی سنبه چرخان با یک نیروی پیوسته‌ی محوری و در اثر تماس سنبه با مواد تحت فرایند، حرارت اصطکاکی بالایی در منطقه عملیات ایجاد می‌شود که موجب خمیری شدن و چسبیدن براده‌ها بهم می‌شود. با ادامه پیشروی سنبه مواد خمیری شده تغییر شکل داده می‌شوند و از حفره داخل سنبه و یا فضای بین سنبه و ماتریس عبور داده می‌شوند که نتیجه آن تولید قطعه مورد هدف است که می‌تواند سیم یا لوله باشد. این روش می‌تواند برای بازیافت ضایعات ماشین‌کاری، تقویت محصولات متالورژی پودر، تولید مواد خام سیمی، تولید ساختارهایی با دانه‌بندی بسیار ریز و حتی نانو در مواد حجمی و توسعه آلیاژها و مواد کامپوزیتی جدید استفاده شود. مواد تولیدشده با این روش از لحاظ ریزساختاری، دانه‌های ریز و اصلاح شده دارند که روی خواص مکانیکی و متالورژیکی اثرات بسیار مفیدی ایجاد می‌کند. در این مقاله مروری، مجموعه‌ای از کارهای تجربی گردآوری شده است که برای بررسی خواص ریزساختاری و مکانیکی نمونه‌های تولیدشده به روش اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی انجام گرفته‌اند.

واژگان کلیدی

اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی
شکل‌دهی
بازیافت
تبلور مجدد
ریز ساختار
خواص مکانیکی

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۵/۱۰
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

۱ مقدمه

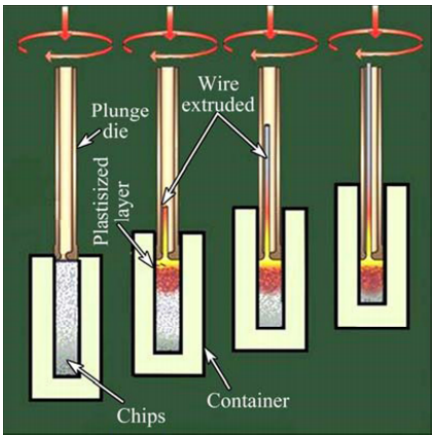
اکستروژن یکی از روش‌های حجمی، برای تغییر شکل مواد به منظور کاهش ضخامت یا سطح مقطع آن‌ها است که در نتیجه آن، قطعاتی با سطح مقطع صاف و عمودی تولید می‌شوند. جهت انجام فرایند اکستروژن، ماده اولیه موردنظر، به درون قالب اکستروژن که سطح مقطع موردنظر روی آن ایجاد شده است، فشرده می‌شود و در نتیجه، قطعه اکسترود شده با سطح مقطع قالب، تولید می‌شود. دو مزیت این فرایند، نسبت به دیگر روش‌های شکل‌دهی، قابلیت بالا در تولید قطعاتی با سطح مقطع پیچیده و همچنین شکل‌دهی مواد ترد و شکننده است، زیرا ماده در این روش، تنها تحت فشار و تنش برشی قرار می‌گیرد. این روش همچنین قطعاتی، با سطح مقطع بسیار باکیفیت و صاف ایجاد می‌کند و باعث استحکام بیشتر مواد می‌شود.

به‌طور کلی بازیافت صرفه جویی قابل توجهی در هزینه‌ها نسبت به تولید جدید می‌کند، حتی زمانی که هزینه جمع‌آوری، تفکیک و بازیافت در نظر گرفته شود. در بلند مدت، پس‌انداز ملی با کاهش در هزینه‌های مرتبط با محل‌های دفن زباله، معادن، فلزات و حمل و نقل بین‌المللی افزایش پیدا می‌کند. به همین منظور امروزه یکی از روش‌هایی که می‌تواند ضایعات حاصل از ماشین‌کاری قطعات را بازیافت نموده و قطعه‌ای جدید به همراه خواص بهبود یافته ایجاد کند روش اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی است.

این روش به صورت یک فرایند نوین جهت تولید سیم و لوله از براده‌ها و مواد حجیم[1] معرفی شده است. اساس کار این فرایند شبیه اکستروژن معکوس است که جهت سهولت ایجاد سیلان فلزی از حرارت حاصل از اصطکاک استفاده می‌شود. ایده اصلی این روش از فرایند جوش اصطکاکی ریشه گرفته است. در مسیر گسترش این روش جوشکاری حالت جامد، فرایندهای اصطکاکی دیگری توسعه یافته‌اند [۱]. از این روش‌ها در کاربردهایی مانند بهبود خواص مکانیکی [۲]، عملیات حرارتی [۳]، ساخت کامپوزیت‌های سطحی [۴–۷]، حذف عیوب موجود در ریزساختار آلیاژها [۸]، آلیاژسازی مکانیکی [۹] و همگن کردن ساختار نانوکامپوزیت‌ها استفاده شده است [۱۰، ۱۱]. فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی، فرایندی نوین جهت بازیافت مواد فلزی است که توانایی تولید مواد نانو مهندسی با خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب را داراست. نوآوری این روش، استفاده از حرارت اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیک شدید برای سیلان مواد، آلیاژسازی مکانیکی و در نهایت تبدیل پودر و براده به قطعات قابل استفاده است. در شکل ۱ فرایند کلی اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی ملاحظه می‌شود که شکل سمت چپ براده به طور خام قرار گرفته و هر چه به سمت راست می‌رویم براده‌ها به دلیل گرما و حرارت ناشی از فرایند، خمیری و از محفظه داخلی سنبه به خارج هدایت می‌شوند و تولید سیم یا لوله رخ می‌دهد [۲].

[1] bulk material

در این مقاله سعی شده است به مطالب گوناگون در زمینه تولید محصول به روش اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شود. تلاش شده است این مقاله بر اساس (۱) تولید سیم یا لوله به عنوان دو محصول متفاوت فرایند اصطکاکی اغتشاشی (به لحاظ شکل قالب و...)، (۲) اثر پارامترهای مختلف فرایندی از قبیل سرعت دورانی، پیشروی و هندسه و جنس قالب و (۳) بر ریزساختار و اندازه دانه؛ حرارت ورودی؛ صافی و زبری سطح؛ سختی؛ استحکام و سایر خواص گزارش شده در مراجع تقسیم‌بندی شود.



شکل ۱: شماتیک فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی [۲].

۲ فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی جهت تولید سیم

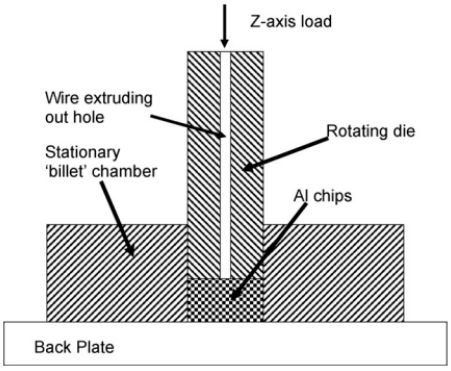
اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی را می‌توان از جهات مختلف تقسیم بندی کرد. به طور مثال از جهت نوع تولید قطعه مثلاً تولید سیم و لوله، نوع بازیافت و حتی می‌توان گفت فرایند تغییر شکل شدید برای بهبود خواص مکانیکی و ریز دانه کردن و تولید کامپوزیتها است. در این مقاله جنس‌های مختلف از سیم‌های تولید شده توسط روش اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی بررسی گردیده است.

در فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی که شماتیک آن در شکل ۲ قابل مشاهده است جهت تولید سیم، سنبه دارای سوراخ بوده و با لقی کمی نسبت به ماتریس با سرعت دورانی خاص وارد ماتریس می‌شود بر اثر چرخش سنبه و برخورد آن با مواد داخل ماتریس اصطکاک زیادی ایجاد شده و گرمای حاصل از آن باعث خمیری شدن مواد و ترکیب حرکتهای دورانی و پیشروی اغتشاش در مواد تحت فرایند را موجب می‌شود. در نهایت مواد اغتشاش یافته تحت فشار سنبه قرار گرفته و ضمن چسبیدن به یکدیگر و تشکیل ماده خمیری یکنواخت از سوراخ تعبیه شده در داخل سنبه عبور کرده و از انتهای سنبه خارج می‌شوند و منجر به تولید سیم می‌گردند (شکل ۲).

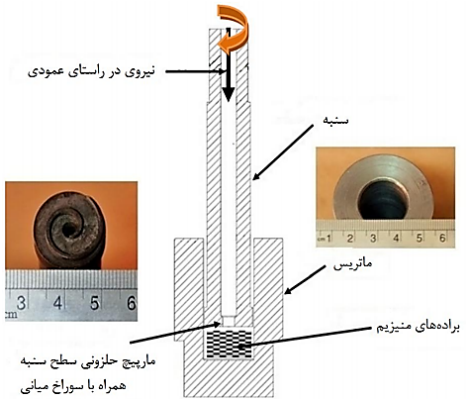
۱.۲ تولید سیم از جنس منیزیم

دلیل استفاده بسیار زیاد از فلز منیزیم استحکام قابل قبول، چگالی پایین، خواص مکانیکی مناسب، ماشین‌کاری خوب و شکل‌پذیری سرد و رسانش حرارتی مناسب آن است. به دلیل ماشین‌کاری عالی منیزیم حجم براده‌های تولیدی آن در صنعت قابل توجه است و نیاز به بازیافت دارد. منیزیم و آلیاژهای آن در صنایع خودروسازی، هوافضا و اجزای سازنده به علت قدرت ویژه آن‌ها، تراکم کم، سختی خاص، قالب‌گیری سرد به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۳]، محققان زیادی بر روی تولید سیم از جنس منیزیم کار کرده‌اند، بوفا از فرایند اکستروژن اصطکاکی در جهت ساخت سیم از براده‌های منیزیم AZ31 استفاده کرد آنها علاوه بر بررسی تأثیر پارامترهای فرایند اثر نسبت اکستروژن، نیز در دو حالت با توجه به قطر روزنه قالب پرداختند [۱۴] و همچنین شریف زاده و همکارانش میکروسختی و خواص خوردگی سیم منیزیمی تولید با این روش را بررسی کردند [۱۵].

انصاری و همکارانش [۱۶] در یک پژوهش برای بازیافت براده‌های منیزیم از روش اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی استفاده کردند. در روش آنها قالب ثابت یا ماتریس بر روی میز دستگاه توسط گیره ثابت شده است و سنبه دورانی که دارای سر پیچی شکل (برای هدایت حالت نیمه جامد منیزیم در فرایند اکستروژن) بوده و حرکت قائم به سمت پایین انجام می‌دهد. و هر دو بخش قالب از فولاد گرمکار H13 ساخته شده‌اند. قطر ماتریس ۲۱ میلیمتر و قطر سنبه ۲۰ میلیمتر است. سر پیچی شکل سنبه شبیه به طراحی ابزارهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بوده که دارای سوراخ میانی با قطر ۵ میلیمتر در طول قالب است (شکل ۳). سنبه با سرعت چرخشی زیاد وارد ماتریس شده و براده‌های منیزیم به دلیل گرمای ایجاد شده در ماتریس خمیری می‌شوند و از مارپیچ حلزونی تعبیه شده بر روی سنبه عبور کرده و وارد محفظه می‌شوند و در نهایت از انتهای آن خارج و سیم منیزیم تولید می‌شود.



شکل ۲: شماتیک فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی جهت تولید سیم [۱۲].



شکل ۳: هندسه قالب جهت انجام فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی در تولید سیم منیزیم از براده‌های آن [۱۶].

۱.۱.۲ اثر سرعت دورانی

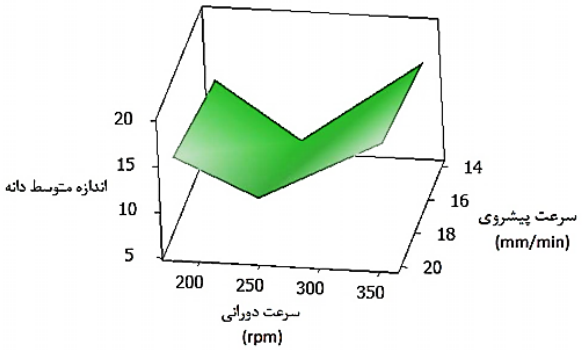
سرعت دورانی به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای فرایندی در این روش مطرح است و اثرات قابل توجهی بر موفقیت‌آمیز بودن فرایند و نیز خواص ریزساختاری و مکانیکی محصول تولید شده دارد. در ادامه اثر این پارامتر بر خواص ریزساختاری و مکانیکی سیم‌های حاصل از فرایند مورد بررسی قرار گرفته است.

۱.۱.۱.۲ اثر سرعت دورانی بر ریزساختار

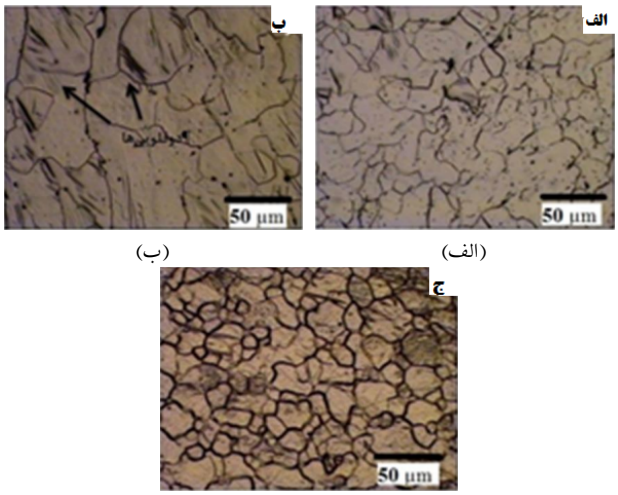
انصاری و همکارانش [۱۶] با تولید سیم منیزیم از براده‌های آن گزارش کردند که با افزایش سرعت دورانی از ۱۸۰ دور بر دقیقه به ۲۵۰ دور بر دقیقه دانه‌های تشکیل شده ریزتر می‌گردد که دلیل آن افزایش تغییر شکل مواد است که همراه با افزایش مکان‌های جوانه‌زنی است. افزایش مکان‌های جوانه‌زنی ناشی از تغییر شکل شدید ماده است که موجب انتقال انرژی بیشتر به براده‌ها می‌گردد. هر چه مکان‌های جوانه‌زنی افزایش یابد بزرگ‌تر شدن دانه‌ها محدود شده و موجب بهبود خواص می‌شود. با افزایش مجدد سرعت دورانی از ۲۵۰ به ۳۵۵ دور بر دقیقه، انرژی حرارتی ناشی از اصطکاک زیاد شده که موجب افزایش مجدد اندازه متوسط دانه‌ها گردیده است. در شکل ۴ نمودار سه‌بعدی اندازه متوسط دانه نشان داده شده است که در آن با افزایش سرعت دورانی اندازه متوسط دانه ابتدا کاهش و سپس افزایش پیدا کرده است. همچنین در شکل ۵ سرعت پیشروی ثابت در نظر گرفته شده اما سرعت دورانی متغیر است که اندازه متوسط دانه در سرعت ۳۵۵ دور در دقیقه بیشتر از سایر سرعت‌های دورانی مشاهده گردیده است.

۲.۱.۱.۲ اثر سرعت دورانی بر صافی سطح

یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت سیم تولید شده به این روش، سرعت دورانی است. سرعت دوران پایین منجر به تولید حرارت نامناسب در طول فرایند می‌شود که احتمال نقص اکستروژن را افزایش می‌دهد. نتایج کار شریف‌زاده و همکاران [۱۵] در شکل ۶ آمده است که در سرعت دورانی ۱۸۰ دور بر دقیقه سطح ناصاف و پارگی در سطح سیم مشاهده شده اما با افزایش سرعت به ۲۵۰ و ۳۵۵ دور بر دقیقه کیفیت سطح بهتری به دست آمده است. همچنین آن‌ها دریافتند که زبری سطح در سرعت ۳۵۵ پایین‌تر است.



شکل ۴: نمودار سه‌بعدی اندازه متوسط دانه بر حسب سرعت دورانی و سرعت پیشروی [۱۶].



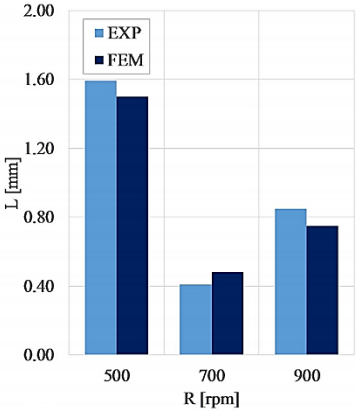
(الف) (ب)

(ج)

شکل ۵: ریزساختار نمونه تولیدشده با سرعت پیشروی ۲۰ (الف) سرعت دورانی ۱۸۰ (ب) سرعت دورانی ۳۵۵ و (ج) سرعت دورانی ۲۵۰ [۱۶].

شکل ۶: کیفیت سطح سیم منیزیم در سرعت‌های دورانی مختلف [۱۵].

داریو بفاری و همکاران [۱۷] در آزمایشات خود به این نتیجه رسیدند که بهترین سطح پرداخت شده برای سرعت دورانی ۷۰۰ دور بر دقیقه به همراه نیروی اعمالی ۱۴ کیلو نیوتن در قطر سیم ۵ میلی‌متر است. نتایج مشاهدات و آزمایش آن‌ها در شکل ۷ آمده است، به نظر می‌رسد برای دستیابی به زبری سطح قابل قبول و بهبود صافی سطح نیاز به یک سرعت دروانی بهینه است که معمولا برای هر هندسه محصولی به تجربه قابل حصول است. نتایج آقای بفاری و همکارانش نشان می‌دهد سرعت ۵۰۰ دور دقیقه حرارت لازم جهت جریان مناسب مواد را ایجاد نکرده و سطح ناصافی تولید شده است. با افزایش سرعت دورانی جریان ماده حالت مناسبی پیدا کرده و سطح صافی تولید می‌گردد. با افزایش بیش از حد حرارت در اثر افزایش بیش از حد سرعت دورانی، مواد جریان پیوسته و همگن کمتری داشته و مجدد صافی سطح کاهش می‌یابد.



شکل ۷: نمودار زبری سطح در سرعت‌های دورانی مختلف در نیروی ثابت ۱۴ کیلونیوتن [۱۷].

۳.۱.۱.۲ اثر سرعت دورانی بر سختی

سرعت دورانی یکی از پارامترهایی است که تأثیر مستقیمی بر اندازه سختی دارد. مقدار متوسط سختی ماده پایه استفاده‌شده در کار شریف‌زاده و همکاران [۱۵] تقریباً ۲۵ HV است، ماده‌ای که دارای دانه‌های ریزتر است سخت‌تر از ماده‌ای است که دانه‌های درشت‌تری[۲] دارد. منحنی تغییرات ریزسختی ویکرز در مقطع سیم‌های تولید شده با روش اکستروژن در شکل ۸ نشان داده شده است. آن‌ها مشاهده کردند که مقدار سختی در طول قطر تمامی سیم‌های تولیدشده بالاتر از ماده پایه است. ضمن آنکه سختی نمونه تولیدشده در سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه به دلیل اندازه دانه کوچک‌تر در ریزساختار بیشتر از سایر نمونه‌هاست.

۴.۱.۱.۲ اثر سرعت دورانی بر استحکام

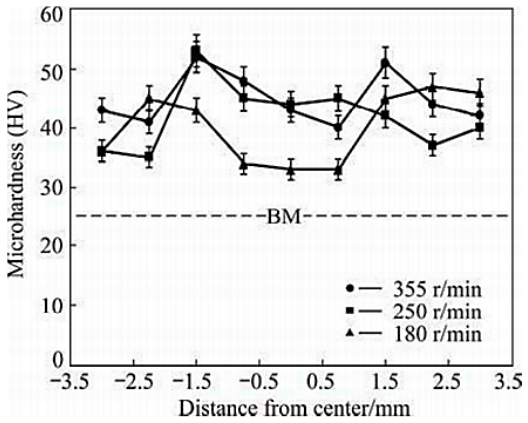
استحکام کششی و مقاومت کششی نهایی از جمله پارامترهای مهم برای ارزیابی خواص مکانیکی هستند. سه تست کششی بر روی هر نمونه توسط رضا عبدی و همکاران [۱۴] برای تایید تکرارپذیری انجام گردیده است. شکل ۹ نتایج آزمایش‌های کششی سیم های اکسترود شده را از آزمایشات با سرعت چرخشی ۲۵۰ و ۳۵۵ دور در دقیقه نشان می دهد. قابل توجه است که استحکام تمام سیم‌های اکسترود شده بیش از استحکام شمش منیزیم است. نمونه‌هایی که در سرعت چرخشی ۲۵۰ rpm تولید می شوند، خواص مکانیکی افزایش یافته را در هر دو حالت کشش و مقاومت مکانیکی نشان می‌دهند که عمدتاً به دلیل ساختار دانه‌های پالایش‌شده آن‌ها نسبت به نمونه‌های دیگر است. عبدی و همکارانش [۱۴] به این نتیجه رسیدند که در مقایسه با خواص مکانیکی شمش منیزیم، مقاومت مکانیکی سیم تولیدشده توسط روش اکستروژن با شرایط آزمون F14-250 rpm افزایش ٪۱۵۰ و طول کشیدگی ٪۶۲/۵ را نشان می‌دهد. افزایش سرعت دوران از ۲۵۰ دور بر دقیقه تا ۳۵۵ دور بر دقیقه منجر به بهبودی کمتر در قدرت و کشیدگی شده است که به علت تولید گرما و ایجاد دانه‌های بزرگ‌تر است.

۲.۲ اثر سرعت پیشروی

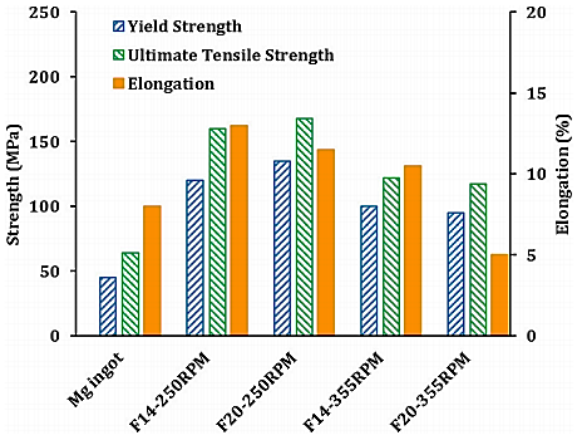
سرعت پیشروی نیز همانند سرعت دورانی یکی از مهمترین پارامترهایی است که بر فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی تأثیر مستقیم خواهد داشت. توضیح اینکه سرعت دورانی برای سنبه و سرعت پیشروی برای ماتریس در نظر گرفته می‌شود. در اینجا اثر سرعت پیشروی بر پارامترهایی مانند دمای قالب، اندازه دانه، استحکام و سختی بررسی گردیده است.

۱.۰.۲.۲ اثر سرعت پیشروی بر دمای قالب

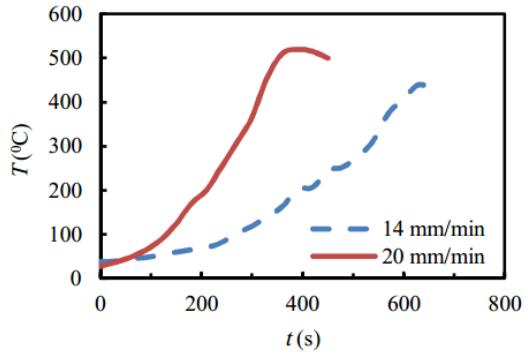
سرعت پیشروی ماتریس تأثیر مستقیم بر میزان گرمای تولیدی درون قالب خواهد داشت. انصاری و همکارانش [۱۶] با توجه به نمودار شکل ۱۰ به این نتیجه رسیدند که، نمونه تولید شده با سرعت پیشروی ۲۰ میلیمتر بر دقیقه منجر به تولید حرارت بیشتر و دارای اندازه متوسط دانه بزرگتری نسبت به سرعت پیشروی ۱۴ میلیمتر بر دقیقه است، که ناشی از نرخ تغییر پلاستیک شدید در این سرعت پیشروی است. انرژی حرارتی تولید شده در فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی از تماس سر سنبه با براده‌های منیزیم و همچنین تماس براده‌های منیزیم با اجزای قالب حاصل می‌گردد. میزان حرارت تولیدشده بر اندازه دانه‌ها و کیفیت سیم تأثیرگذار خواهد بود. با توجه به نمودارهای دمایی می‌توان دریافت که در طول انجام فرایند دمای ذوب منیزیم ۰/۸ خواهد بود.



شکل ۸: پروفیل میکروسختی سیم تولیدشده از جنس منیزیم [۱۵].



شکل ۹: نتایج تست استحکام برای نمونه سیم‌های تولیدشده در کار عبدی و همکاران [۱۴].

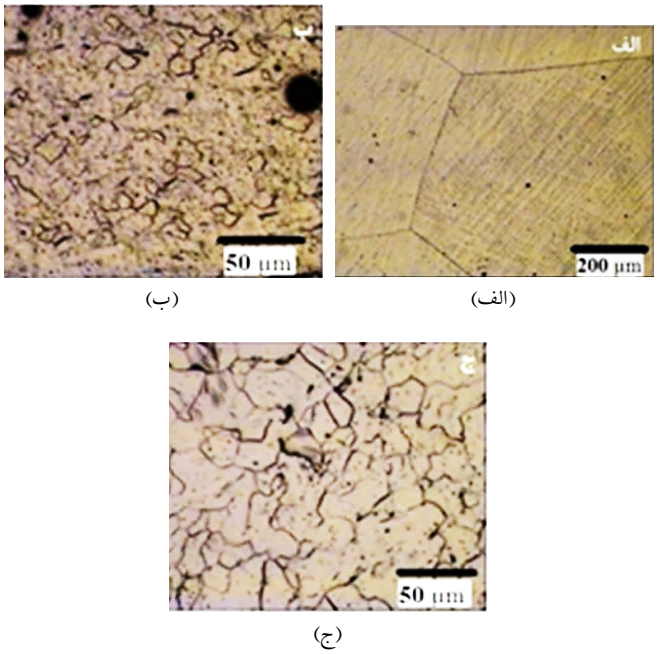


شکل ۱۰: نمودار دما بر حسب زمان با سرعت های پیشروی ۱۴ و ۲۰ میلیمتر بر دقیقه در سرعت دورانی ۳۵۵ [۱۶].

[2] coarse grains

۲.۰.۲.۲ اثر سرعت پیشروی بر ریزساختار

سرعت پیشروی نیز مانند سرعت دورانی بر روی اندازه دانه تأثیر مستقیم دارد به طوریکه هر چه سرعت دورانی و پیشروی همزمان بالاتر رود باعث افزایش دمای داخل قالب شده و با افزایش دما اندازه متوسط دانه‌ها نیز بیشتر خواهد شد، انصاری و همکارانش [۱۶] با توجه به شکل ۱۱ دریافتند که سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۱۴ میلیمتر بر دقیقه دارای کمینه اندازه دانه است. در حقیقت ترکیب دو سرعت دورانی و پیشروی تعیین کننده مقدار اندازه متوسط دانه است و سرعت پیشروی به‌تنهایی بر روی اندازه دانه تأثیرگذار نخواهد بود، همچنین دمای بیش از حد نیز باعث تخریب خواص مکانیکی و بزرگ‌شدن بیش از حد دانه‌ها خواهد شد.

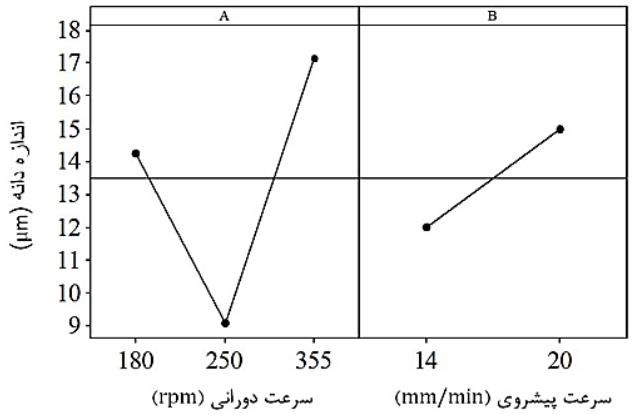


(ب) (الف)

(ج)

شکل ۱۱: (الف) ریزساختار ماده اولیه؛ ریزساختار نمونه‌های تولیدشده در سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه و (ب) سرعت پیشروی ۱۴ میلیمتر در دقیقه و (ج) سرعت پیشروی ۲۰ میلیمتر در دقیقه [۱۶].

تقریباً در همه موارد، فلز پایه بیشتر از نمونه‌های اکسترود شده واکنش پذیرتر است. بنابراین، نمونه‌های اکسترود شده نسبت به مواد دریافت شده بهتر است. مهمترین عوامل مؤثر بر رفتار خوردگی آلیاژهای منیزیم عبارتند از: عناصر آلیاژی، اندازه دانه، اصلاح میکروساختار و حرارت درمانی، به نظر می‌رسد که در روند اکستروژن منیزیم خالص، اندازه دانه مهم‌ترین عامل مؤثر بر رفتار خوردگی است. اکستروژن به عنوان یک حالت جامد حالت اصطکاکی را تحریک و ریزساختار را بهبود می‌بخشد که برای خواص خوردگی مفید است. همانطور که قبلاً ذکر شد، اولین تراشه‌های منیزیم خالص ساخته‌شده، دانه‌های بسیار درشت با اندازه چندین میلیمتر، در حالی که سیم‌های اکسترودشده دانه‌های نسبتاً خوب را نشان دادند در شکل ۱۲ اثر سرعت پیشروی و سرعت دورانی به صورت همزمان نشان داده شده است. انصاری و همکارانش [۱۶] مطابق جدول ۱ که اندازه متوسط دانه‌ها در سرعت‌های دورانی و پیشروی مختلف را نشان می‌دهد، به این نتیجه رسیدند که اندازه دانه در سرعت دورانی ۳۵۵ و پیشروی ۲۰ بالاتر از سایر سرعت‌ها است.



شکل ۱۲: نمودار اثرات اصلی بر اندازه متوسط دانه [۱۶].

جدول ۱: اندازه متوسط دانه در دو سرعت پیشروی ۱۴ و ۲۰ میلیمتر بر دقیقه [۱۶].

سرعت دورانی	اندازه متوسط دانه (μm) در سرعت پیشروی (mm/min)	
دور بر دقیقه	۱۴	۲۰
۱۸۰	۱۲/۳ ۱۳/۱ ۱۳/۸	۱۴/۹ ۱۵/۴ ۱۶
۲۵۰	۷/۷ ۶/۸ ۶/۱	۱۰/۹ ۱۱/۴ ۱۱/۸
۳۵۵	۱۵/۹ ۱۶/۱ ۱۶/۴	۱۷/۶ ۱۸/۲ ۱۸/۷

۳.۰.۲.۲ اثر سرعت پیشروی بر استحکام

سرعت پیشروی علاوه بر اینکه بر دمای قالب و اندازه دانه تأثیرگذار است بر روی استحکام ماده نیز تأثیرگذار خواهد بود بدین ترتیب که با افزایش اندازه دانه ها استحکام ماده پایین می‌آید، در واقع افزایش سرعت پیشروی باعث بزرگ‌تر شدن اندازه دانه‌ها شده و باعث کاهش استحکام خواهد شد. بنابراین با توجه به جدول شماره ۱ می‌توان دریافت که سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۱۴ میلیمتر بر دقیقه دارای بیشینه استحکام است [۱۶].

۴.۰.۲.۲ اثر سرعت پیشروی بر سختی

سختی نیز مانند استحکام تحت تأثیر سرعت پیشروی ماتریس قرار خواهد گرفت و در واقع پارامتر سرعت پیشروی به همراه سرعت دورانی تأثیر مستقیم بر روی میزان سختی سیم تولید شده دارند. انصاری و همکارانش [۱۶] به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت پیشروی ماتریس اندازه دانه‌ها درشت‌تر شده، هنگامی که اندازه دانه درشت‌تر شود میزان سختی آن کم خواهد شد. در نتیجه در بین دو سرعت پیشروی انتخاب شده در آزمایش فوق یعنی ۱۴ و ۲۰ میلیمتر بر دقیقه، سرعت پیشروی ۱۴ باعث افزایش سختی خواهد شد چون دانه‌های ریزتری نسبت به سرعت ۲۰ دارد.

۳.۲ تولید سیم از جنس آلیاژهای آلومینیوم

بازیافت براده‌های آلومینیوم نسبت به تولید آلومینیوم از سنگ معدن انرژی بسیار کمتری احتیاج دارد، که دو روش سنتی و مستقیم برای این کار وجود دارد، روش سنتی نیاز به ذوب مواد برای بازیافت شدن، ریخته‌گری یک شمش، سپس اکستروژن گرم شمش ریخته‌گری شده برای شکل دادن یک محصول یکپارچه در قالب سیم و یا لوله دارد. در روش تبدیل مستقیم براده‌ها تنها در یک مرحله اکستروژن گرم بازیافت می‌شوند. در مقایسه با بازیافت سنتی، روش مستقیم ضایعات آلومینیوم به فلز فشرده منجر به صرفه‌جویی ۴۰ درصد در مواد ۲۶ تا ۳۱ درصد انرژی و ۱۶ الی ۶۰ درصد در نیروی کار خواهد شد [۱۸]. افراد زیادی به مطالعه بازیافت براده‌های آلومینیوم با روش مستقیم پرداخته‌اند از آن جمله تانگ و رینولدز [۱۲] در مورد آلومینیوم AA2050 AA2195 و ابوفرها [۱۹] در مورد A6063-T52 و همچنین لی و همکارانش [۲۰] جریان شکل‌گیری مواد در حین فرایند اکستروژن اصطکاکی در مورد AA2195,AA6061، سرکاری خرم و همکاران برای ساخت لوله از بیلت آلیاژ آلومینیوم [۲۱] و عبدی بحنق از فرایند اکستروژن اصطکاکی، جهت تولید سیم از براده های آلیاژ آلومینیوم AA7277 استفاده کردند [۲۲].

۱.۳.۲ اثر سرعت دورانی

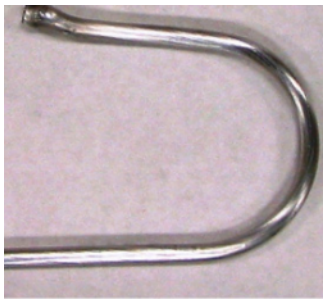
سرعت دورانی یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که در محصول فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی تأثیرگذار است، پارامتری که بر خواص مکانیکی، اندازه دانه‌ها، کیفیت و زبری سطح تأثیر زیادی دارد که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

۱.۱.۳.۲ اثر سرعت دورانی بر ناصافی و زبری سطح

هر چقدر زبری سطح افزایش پیدا کند کیفیت سطح پایین‌تر می‌آید و یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر روی کیفیت سطح سرعت دورانی خواهد بود. تانک و همکارانش [۱۲] با بررسی سیم‌های بدون نقص از هر دو آلیاژ ۲۰۵۰ و ۲۱۹۵ در سرعت‌های دورانی (۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ دور در دقیقه)، نقص‌هایی سطحی به صورت بصری مشاهده کردند. (شکل‌های ۱۳ و ۱۴) در سرعت‌های دورانی بالا امکان ترک خوردن بیشتر است. در سرعت دورانی ۲۰۰ بهترین کیفیت سطح را می‌توان مشاهده کرد. در سرعت‌های پایین تر امکان پاره شدگی و پیچ و تاب نیز وجود دارد. به طور کلی پیچ و تاب در سرعت‌های دورانی بالاتر کمتر مشاهده گردیده اما در سرعت‌های پایین تر از ۲۵۰ این عیب و نقص‌ها بیشتر مشاهده شده است.

آن‌ها همچنین دریافتند که در سرعت دورانی ۱۸۰ دور بر دقیقه کیفیت سیم‌های تولید شده پایین بوده و در ادامه مورد بررسی قرار نداده‌اند، دلیل پایین بودن کیفیت سیم‌ها در سرعت ۱۸۰ این بوده است که گرمای اصطکاک به وجود آمده در حدی نیست که براده‌ها را خمیری کند و براده‌ها به خوبی جریان پیدا نمی‌کنند. با افزایش سرعت دوران تا ۵۰۰ دور بر دقیقه و کاهش در نیروی فشاری وارد بر براده‌ها شاهد افزایش کیفیت و همگن‌تر و عاری از ترک گردیده است [۱۲].

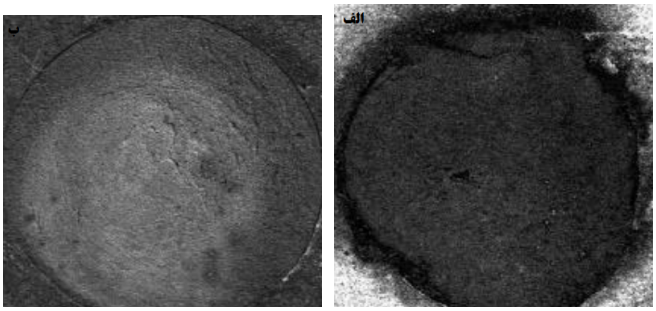
شکل ۱۳: سیم‌های تولیدشده از بالا به پایین به ترتیب در سرعت‌های دورانی ۴۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ دور بر دقیقه [۱۲].



شکل ۱۴: سیم تولید شده در سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه (خم‌کاری‌شده وزن ۵ تن) [۱۲].

۲.۱.۳.۲ اثر سرعت دورانی بر ریزساختار

اندازه دانه رابطه‌ای مستقیم با میزان گرما دارد به طوریکه با افزایش گرمای ورودی اندازه دانه افزایش خواهد یافت. طهماسبی و محمودی [۱۸] به این نتیجه رسیدند که افزایش سرعت دورانی باعث بالارفتن دما و تفجوشی بهتر مواد می‌شود و اندازه دانه نیز بزرگتر خواهد شد. آن‌ها مقطع عرضی نمونه تولید شده را در شکل ۱۵ با دو سرعت دورانی ۱۸۰ دور بر دقیقه و ۵۰۰ دور بر دقیقه و نیروی اعمالی ۴۸/۱ و ۳۸/۴ کیلونیوتن نشان داده‌اند. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت دورانی سطح همگن‌تری به وجود آمده است.



(ب) (الف)

شکل ۱۵: مقطع عرضی نمونه تولیدشده به روش اصطکاکی اغتشاشی. (الف) سرعت دورانی ۱۸۰ و نیروی محوری ۴۸/۱، (ب) سرعت ۵۰۰ و نیروی ۴۸/۱ و (ج) سرعت ۵۰۰ و نیروی ۳۸/۴ [۱۸].

۳.۱.۳.۲ اثر سرعت دورانی بر سختی

مقاومتی که ماده در برابر شکل‌پذیری دارد را سختی گوییم به طوریکه سختی یکی از مهم‌ترین خواص مکانیکی ماده است. با افزایش سرعت دورانی مقادیر سختی کاهش پیدا کرده و نمونه تولید شده در سرعت دورانی بالاتر در تمام

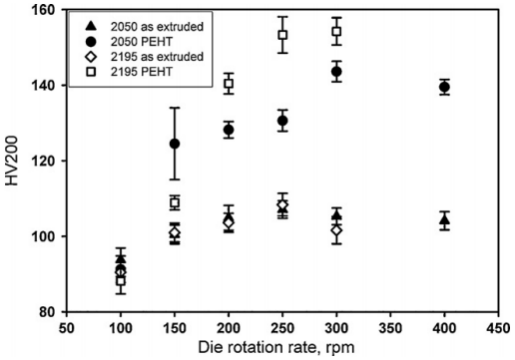
نقاط مقطع عرضی از مقدار سختی کمتری برخوردار است. دلیل این امر آن است که با افزایش سرعت دوران، دما بالاتر می‌رود و اندازه دانه‌ها بزرگ‌تر می‌شود و موجب کاهش سختی خواهد شد. همانطور که مشاهده می‌شود در جدول شماره ۲ هنگامی‌که نیروی اعمالی ثابت باشد هر چقدر سرعت دورانی بالاتر رود اندازه متوسط دانه بزرگتر خواهد شد و مطابق با جدول سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه با نیروی اعمالی ۴۸/۱ بالاترین مقدار اندازه متوسط را به وجود آورده است.

جدول ۲: متوسط اندازه دانه نمونه‌های مختلف [۱۸].

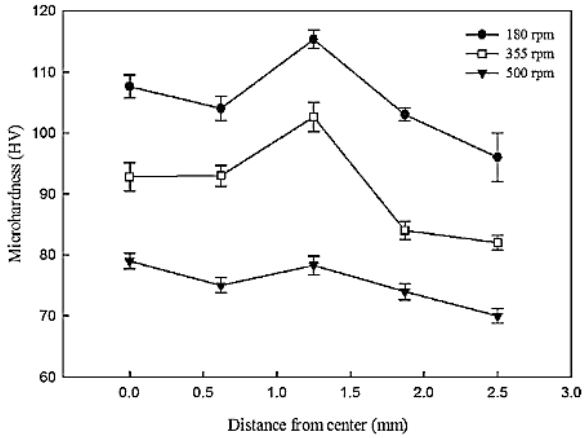
سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	نیرو (کیلو نیوتن)	متوسط اندازه دانه (میکرومتر)
۱۸۰	۴۸/۱	۸/۴
۳۵۵	۴۸/۱	۱۰/۹
۵۰۰	۴۸/۱	۱۲/۲
۵۰۰	۳۸/۴	۱۱/۹
۵۰۰	۵۷/۷	۱۱/۵

شکل ۱۶، سختی متوسط برای تمام سیم‌ها قبل و بعد از عملیات حرارتی پس از اکستروژن را نشان می‌دهد. تانگ[3] و همکارانش [۱۲]، ۱۰ الی ۱۱ قطعه کوچک ویکرز را از نظر میکروسختی قبل و بعد از اعمال حرارت مورد بررسی قرار دادند. مقادیر سختی متوسط با تغییر سرعت دورانی تغییر کرده و همچنین به عنوان سیم اکسترودشده برای سیم‌های ۲۰۵۰ و ۲۱۹۵ برای یک سرعت دورانی داده شده بسیار متفاوت است. آن‌ها دریافتند که سیم‌های تولیدی با سرعت دورانی ۱۰۰ دور در دقیقه کمترین میزان سختی را دارند. برای نرخ دوران بالاتر، در سختی تفاوت بسیار کمی وجود دارد. در شکل دیده می‌شود که برای سرعت دورانی کمتر از ۲۵۰ دور در دقیقه سختی پس از اکستروژن در آلیاژ ۲۱۹۵ تقریبا ثابت است. روند مشابهی برای آلیاژ ۲۰۵۰ در سرعت دورانی کمتر از ۳۰۰ دور در دقیقه دیده می شود و ریز ساختار نمونه‌های تولیدی در شکل ۱۸ نشان داده شده که در سرعت ۲۵۰ کیفیت سطح بالاتری مشاهده خواهد شد [۱۲].

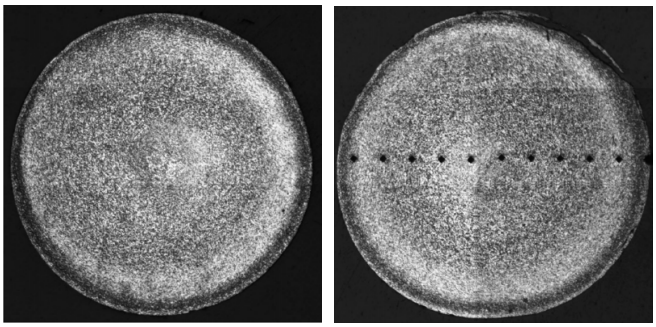
طهماسبی و محمودی [۱۸] مطابق با شکل ۱۷ مقادیر سختی برای سرعت‌های دورانی مختلف بر حسب فاصله از مرکز مقطع عرضی را نشان داده‌اند که در حد فاصل ۱ الی ۵.۱ میلیمتر بیشترین مقدار سختی مشاهده گردیده است و در شکل ۱۸ ریزساختار نمونه‌های تولید شده با سرعت‌های دورانی مختلف را در مقطع عرضی نمونه‌ها مورد بررسی قرار دادند.



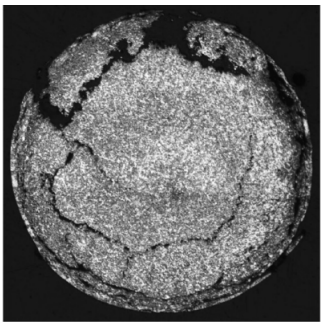
شکل ۱۶: سختی متوسط ویکرز سیم‌های ۲۰۵۰ و ۲۱۹۵ نسبت به سرعت دوران [۱۲].



شکل ۱۷: مقادیر سختی نمونه‌های آلیاژ AA7022 تولیدشده در سرعت‌های دورانی مختلف بر حسب فاصله از مرکز مقطع عرضی [۱۲].



(ب) (الف)



(ج)

شکل ۱۸: ریزساختار نمونه‌های تولیدی در سرعت‌های دورانی (الف) ۱۰۰، (ب) ۲۵۰ و (ج) ۴۰۰ [۱۲].

۴.۱.۳.۲ اثر سرعت دورانی بر استحکام

سرعت دورانی پارامتری است که بر روی استحکام ماده تأثیر مستقیم دارد، مقدار نیرویی که ماده تحمل می‌کند را استحکام می‌گوییم، طهماسبی و محمودی [۱۸] برای محاسبه مقادیر استحکام از آفست ۰/۲٪ استفاده کردند که نتایج آن در جدول ۳ آمده است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت دورانی استحکام تسلیم کاهش یافته است، استحکام تسلیم کمترین تنشی است که تغییر شکل دائمی در ماده ایجاد می‌کند. دلیل این کاهش همان درشت تر شدن دانه‌ها با افزایش دماست که ناشی از آنیلینگ نمونه در حین فرایند است. استحکام تسلیم علاوه بر سرعت دورانی به نیروی اکستروژن نیز وابسته است هر چه نیرو افزایش پیدا کند استحکام تسلیم کاهش پیدا می‌کند.

[3] Tang

در نمونه ۵۷/۷ کیلو نیوتن شکست نمونه اتفاق افتاده است، همچنین مطابق جدول شماره ۳ بالاترین میزان استحکام در پایین‌ترین سرعت دورانی یعنی ۱۸۰ دور بر دقیقه به طوری که نیروی اعمالی ثابت باشد رخ داده است و همچنین با بالارفتن سرعت دورانی استحکام کاهش پیدا کرده است [۱۸].

جدول ۳: مقادیر استحکام تسلیم نمونه‌های مختلف آلیاژ AA7022 [۱۸].

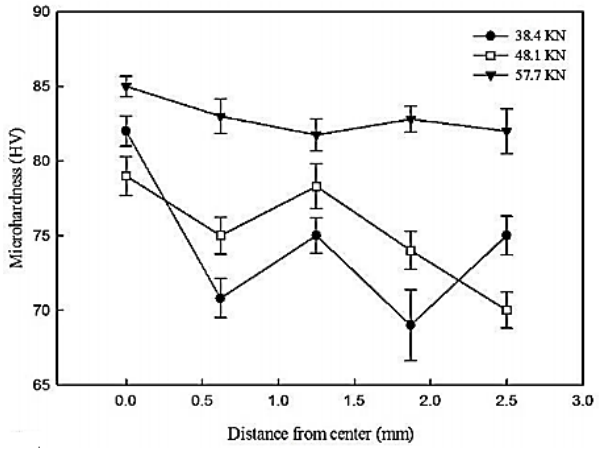
سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	نیرو (کیلو نیوتن)	استحکام تسلیم (مگا پاسکال)
۱۸۰	۴۸/۱	۲۳۰
۳۵۵	۴۸/۱	۲۱۰
۵۰۰	۴۸/۱	۱۹۷
۵۰۰	۳۸/۴	۱۸۶
۵۰۰	۵۷/۷	۱۷۴

۲.۳.۲ اثر نیروی اعمالی

نیروی اعمالی نیز یکی دیگر از پارامترهای مهم در اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی است. در واقع این پارامتر در اجرای فرایند بر روی یک ماده خاص، به عنوان پارامتر معادل سرعت پیشروی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در برخی مقالات بجای سرعت پیشروی از نیروی محوری اعمال‌شده توسط سنبه استفاده شده است که در اینجا تأثیر آن بر روی سختی و کیفیت سطح مورد بررسی قرار گرفته است. نیروی اعمالی از طرف سنبه وارد می‌شود و با افزایش این نیرو میزان گرمای تولید شده نیز بالاتر خواهد رفت.

۱.۲.۳.۲ اثر نیروی اعمالی بر سختی

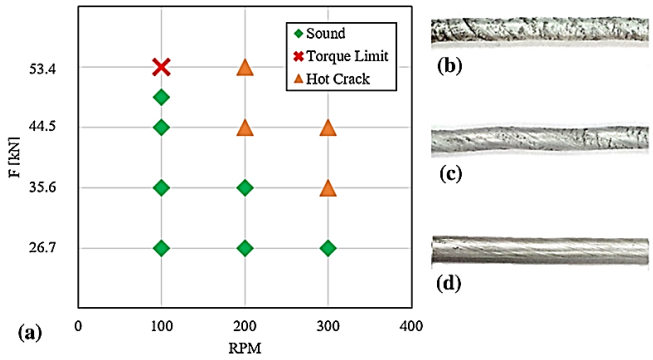
نیروی اعمالی وارد شده از طرف سنبه به ماتریس باعث بالا رفتن حرارت درون قالب خواهد شد، طهماسبی و محمودی [۱۸] با بررسی این پارامتر به این نتیجه دست یافتند که در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه گرمای اصطکاک باعث درشت‌تر شدن دانه‌ها خواهد شد و در نتیجه سختی کاهش پیدا می‌کند. آزمایشهای آنان نشان می‌دهد که در این حالت با افزایش مقدار نیروی اعمالی سختی افزایش پیدا خواهد کرد. بدین منظور در سرعت دوران ۵۰۰ سه نیروی اعمالی به اندازه‌های ۳۸/۴ و ۴۸/۱ و ۵۷/۷ را مورد بررسی قرار دادند و همانگونه که در شکل ۱۹ نشان داده شده نیروی ۵۷/۷ بالاترین میزان سختی به دست آمده است.



شکل ۱۹: متوسط سختی نمونه‌ها در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه و نیروهای متفاوت [۱۸].

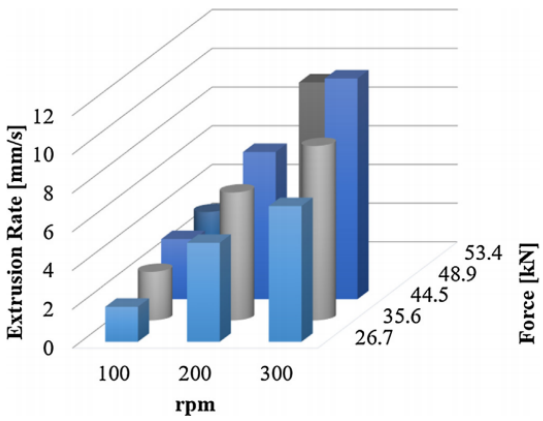
۲.۲.۳.۲ اثر نیروی اعمالی بر کیفیت سطح

از آنجا که نیروی اعمالی باعث ایجاد گرما و حرارت درون قالب می‌شود در نتیجه بر روی کیفیت سطح نیز تأثیر خواهد گذاشت، داریو بافری و همکارانش [۲۳] با بررسی این پارامتر به این نتیجه رسیدند که مقادیر بالای نیرو و سرعت دورانی باعث ایجاد گرمای بیش از حد شده و ممکن است ترک ایجاد کند. به دلیل ایجاد گشتاور بیش از حد در سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه و نیروی اعمالی ۵۳/۴ کیلو نیوتن، امکان مطالعه موردی فراهم نمی‌شود، به همین دلیل فشار اعمالی را تا ۴۸/۹ کیلو نیوتن کاهش می‌دهیم. در تجزیه و تحلیل مقطع اکسترود شده، یک ریز ساختار صاف و یکنواخت می‌توان در تمام مطالعات مشاهده کرد. در شکل ۲۰ نشان داده شده و بهترین حالت، زمانی است که سرعت دورانی ۳۰۰ دور بر دقیقه و نیروی اعمالی ۲۶/۷ کیلو نیوتن است. در واقع اعمال نیروی بیش از حد در اکثر مواقع باعث ایجاد ترک گرم شده است [۲۳].



شکل ۲۰: (a) ماتریس آزمایشات برای تولید سیم آلیاژ AA2050-T3 تحت نیروی اعمالی ۴۵ kN، (b) دور ۳۰۰، (c) دور ۲۰۰ و (d) دور ۱۰۰ [۲۳].

نرخ اکستروژن به وسیله تجزیه و تحلیل حرکت عمودی قالب و محاسبه سرعت متوسط مواد در کانال اکستروژن با استفاده از حجم محاسبه شده است. آن‌ها همچنین دریافتند که میانگین مقادیر اکستروژن با افزایش سرعت دورانی و افزایش نیرو افزایش می‌یابد، این را می‌توان توضیح داد که هر دو پارامتر منجر به افزایش مصرف انرژی می‌شود و با توجه به شکل ۲۱ بالاترین میزان مصرف انرژی هنگامی است که سرعت دورانی و نیروی اعمالی زیاد شده است [۲۳].



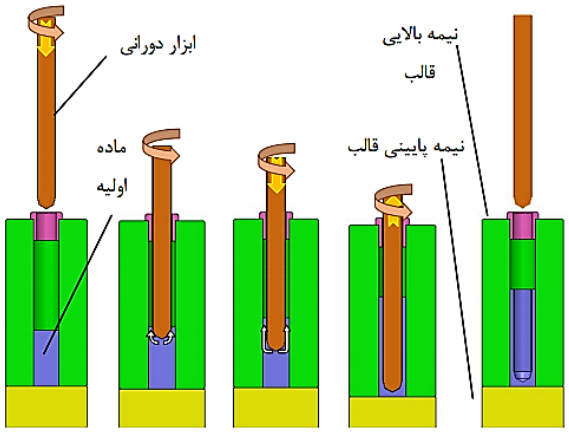
شکل ۲۱: مقادیر میانگین اکستروژن با پارامترهای مختلف فرایند برای مطالعات موردی AA2050-T3 [۲۳].

۳.۳.۲ هندسه قالب

هندسه قالب یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در روش اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی است اما محققان کمتر به این عامل مهم پرداخته‌اند، اما جمالی و همکارانش [۲۴] به بررسی این عامل پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیدند که قطر روزنه کمتر، سبب مقاومت بیشتر ماده جهت خروج از روزنه می‌شود. نتیجه این مقاومت تحت تنش بالاتر قرار گرفتن ماده، تغیر شکل پلاستیک بیشتر و نهایتاً کاهش اندازه دانه است. اما اگر کاهش قطر روزنه سنبه سبب کاهش شدید سرعت اکستروژن شود، با توجه به زمان و دمای کافی جهت رشد دانه نتیجه معکوس دارد .بنابراین قطر روزنه سنبه می‌تواند تحت تأثیر دو پارامتر اصلی فرایند قرار گیرد تغییر هندسه پیشانی ابزار کوچکترین سهم را در خواص مکانیکی سیم تولید شده دارد، هنگام انجام فرایند با سنبه مارپیچ در ابتدای فرایند که دما پایین است مقداری ماده درون شیارهای مارپیچ سطح ابزار به جا مانده و عملاً اصطکاک از حالت لغزنده به چسبنده تبدیل می‌شود یعنی به جای اصطکاک بین ابزار و ماده، اصطکاک میان لایه‌های ماده ایجاد می‌شود به همین دلیل تأثیر عمده‌ای از تغییر هندسه پیشانی ابزار حاصل نمی‌شود [۲۴].

۳ فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی جهت تولید لوله

فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی علاوه‌بر تولید سیم، برای تولید لوله نیز به کار می‌رود. به طوریکه مطابق شکل ۲۲ در این فرایند سنبه با حرکت توامان چرخشی و رو به پایین، به درون ماده اولیه نفوذ کرده و حرارت ناشی از اصطکاك باعث نرم شدن قطعه می‌شود؛ سپس مواد به دور سنبه به صورت روبه بالا اکسترود شده و به شکل نهایی لوله تبدیل می‌شوند [۲۵].

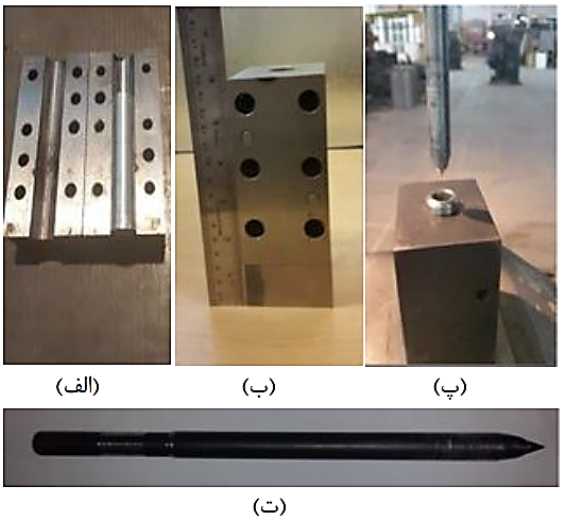


شکل ۲۲: شماتیک فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی برای تولید لوله. (الف) قرارگیری نمونه در قالب، (ب) پیش گرمایش نمونه، (پ) نفوذ ابزار دورانی، (ت) پیشروی به عمق مطلوب و (ث) خروج ابزار از قالب [۲۵].

۱.۳ تولید لوله از جنس آلومینیوم

در فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی پارامترهای زیادی تأثیر گذار هستند که می‌توانند بر کیفیت قطعه نهایی اثرگذار باشند از جمله سرعت پیشروی، سرعت دوران، جنس، نوع قالب و ... که به دلیل اینکه این روش، روشی جدید است کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تولید لوله نیز مانند تولید سیم تحت تأثیر این پارامترها قرار می‌گیرد و در ادامه به بررسی این عوامل و تأثیر آن‌ها بر روی لوله تولید شده توسط فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی خواهیم پرداخت.

در یک آزمایش که توسط خان بیگی و همکارانش انجام شد [۲۵] یک قالب سه تکه از جنس فولاد که حفره میانی قالب با استفاده از دستگاه وایرکات به قطر ۱۸ میلیمتر و عمق ۱۵۰ میلیمتر برش خورده است. ابزار فرایند از جنس فولاد گرم‌کار بوده و دارای قطر ۱۳ است. نوک ابزار به دلیل هدایت و نفوذ بهتر در نمونه به صورت زاویه‌دار (۳۵ درجه) مخروطی شده است. در تصویر زیر شکل قالب مشاهده می‌شود. شکل شماره ۲۳ یک نمونه از قالب ساخته شده جهت نمونه‌گیری لوله را نشان می‌دهد که سنبه وارد ماتریس شده و بر اثر گرمای حرکت سنبه براده‌ها خمیری شکل و از اطراف آن خارج شده و تولید لوله رخ خواهد داد.



شکل ۲۳: نمایی از قالب جهت تولید لوله، (الف) و (ب) نمای قالب، (پ) بوش راهنمای ابزار، (ت) ابزار دورانی [۲۵].

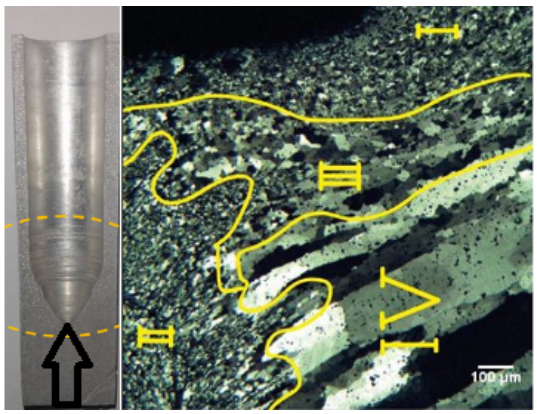
۱.۱.۳ اثر سرعت پیشروی

همانطور که قبلاً گفته شد، سرعت پیشروی نیز همانند سرعت دورانی یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که بر فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی تأثیر مستقیم خواهد داشت. توضیح اینکه سرعت دورانی برای سنبه و سرعت پیشروی برای ماتریس در نظر گرفته می‌شود. در اینجا اثر سرعت پیشروی بر پارامترهایی مانند اندازه دانه، استحکام و سختی بررسی گردیده است.

۱.۱.۱.۳ اثر سرعت پیشروی بر ریزساختار

سرعت پیشروی نیز مانند سرعت دورانی بر روی اندازه دانه تأثیر مستقیم دارد، اندازه دانه هر چقدر بزرگتر باشد میزان سختی و استحکام کمتر می‌شود خان بیگی و همکارانش [۲۵] با مطالعه بر روی لوله‌های ریز ساختار به این نتیجه رسیدند که با کاهش سرعت پیشروی درون قالب افزایش حرارت را خواهیم داشت که پدیده تبلور مجدد مکانیکی رخ خواهد داد و بر اثر اعمال تنش‌های برشی پدیده تغییر شکل پلاستیک شدید اتفاق می‌افتد به همین دلیل اندازه

دانه‌ها کاهش یافته و با شکل گرفتن یک ساختار متشکل از دانه‌های ریز هم محور ریز ساختار بهبود می‌یابد. مقایسه اندازه دانه محاسبه شده نسبت به اندازه دانه ماده اولیه، کاهش سایز دانه‌ها را نشان می‌دهد و با توجه به شکل ۲۴ در قسمت نوک قالب (با علامت فلش نشان داده شده است) ریزساختار دارای چهار ناحیه با اندازه دانه‌های مختلف است که در جدول شماره ۴ اندازه آن‌ها آمده است [۲۵].



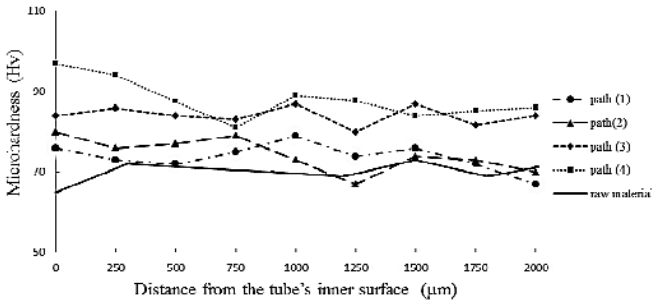
شکل ۲۴: تصویر ریزساختار ناحیه نشان داده‌شده با فلش بر اساس اندازه دانه [۲۵].

جدول ۴: اندازه دانه‌های نواحی مشخص شده در شکل ۲۴ بر حسب میکرومتر [۲۵].

IV	III	II	I
۸۵	۴۲	۲۵	۳۳

۲.۱.۱.۳ اثر سرعت پیشروی بر سختی

سختی در واقع مقاومت ماده نسبت به شکل‌پذیری است که تحت تأثیر پارامتر سرعت پیشروی قرار می‌گیرد و با تغییر سرعت پیشروی سختی نیز تغییر پیدا خواهد کرد، خان بیگی و همکارانش [۲۵] با بررسی ریز ساختار لوله تولیدی و مسیرهای واقع بر دیواره لوله تولید شده به روش اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی، دریافتند که مقدار سختی از نمونه اولیه بیشتر شده است. همچنین با حرکت از سمت دیواره درونی لوله تولید شده به سمت دیواره بیرونی مقدار سختی کاهش می‌یابد. این روند کاهشی برای سایر مسیرها نیز صادق است. این روند کاهشی را می‌توان به اثر افزایش حرارت و همچنین تغییرات ریزساختار از جمله افزایش اندازه دانه‌ها در راستای ضخامت دیواره نسبت داد. در نتیجه مطابق با شکل ۲۵ کاهش سرعت پیشروی به علت ایجاد حرارت بالاتر منجر به افزایش میزان سختی خواهد شد.



شکل ۲۵: نمودار میکرو سختی ماده اولیه [۲۵].

۳.۱.۱.۳ اثر سرعت پیشروی بر استحکام

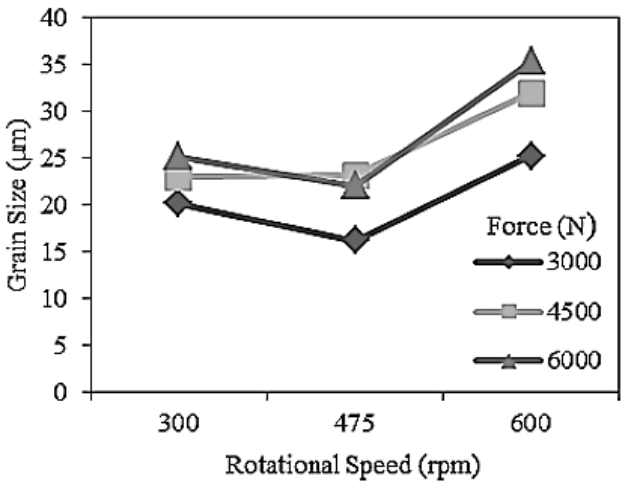
سرعت پیشروی علاوه بر تأثیرگذاری بر روی سختی بر استحکام نیز تأثیر خواهد گذاشت، خان بیگی و همکارانش [۲۵] دریافتند که با کاهش سرعت پیشروی و در نهایت با افزایش حرارت، دانه‌ها ریزتر شده و سطح همگن‌تر خواهد شد که این امر باعث افزایش استحکام لوله تولید شده می‌شود. سرعت پیشروی ماتریس بر روی خواص مکانیکی و ساختاری قطعه نهایی تأثیرگذار خواهد بود البته سرعت پیشروی به همراه سرعت دوران دو پارامتر وابسته به هم هستند. آزمایشی با سرعت دورانی ۱۱۰۰ دور در دقیقه و پیشروی ۲۱/۲ میلیمتر بر دقیقه بهترین حالت برای رسیدن به شکل قابل قبول لوله تولید شده هستند. پس از حدود ۲۰ دقیقه، به منظور خنک‌کاری و تبادل دمایی بین محیط و قالب، نمونه از قالب خارج می‌گردد [۲۵].

۲.۱.۳ تأثیر سرعت دورانی

سرعت دورانی نیز مانند سرعت پیشروی به عنوان یکی دیگر از مهمترین پارامترهای فرایندی در روش اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی جهت تولید لوله مطرح است و اثرات قابل توجهی بر موفقیت‌آمیز بودن فرایند و نیز خواص ریزساختاری و مکانیکی محصول تولید شده دارد.

۱.۲.۱.۳ اثر سرعت دورانی بر اندازه دانه

اندازه دانه تحت تأثیر حرارت داخل قالب قرار خواهد گرفت و با افزایش حرارت اندازه دانه‌ها انبساط بیشتری خواهند داشت یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر این فرایند سرعت دوران سنبه هنگام ورود به ماتریس خواهد بود. جمالی و همکارانش [۲۴] با استفاده از روش تاگوچی دریافتند که سرعت دورانی مهمترین عامل در کاهش اندازه دانه است و با تحلیل واریانس آنوا از نتایج اندازه دانه‌ها با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش کوالیتک ۴ درصد مشارکت بیش از ۶۳ درصدی این پارامتر را نشان می‌دهد مطابق شکل ۲۶ با افزایش سرعت دوران اندازه متوسط دانه نیز افزایش خواهد داشت، در شکل مورد نظر هم‌زمان با اعمال سرعت دورانی و نیروی اعمالی بالاتر اندازه دانه درشت‌تری به وجود آورده است.



شکل ۲۶: نمودار اندرکنش میان سرعت دورانی و نیروی اعمالی [۲۴].

۲.۲.۱.۳ اثر سرعت دورانی بر سختی

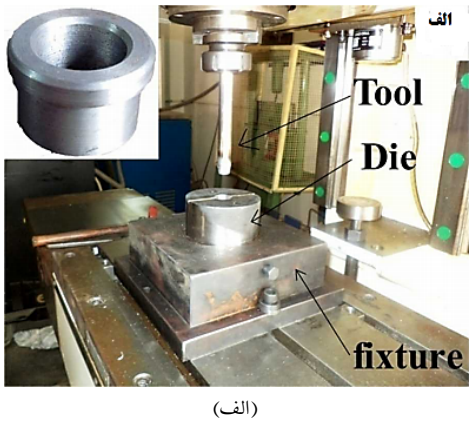
سرعت دورانی مهم‌ترین عامل در افزایش سختی است. جمالی و همکارانش [۲۴] با بررسی اثر سرعت دورانی بر روی سختی با استفاده از روش تاگوچی سعی بر بهینه سازی این پارامتر کردند و دریافتند که با افزایش سرعت دورانی مقادیر سختی کاهش پیدا کرده و نمونه تولید شده در سرعت دورانی بالاتر در تمام نقاط مقطع عرضی از مقادیر سختی کمتری برخوردار است .دلیل این امر این است که با افزایش سرعت دورانی دما افزایش پیدا کرده و همان طور که بیان شد اندازه دانه‌ها بزرگتر شده و با افزایش اندازه دانه‌ها خواص مکانیکی ماده همچون مقادیر سختی افت پیدا می‌کند.

۲.۳ تولید لوله از جنس مس

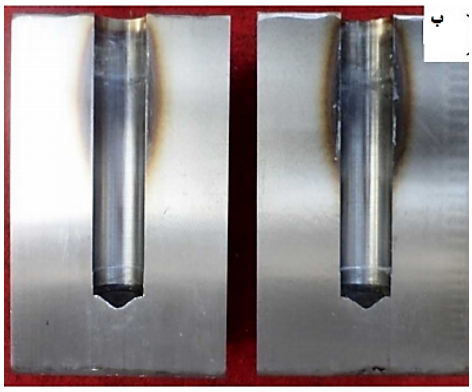
مس فلزی رسانا با قابلیت هدایت الکتریکی و حرارتی بالاست و از جمله پرکاربردترین فلزات است که به دلیل دمای نقطه ذوب بالایی که دارد در فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی کمتر مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است اما دیناهاران و همکارانش [۲۶] با تحقیق بر روی لوله مسی تولید شده توسط فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی مشاهده کردند که نمونه‌هایی عاری از ترک به وجود آمده است. ریز ساختار نهایی لوله نسبت به لوله خام ساختار همگن‌تری خواهد داشت. در این روش دانه‌های مس در معرض حرارت زیادی قرار می‌گیرند و در نتیجه این فرایند برای کنترل ریزساختار مناسب است. در آزمایش مورد نظر آن‌ها از دو بخش قالب و ابزار دورانی استفاده کرده‌اند که قطر ابزار دورانی ۱۹ میلیمتر و از جنس فولاد سخت‌کاری شده ساخته شده است. قسمت پایانی ابزار زاویه مخروطی ۱۰ درجه در نظر گرفته شده است. قالب هم‌جنس با ابزار و قطر آن ۲۵ میلیمتر و طول داخلی آن ۱۰۰ در نظر گرفته شده است در شکل ۲۷ قالب ساخته شده جهت نمونه‌گیری لوله مسی آورده شده است که در تصویر الف نمای کلی قالب از جمله ابزار و قالب نشان داده شده و در تصویر ب نمای برش خورده قالب (قالب به صورت دو تکه ساخته شده است) را مشاهده می‌کنید. در شکل ۲۸ نمونه لوله مسی تولید شده در دو نمای مختلف آورده شده است که نمای بیرونی در قسمت الف و نمای داخلی لوله در قسمت ب قابل مشاهده است [۲۶].

۱.۲.۳ ریزساختار لوله مسی

دیناهاران[4] و همکاران [۲۶] نمونه‌های تولید شده مس را در زیر میکروسکوپ و در چندین نقطه بررسی کردند و ریزساختار نمونه‌ها به صورت همگن در طول لوله مشاهده شده است. تغییر رنگ ایجاد شده رفتار ماده را در طول فرایند اکستروژن نشان می‌دهد. لوله‌های تولید شده مس به صورت روشهای سنتی تولید شده است. ابزار چرخشی دورانی باعث کریستال شدن مجدد خواهد شد و سایز میانگین ۲۰ میکرون را به وجود آورده‌اند و ابزار دورانی به صورت پیوسته جریان را ایجاد می‌کند و هنگامیکه به پایان برسد لوله به صورت پیوسته تولید خواهد شد. گرمای اصطکاک باعث تغییر رنگ براده‌ها گردیده است و رنگ مس متمایل به آبی خواهد شد که در شکل ۲۹ رنگدانه‌های آبی به وضوح دیده می‌شوند همچنین سایز دانه‌ها نسبت به قبل حدود ۱/۵ برابر شده است [۲۶].

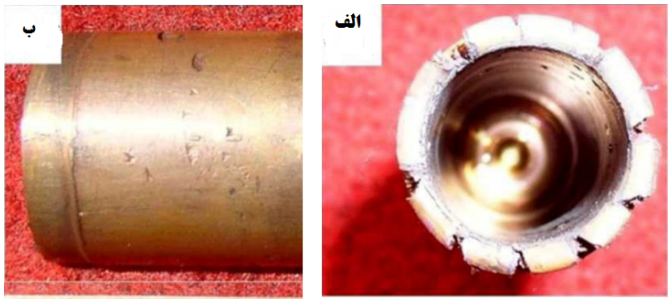


(الف)

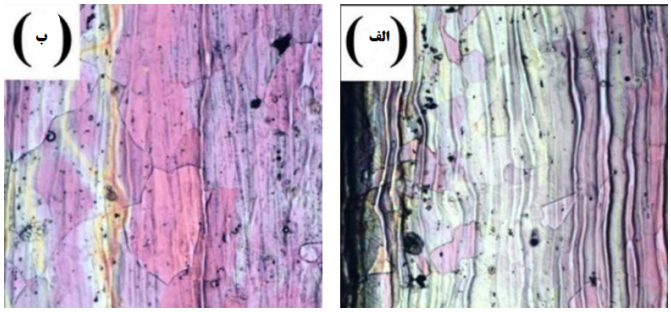


(ب)

شکل ۲۷: تصویر الف عکس کلی قالب و ابزار و ب نمای درونی قالب را نشان می‌دهد [۲۶].



شکل ۲۸: لوله تولیدشده از جنس مس توسط فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی (الف) نمای داخلی و (ب) نمای بیرونی لوله [۲۶].



شکل ۲۹: ریزساختار نمونه تولیدشده (الف) نمای خارجی و (ب) نمای داخلی لوله مسی تولیدشده توسط فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی [۲۶].

[4] Dinaharan

۴ نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی گردید فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی برای تولید انواع سیم و لوله بررسی شود اما به دلیل جدید بودن این فرایند و به طور طبیعی کمبود منابع کافی، در بعضی پارامترها بصورت کامل تأثیر آن بررسی نشده است. با بررسی همین منابع محدود در مقالات موجود نتایج زیر قابل دستیابی است.

- فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی قابلیت بسزایی در ایجاد حرارت اصطکاکی داشته و به همراه فشار و اغتشاشی که در اثر ترکیب حرکت‌های دورانی و پیشروی ایجاد می‌کند، توانایی اتصال براده‌های ماشین‌کاری و پودرهای فلزی را دارد. بطوریکه با انتخاب صحیح پارامترهای فرایندی، می‌توان محصولی با خواص مکانیکی حتی بالاتر از ماده اولیه تولید نمود.
- به طور کلی با افزایش سرعت دورانی گرمای ایجاد شده در درون قالب بیشتر خواهد شد و با افزایش دما اندازه دانه‌ها درشت‌تر می‌شود. درشت‌تر شدن بیش از حد دانه‌ها باعث کاهش سختی و استحکام می‌شود. ولی به صورت کلی قطعاتی که با فرایند اکستروژن اغتشاشی اصطکاکی تولید می‌شوند، استحکام و سختی بالاتری نسبت به مواد اولیه دارند. سرعت دورانی مهم‌ترین پارامتر در این فرایند است و تأثیر بسزایی در تشکیل دانه‌ها خواهد داشت. انتخاب سرعت دورانی بهینه نتایج بهتری را در آزمایشات نشان می‌دهد.
- سرعت پیشروی در واقع مکمل سرعت دورانی است، یعنی این دو پارامتر با کمک هم تأثیر بسزایی بر تولید نمونه‌ی نهایی با استحکام و سختی بالا و سطح همگن و عاری از ترک خواهند داشت. نتایج نشان می‌دهد انتخاب سرعت پیشروی و دورانی بهینه که بصورت تجربی حاصل می‌گردد، بهترین نمونه از لحاظ ریزساختار و خواص مکانیکی را در این فرایند می‌تواند تولید کند.
- پارامتر اندازه نیرو تأثیر مستقیمی بر سختی قطعه‌کار خواهد گذاشت. نتایج نشان‌دهنده این است که افزایش نیروی محوری باعث بالاتر رفتن میزان سختی قطعه می‌شود. البته افزایش بیش از حد نیروی اعمالی باعث ایجاد ترک در قطعه می‌شود بنابراین اندازه نیرو باید طوری انتخاب گردد که علاوه بر بالابردن سختی باعث ایجاد ترک و شکست نشود.
- یکی دیگر از پارامترها که کمتر به آن پرداخته شده است هندسه قالب است. اگر روزنه خروجی قالب برای تولید سیم کوچک باشد مواد موقع خروج فشرده‌تر شده و این کار سختی و همگنی دانه‌ها را بالاتر می‌برد. اما کوچک بودن بیش از حد دهانه خروجی، نیروی اکستروژن مورد نیاز را به شدت افزایش می‌دهد و ممکن است موجب انسداد مسیر خروج شده و باعث توقف فرایند شود.
- در تمام قطعات تولید شده به روش اکستروژن اغتشاشی اصطکاکی مشاهده گردید که سختی و استحکام نهایی نسبت به قطعه اولیه به میزان قابل توجهی بالا رفته است. در واقع فرایند فوق باعث افزایش سختی و استحکام و همچنین کیفیت سطح بالا و همگن‌تر شدن ریزدانه‌ها خواهد شد.

مراجع

[1] Givi, M.K.B. and Asadi, P. *Advances in Friction-Stir Welding and Processing*. 2014.

[2] Arora, Harpreet Singh, Grewal, Harpreet Singh, Singh, Harpreet, Dhindaw, Brij Kumar, McPhail, David, Sholock, Barbara, Chater, Richard, and Mukherjee, Sundeep. Microstructure-Property Relationship for Friction Stir Processed Magnesium Alloy. *Advanced Engineering Materials*, 16(1):94–102, 2014.

[3] Nascimento, F, Santos, T, Vilaça, P, Miranda, R M, and Quintino, L. Microstructural modification and ductility enhancement of surfaces modified by FSP in aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 506(1):16–22, 2009.

[4] Mishra, R S, Ma, Z Y, and Charit, I. Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite. *Materials Science and Engineering: A*, 341(1):307–310, 2003.

[5] Besharati-Givi, M-K and Asadi, Parviz. *Advances in friction-stir welding and processing*. Elsevier, 2014.

[6] Asadi, P., Faraji, G., Masoumi, A., and Givi, M.K.B. Experimental investigation of magnesium-base nanocomposite produced by friction stir processing: Effects of particle types and number of friction stir processing passes. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 42(9), 2011.

[7] Asadi, P., Besharati Givi, M.K., Parvin, N., Araei, A., Taherishargh, M., and Tutunchilar, S. On the role of cooling and tool rotational direction on microstructure and mechanical properties of friction stir processed AZ91. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63(9-12), 2012.

[8] Karthikeyan, L, Kumar, V S Senthil, and Padmanabhan, K A. Investigations on Superplastic Forming of Friction Stir-Processed AA6063-T6 Aluminum Alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 28(3):294–298, 2013.

[9] Ahmadkhaniha, D. and Asadi, P. Mechanical alloying by friction stir processing. in *Advances in Friction-Stir Welding and Processing*. 2014.

[10] Asadi, P., Mahdavinejad, R.A., and Tutunchilar, S. Simulation and experimental investigation of FSP of AZ91 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A*, 528(21), 2011.

[11] Asadi, P., Givi, M.K.B., Abrinia, K., Taherishargh, M., and Salekrostam, R. Effects of SiC particle size and process parameters on the microstructure and hardness of AZ91/SiC composite layer fabricated by FSP. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20(9), 2011.

[12] Tang, W and Reynolds, A P. Production of wire via friction extrusion of aluminum alloy machining chips. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(15):2231–2237, 2010.

[13] Zhang, Tielei, Ji, Zesheng, and Wu, Shuyan. Effect of extrusion ratio on mechanical and corrosion properties of AZ31B alloys prepared by a solid recycling process. *Materials & Design*, 32(5):2742–2748, 2011.

[14] Behnagh, Reza Abdi, Shen, Ninggang, Ansari, Mohammad Ali, Narvan, Morteza, Besharati Givi, Mohammad Kazem, and Ding, Hongtao. Experimental Analysis and Microstructure Modeling of Friction Stir Extrusion of Magnesium Chips. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(4):41008–41011, oct 2015.

[15] Sharifzadeh, Mohammad, Ansari, Mohammad Ali, Narvan, Morteza, Behnagh, Reza Abdi, Araee, Alireza, and Givi, Mohammad Kazem Besharati. Evaluation of wear and corrosion resistance of pure Mg wire produced by friction stir extrusion. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(6):1847–1855, 2015.

[16] Ansari, Mohammad Ali, Sadeqzadeh Naeini, Emadoddin, Besharati Givi, Mohammad Kazem, and Faragi, Ghader. Theoretical and Experimental Investigation of the Effective Parameters on the Microstructure of magnesium Wire Produced by Friction Stir Extrusion. *Modares Mechanical Engineering*, 15(6), 2015.

[17] Baffari, Dario, Buffa, Gianluca, Campanella, Davide, Fratini, Livan, and Reynolds, Anthony P. Process mechanics in Friction Stir Extrusion of magnesium alloys chips through experiments and numerical simulation. *Journal of Manufacturing Processes*, 29:41–49, 2017.

[18] Tahmasbi, Kamin and Mahmoodi, Masoud. Investigation of the effective parameters on the mechanical and structural properties of aluminum wire sample fabricated by friction stir extrusion. *Modares Mechanical Engineering*, 17(4):78–84, 2017.

[19] Abu-Farha, Fadi. A preliminary study on the feasibility of friction stir back extrusion. *Scripta Materialia*, 66(9):615–618, 2012.

[20] Li, X, Tang, W, and Reynolds, A P. *Material Flow and Texture in Friction Extruded Wire*, pp. 339–347. Springer International Publishing, Cham, 2016.

[21] Khorrami, Mahmoud Sarkari and Movahedi, Mojtaba. Microstructure evolutions and mechanical properties of tubular aluminum produced by friction stir back extrusion. *Materials & Design (1980-2015)*, 65:74–79, 2015.

[22] Behnagh, Reza Abdi, Mahdavinejad, Ramezanali, Yavari, Amin, Abdollahi, Masoud, and Narvan, Morteza. Production of Wire From AA7277 Aluminum Chips via Friction-Stir Extrusion (FSE). *Metallurgical and Materials Transactions B*, 45(4):1484–1489, aug 2014.

[23] Baffari, Dario, Buffa, Gianluca, Campanella, Davide, and Fratini, Livan. Design of continuous Friction Stir Extrusion machines for metal chip recycling: issues and difficulties. *Procedia Manufacturing*, 15:280–286, 2018.

[24] Jamali, Ghasem, Nourouzi, Salman, and Jamaati, Roohollah. Optimization of friction stir extrusion processing parameters for AA6063 aluminum alloy using Taguchi method. *Modares Mechanical Engineering*, 17(12):176–182, 2018.

[25] Beigi, Masoud Ahmad Khan, Karami, Javad Shahbazi, and Sheikhi, Mohammad Morad. Experimental and numerical study of friction stir back extrusion process for producing ultra-fine-grained tubes. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 3(2):34–44, 2017.

[26] Dinaharan, I, Sathiskumar, R, Vijay, S J, and Murugan, N. Microstructural Characterization of Pure Copper Tubes Produced by a Novel Method Friction Stir Back Extrusion. *Procedia Materials Science*, 5:1502–1508, 2014.