

ساخت مدار خنک‌کاری پاششی سیال برودتی دی‌اکسیدکربن در ماشین‌کاری

دانیال دیندار^۱، بهزاد جباری‌پور^{۲*}^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران^۲ استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران

*مسئول مکاتبات: beh.jabbaripour@iauctb.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

مدار برودتی دی‌اکسیدکربن
تراشکاری
سایش ابزار
توپوگرافی سطح قطعه‌کار
فولاد ضدزنگ 304L

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۴/۲۹
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۱۲/۲۰

کیفیت بالاتر قطعه‌کار و عمر طولانی‌تر ابزار از مهم‌ترین نیازهای ماشین‌کاری هستند که حرارت بیش از اندازه در ماشین‌کاری، تأثیر منفی بر آن‌ها می‌گذارد. معمولاً اعمال روش‌های خنک‌کاری مرسوم، کنترل مطلوبی بر دمای ماشین‌کاری را سبب نمی‌گردد، همچنین استفاده از آن‌ها اغلب مشکلات زیست محیطی را ایجاد می‌کند. اخیراً خنک‌کاری برودتی برای حل این مشکلات در ماشین‌کاری مورد توجه است. در تحقیق جاری یک مدار برودتی دی‌اکسیدکربن با توانایی نصب و تنظیم یک یا دو نازل خروجی سیال خنک‌کار در موقعیت‌های مختلف و همچنین توانایی تنظیم مقدار دبی سیال خنک‌کار طراحی و ساخته شد. مدار با یک نازل در موقعیت بالای ابزار برش (با ۸۰ درجه زاویه تند نسبت به سطح براده ابزار و ۲۰ mm فاصله خروجی نازل از نوک ابزار) و دبی ۱۲۱/min که طی بررسی حالات مختلف حاصل شدند، کمترین سایش و لبه انباشته ابزار و زبری سطح قطعه‌کار را با توجه به مقدار مصرف دبی کمتر ایجاد می‌کند. سپس این حالت تعیین شده از مدار، برای مقایسه با روش خشک به منظور بررسی روش برودتی و تأثیر آن استفاده شد. با کاربرد روش برودتی نسبت به خشک، مساحت سایش سطح آزاد اصلی ابزار (از حداقل ۰/۳۶٪ تا حداکثر ۳۳/۹۲٪)، لبه انباشته ابزار، زبری سطح قطعه‌کار (از حداقل ۵/۶۲٪ تا حداکثر ۵۶/۳۲٪) و عیوب سطح قطعه‌کار کاهش یافت.

۱ مقدمه

با دیگر روش‌های ماشین‌کاری انجام شده است، پرداخته می‌شود. در مورد مدار برودتی نیتروژن مایع مانند شکل ۱ که در مرجع [۲] استفاده شده است، معمولاً از یک مخزن عایق برای نگه‌داری نیتروژن مایع استفاده می‌شود. مخزن با یک درب اصلاح شده که دارای یک لوله ورودی و یک لوله خروجی است بسته می‌شود. لوله ورودی به منظور اعمال هوای فشرده به داخل مخزن است. هوای فشرده از کمپرسور، به کمک شیلنگ پنوماتیک، به داخل مخزن وارد می‌شود. یک خشک‌کن به خروجی کمپرسور متصل می‌شود که به منظور حذف رطوبت اضافی هوا قبل از ورود هوا به مخزن است. یک رگلاتور فشار^۱ و یک شیر اطمینان فشار در ورودی مخزن نصب شده است که به منظور ایجاد فشار مورد نیاز ورودی به مخزن و برای متعادل کردن فشار داخل مخزن در صورت تجاوز از حد معین است. لوله خروجی درب مخزن به یک شیلنگ انعطاف‌پذیر از جنس فولاد ضدزنگ متصل می‌شود و در طرف دیگر این شیلنگ نازلی برای اعمال نیتروژن مایع قرار می‌گیرد. شیلنگ انعطاف‌پذیر فولاد ضدزنگ با فوم پلیمری عایق می‌شود که از کاهش دمای نیتروژن مایع هنگامی که از طریق شیلنگ انتقال می‌یابد جلوگیری شود. هوای فشرده‌ای که وارد مخزن می‌شود، نیتروژن مایع را فشرده و آن را از شیلنگ فولاد ضدزنگ سیلان می‌دهد تا اینکه از طریق نازل به ناحیه برش برسد.

در صورتی که مخزن نیتروژن مایع، یک دوئر^۲ نیتروژن مایع باشد، نیازی به ساخت مداری مانند آنچه گفته شد نیست، به دلیل این‌که اجزای مدار بر روی دوئر توسط شرکت سازنده آن، مهیا شده است.

از آنجا که در فرآیندهای ماشین‌کاری سعی بر بهبود کیفیت تولید و کاهش هزینه است، بنابراین تحقیق برای دستیابی هم‌زمان به کیفیت بهتر قطعه‌کار (زبری سطح کمتر) و عمر بیشتر ابزار (سایش کمتر ابزار) به منظور رسیدن به راندمان بالاتر ضروری است. در ماشین‌کاری، افزایش گرمای تولید شده در منطقه برش، چنانچه بیش از اندازه باشد (که این افزایش بیش از اندازه غالباً به دلایلی از جمله استحکام بالاتر ماده قطعه‌کار، گرمای ویژه پایین‌تر ماده قطعه‌کار، ضریب هدایت حرارتی پایین‌تر ماده قطعه‌کار و افزایش سرعت برشی، پیشروی و عمق برش است)، تأثیر نامطلوبی بر قطعه‌کار و ابزار برش می‌گذارد [۱]. این مشکلات موانعی برای افزایش نرخ براده‌برداری در فرآیندهای ماشین‌کاری است. برای حل این مشکلات باید روشی از خنک‌کاری انتخاب شود که دما را تا حد قابل توجهی کاهش داد و از طرفی به علت ملاحظات زیست محیطی و سلامت اپراتور، روش مورد استفاده باید کاملاً ایمن باشد. تکنیک خنک‌کاری نوین برودتی، روشی است که می‌تواند در ماشین‌کاری تا حدود زیادی این نیازها را برآورده سازد و بسیاری از مشکلات دیگر روش‌های خنک‌کاری متداول فعلی را ندارد. لازم به ذکر است، علم کرایونیک (برودتی) به بررسی و استفاده از مواد در دماهای بسیار پایین می‌پردازد. حال به بررسی پیشینه مدارهای برودتی ساخته شده و تحقیقاتی که در رابطه با تأثیر خنک‌کاری برودتی بر روی ابزار و قطعه‌کار در مقایسه

¹pressure regulator ²Dewar

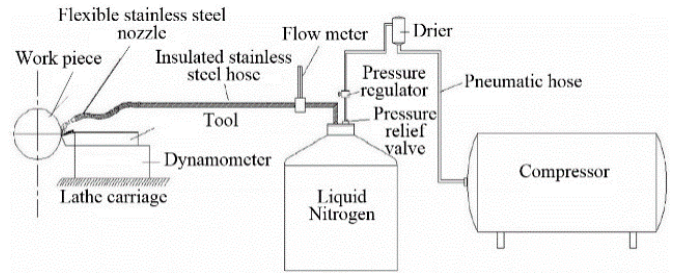
مقدار فاز مارتنزیت تشکیل شده روی سطح قطعه کار نیز به واسطه خنک کاری برودتی CO_2 افزایش یافت. همچنین سختی سطح ماشین کاری شده در حالت برودتی نسبت به سختی سطح قبل از ماشین کاری، تا دو برابر افزایش یافت. جرالد و همکاران [۵] تأثیر خنک کاری برودتی با CO_2 به روش پاشش مستقیم را بر دمای برش، نیروی برشی، سایش ابزار، زبری سطح و ریخت شناسی براده در مقایسه با ماشین کاری خشک و تر در تراشکاری قطعه کار به جنس فولاد ضدزنگ AISI316 تحقیق کردند. آن‌ها دریافتند که در ماشین کاری CO_2 در مقایسه با ماشین کاری تر و خشک، دمای برش به ترتیب (حداکثر) تا حدود ۳۵٪ و ۵۰٪ کاهش یافته، صافی سطح قطعه کار ماشین کاری شده به ترتیب (حداکثر) در حدود ۵۲٪ و ۵۷٪ افزایش یافته، نیروهای برشی کاهش یافته، مقدار سایش ابزار در ناحیه سطح براده و سطح آزاد آن کاهش یافته و از طرفی هم قابلیت شکست براده بهتر و شکل مطلوبتری برای براده‌ها ایجاد شده است. جرالد و همکاران در تحقیقی دیگر [۲] مقایسه تجربی خنک کاری‌های برودتی CO_2 ، LN_2 و تر را در تراشکاری فولاد AISI1045 انجام دادند. آن‌ها دریافتند که خنک کاری برودتی CO_2 ، نیروهای برشی، صافی سطح، سایش ابزار و کنترل براده بهتری را نسبت به ماشین کاری تر و LN_2 برودتی نتیجه داده است.

ویکا و همکاران [۶] تأثیر خنک کاری برودتی CO_2 را در فرزکاری $Ti-6Al-4V$ بر روی پارامترهای خروجی عمر ابزار و نیروی ماشین کاری بررسی نمودند. آزمایشهای آنها نشان داد که در سرعت برشی ۶۰ متر بر دقیقه، هنگامی که بار براده کنترل شود، افزایش قابل توجهی در عمر ابزار به واسطه خنک کاری هیبریدی CO_2 و MQL در مقایسه با ماشین کاری تر ایجاد می‌شود. در حالی که نیروهای ماشین کاری تغییر محسوسی ندارند. همچنین آنها دریافتند که توانایی خنک کاری سیال برودتی CO_2 در سطوح بسیار بالای سرعت برشی و نرخ پیشروی محدود می‌شود و بهبودی در عمر ابزار ایجاد نمی‌کند و حتی به واسطه زیاد شدن نرخ سایش ابزار در این حالت علیرغم استفاده از سیال برودتی، نیروهای ماشین کاری افزایش می‌یابند.

ماگادوم و همکاران [۷] تراشکاری فولاد ضدزنگ ۳۰۴ را با استفاده از ابزار کاربیدی پوشش دار تحت روش برودتی و روش مرسوم سیلابی انجام دادند. آن‌ها دریافتند که به کارگیری نیتروژن مایع به عنوان خنک کار نسبت به روش مرسوم سیلابی موجب کاهش قابل توجه سایش ابزار، کاهش نیروی برشی و بهبود صافی سطح می‌شود.

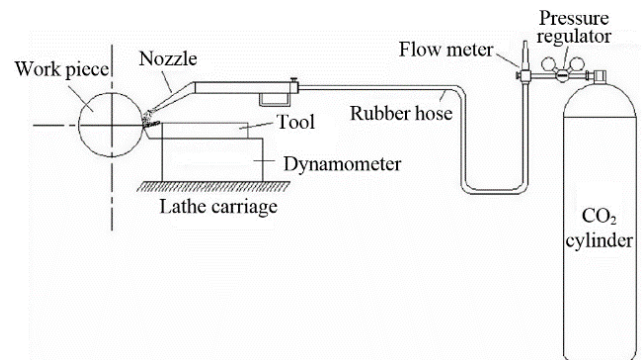
آمبرلو و همکاران [۸] تأثیر خنک کاری برودتی بر یکپارچگی سطح فولاد آبدیده AISI52100 را بررسی کردند. آزمایشات تحت شرایط خشک و برودتی با استفاده از اینسرت ابزارهای برشی پخ خورده CBN انجام شدند. نتایج آن‌ها نشان داد که شرایط خنک کاری برودتی ضخامت لایه سفید را کاهش می‌دهد و در مقابل، ماشین کاری خشک لایه سفید ضخیم تری را ایجاد می‌کند، که برای عملکرد و هزینه مرتبط با محصول (که عملیات ثانویه برای برداشت آن نیاز است) نامطلوب است. همچنین بیان کردند که خنک کاری برودتی، جنبه‌های متعددی از یکپارچگی سطح قطعاتی که ماشین کاری دشوار دارند را بهبود می‌بخشد.

بامیری [۹] تأثیر هر یک از روش‌های خشک، مرطوب (آب و صابون)



شکل ۱: شماتیکی از مدار ماشین کاری برودتی نیتروژن مایع [۲].

در مورد مدار برودتی دی‌اکسیدکربن مانند شکل ۲ که در مرجع [۲] استفاده شده است، معمولاً از یک کپسول برای نگهداری دی‌اکسیدکربن استفاده می‌شود. در خروجی کپسول یک رگلاتور فشار به منظور کنترل فشار نصب می‌شود. در کنار رگلاتور یک دبی سنچ دی‌اکسیدکربن برای اندازه‌گیری مقدار دبی خنک کار نصب می‌شود. شیلنگی از یک طرف به خروجی دبی سنچ و از طرف دیگر به سرپیک جوشکاری متصل می‌شود. سرپیک جوشکاری دارای یک شیر به منظور کنترل یا متوقف کردن جریان سیال است. خروجی سرپیک جوشکاری به سمت موضع برش قرار می‌گیرد.



شکل ۲: شماتیکی از مدار ماشین کاری برودتی دی‌اکسیدکربن [۲].

لازم به ذکر است که خنک کاری برودتی با استفاده از دی‌اکسیدکربن نسبت به نیتروژن مایع، تجهیزات ارزان تری برای به کارگیری لازم دارد که از مزایای این روش است.

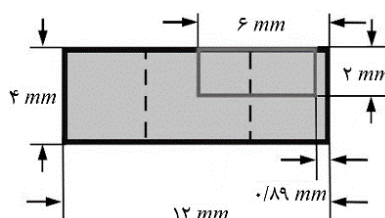
پیتلا و همکاران [۳] در مطالعه‌ای فرآیند فرزکاری انگشتی بر روی $Ti-6Al-4V$ به کمک سیال برودتی CO_2 را بررسی نمودند. فرزهای انگشتی مورد استفاده دارای مسیر (کانال) خنک کاری داخلی برای تزریق سیال CO_2 از طریق اسپیندل ماشین ابزار بودند. استفاده از سیال برودتی CO_2 سبب بهبود عمر ابزار و کاهش قابل توجه سایش ابزار شد. همچنین آنها دریافتند که در عمق برشی بالا راندمان خنک کاری سیال برودتی، مناسب نمی‌باشد و نسبت به سطوح پایین تر عمق برش، علیرغم استفاده از این سیال، لب پر شدن ابزار به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

هوتز و همکاران [۴] در تحقیقی، آزمایش‌های تراشکاری برودتی به کمک سیال CO_2 را طراحی نمودند تا دمای موضع برش در حین براده برداری را در سطح پایینی کنترل کنند و از بروز ارتعاشات ناخواسته جلوگیری کنند. آنها با تغییر زاویه براده ابزار و نرخ پیشروی به همراه مقدار متناسب پاشش سیال برودتی CO_2 ، تنش‌های ترمودینامیکی را در سطح قطعه کار به گونه‌ای کنترل کردند که دمای برش در موضع ماشین کاری کاهش یافت. همچنین

۲ تجهیزات، تنظیمات و طراحی آزمایش‌ها

جنس قطعه‌کار در تحقیق جاری فولاد ضدزنگ آستنیتی 304L است. ابزار برش مورد استفاده، الماسه (اینسرت) کاربایدی پوشش‌دار CNMG 120412-DM و با گرید YBM 251-M10-M30 (با توجه به کاتالوگ شرکت سازنده ZCC چین) است. علیرغم صرف هزینه زیاد به منظور تخمین دقیق میزان سایش ابزار، در هر یک از آزمون‌های تراشکاری از یک لبه اینسرت جدید استفاده شده است. ابزارگیر مورد استفاده ساخت شرکت AKKO و با مشخصات PCLNL 2525 M 12 C است. ماشین ابزار مورد استفاده، یک ماشین تراش کنترل عددی کامپیوتری (CNC) با مدل TC-20 است. کنترلر مورد استفاده دستگاه FANUC است.

برای ارزیابی خرابی‌های ابزار و توپوگرافی سطح قطعه‌کار از میکروسکوپ‌های نوری استفاده شده است. در تصاویری از ابزار که دارای بزرگ‌نمایی ۲۰ برابر هستند، از میکروسکوپ نوری استریو Olympus SZX16 استفاده شده است. در تصاویری از سطح ماشین‌کاری شده قطعه‌کار که دارای بزرگ‌نمایی ۵۰ برابر هستند، از میکروسکوپ نوری Olympus BX51M استفاده شده است. برای ارزیابی زبری سطح قطعه روتراشی شده، از دستگاه زبری‌سنج تیپور هابسون سارترونیک ۲۵^۲ استفاده شده است. دقت دستگاه $0.1 \mu\text{m}$ و طول اندازه‌گیری برای هر نمونه زبری‌سنجی 4 mm است. در تمام آزمایش‌های انجام‌شده، سایش سطح آزاد اصلی ابزار به صورت کمی (عددی) از طریق محاسبه مساحت آن، برای تمام آزمایش‌ها بررسی شده‌اند. محدوده‌ای که این مساحت محاسبه می‌شود، مستطیلی به اندازه تقریباً یک چهارم کل سطح آزاد اصلی ابزار است، همان‌طور که در شکل ۳ این محدوده مشخص شده است. لازم به ذکر است ابعاد تعیین شده در شکل ۳ کاملاً بر اساس مشخصات هندسی کد اینسرت ابزار مصرفی استفاده شده در این تحقیق لحاظ شده‌اند. بدیهی است که این محدوده، چارکی است که نوک ابزار در آن سمت باشد. برای اندازه‌گیری کمی و تخمین مساحت ناحیه سایش سطح آزاد اصلی ابزار بر روی تصاویر گرفته شده از اینسرت‌های ابزار با میکروسکوپ نوری در بزرگ‌نمایی ۲۰ برابر، از نرم‌افزار Image J استفاده شده است.



شکل ۳: ابعاد نمای جانبی ابزار و محدوده‌ای که مساحت سایش سطح آزاد ابزار در آن محاسبه می‌شود.

آزمایش‌ها طی دو طرح آزمایش جداگانه انجام شده‌اند. طراحی آزمایش انجام‌شده در هر یک از مراحل اول و دوم، طرح سطح پاسخ اپتیمال^۵ بوده است. در آزمایشات مرحله اول که به منظور دستیابی به دبی و روشی از پاشش سیال برودتی CO₂ (بهترین حالت مدار) که در آن‌ها مشخصه‌های

و برودتی با استفاده از نیتروژن مایع را بر سایش ابزار در تراشکاری فولاد CK45 با الماسه کاربایدی روکش‌دار مورد بررسی تجربی قرار داد. نتایج او نشان داد که در ماشین‌کاری برودتی، سایش ابزار به‌طور قابل‌توجهی کاهش و طول عمر آن به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است و بنابراین هزینه مربوط به ابزار برش را کاهش می‌دهد. همچنین بیان داشت که به دلیل کاهش بیشتر دمای منطقه برش در حالت برودتی، می‌توان با سرعت برشی بالاتری عملیات ماشین‌کاری را انجام داد که نتیجه آن کاهش زمان ماشین‌کاری و به دنبال آن کاهش هزینه ماشین‌کاری خواهد بود.

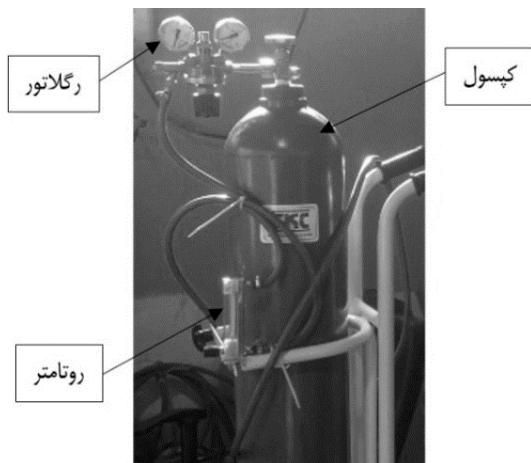
جنس قطعه‌کاری که در این تحقیق مورد ماشین‌کاری قرار می‌گیرد فولاد ضدزنگ آستنیتی 304L که دارای ضریب هدایت حرارتی پایین است، انتخاب شده است تا بتوان از آن به عنوان نمونه‌ای از مواردی که در ماشین‌کاری آن‌ها دمای بالا ایجاد می‌شود، استفاده کرد. بیشتر تحقیقات انجام شده در حوزه ماشین‌کاری برودتی مربوط به استفاده از نیتروژن مایع (با دمای 196°C -) بوده است، تحقیقات بسیار محدودی با استفاده از سیال برودتی دی‌اکسیدکربن (با دمای $5/78^\circ\text{C}$ -) در فرآیندهای ماشین‌کاری انجام شده است. بر اساس آخرین اطلاع نویسندگان، تا کنون هیچ تحقیقی در خصوص طراحی و ساخت مدار برودتی دی‌اکسیدکربن و همچنین مقایسه تراشکاری برودتی دی‌اکسیدکربن با روش تراشکاری خشک بر روی فولاد ضدزنگ 304L گزارش نشده است. لذا به دلیل خلاء تحقیقاتی در این حوزه‌ها، در این مطالعه تجربی به چگونگی طراحی و ساخت یک نوع مدار خنک‌کاری سیال برودتی دی‌اکسیدکربن در کنار بررسی سایش و لبه‌انباشته^۲ ابزار و زبری و عیوب سطح قطعه‌کار در فرآیند تراشکاری فولاد پرکاربرد ضدزنگ 304L با روش خنک‌کاری برودتی دی‌اکسیدکربن در مقایسه با روش خشک پرداخته می‌شود. از دیگر جنبه‌های نوآوری مطالعه جاری، استفاده از مساحت منطقه سایش سطح آزاد اصلی ابزار به عنوان معیاری کمی برای بررسی سایش ابزار است.

اهداف و روند عملی که در این تحقیق دنبال می‌شوند: طراحی و ساخت مدار برودتی دی‌اکسیدکربن با کارکرد صحیح که در آن توانایی نصب و تنظیم یک یا دو نازل خروجی سیال خنک‌کار در موقعیت‌های مختلف و همچنین توانایی تنظیم مقدار دبی سیال خنک‌کار را داشته باشد سپس باید طی آزمایشاتی که بهترین حالت از مدار را با توجه به تنظیم مقدار دبی سیال و تعداد و موقعیت نازل(ها) که کم‌ترین زبری سطح قطعه‌کار، مساحت سایش سطح آزاد اصلی ابزار و لبه‌انباشته ابزار را در کنار دبی کمتر مصرفی سیال به صورت هم‌زمان ایجاد می‌کند، تعیین کرد و از بهترین حالت حاصل از مدار در آزمایشاتی دیگر به منظور تعیین مفید بودن مدار برودتی ساخته شده، استفاده کرد. برای بررسی مفید بودن روش برودتی بدین صورت عمل می‌شود که آزمایشاتی با شرایط برشی یکسان تحت روش‌های برودتی و خشک انجام می‌شود و با بررسی و مقایسه سایش و لبه‌انباشته ابزار و زبری و عیوب سطح قطعه‌کار حاصل از روش‌های برودتی و خشک، روش برتر مشخص می‌شود. لازم به ذکر است استفاده از روش خشک که یک روش معمول است، به عنوان معیاری برای بررسی و مقایسه با تراشکاری برودتی در نظر گرفته شده است.

³built-up edge (BUE) ⁴Taylor Hobson Surtronic 25 ⁵optimal response surface method

۱.۳ طراحی و ساخت مدار برودتی دی اکسیدکربن

در این بخش چالش‌های حین طراحی و ساخت مدار، تدابیر اندیشیده شده برای آن‌ها و در نهایت ارائه مدار طراحی و ساخته شده مطرح می‌شود. به‌طور کلی مدار باید شامل یک منبع تأمین‌کننده سیال و نگاهداری آن، تجهیزاتی جهت کنترل جریان سیال و تحویل‌دهی سیال به ناحیه ماشین‌کاری باشد. در این تحقیق برای تأمین و نگاهداری دی اکسیدکربن از یک کپسول میل‌آب‌دار استفاده شده است. در اولین مدار طراحی و ساخته شده، برای کنترل جریان سیال از یک رگلاتور فشار و یک دبی‌سنج (روتامتر^۶) استفاده شد. همچنین برای متمرکز کردن پاشش سیال، یک سرپیک جوشکاری در انتهای خروجی نازل به‌کار گرفته شد. لازم به ذکر است که در این مدار برای نازل از شیلنگ معمولی استفاده شده است. بعد از راه‌اندازی مدار پی برده شد که مقدار دبی خروجی حتی در صورت استفاده از تمام قابلیت روتامتر، بسیار ناچیز است. این مطلب بدون وجود سرپیک همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است نیز بررسی شد، ولی همان نتیجه قبل را داشت. بنابراین در صورت استفاده از این روتامتر در مدار نمی‌توان به خنک‌کاری که در ماشین‌کاری کارا باشد، دست یافت. در نتیجه به دلیل این مشکلات، از به‌کارگیری روتامتر در مدار صرف نظر شد.



شکل ۴: مدار با یک خروجی شامل کپسول، رگلاتور، روتامتر.

بنابراین گیج^۷ فلومتر با گستره وسیع‌تر ۰ تا ۶۰ l/min به منظور اندازه‌گیری دبی تهیه گردید. ترتیب نصب اجزای این مدار همانند مدار قبلی است با این تفاوت که در این مدار که در شکل ۵ نشان داده شده است، گیج دبی‌سنج به‌جای روتامتر به‌کار گرفته شده است. مداری که تا اینجا بررسی شد تنها یک خروجی دارد. برای این‌که بتوان خنک‌کاری را در ماشین‌کاری، در صورت نیاز در دو جهت مختلف و دلخواه از پاشش به طور هم‌زمان انجام داد، باید دو خروجی از سیال دریافت نمود، که برای این منظور از یک سهراهی استفاده شد. برای این‌که امکان تنظیم زاویه انتهای نازل راحت‌تر باشد، در ابتدا شیلنگ آب و صابون (خرطومی) به دو طرف سهراهی متصل شد (شکل ۶). پس از باز کردن مدار پی برده شد که به دلیل ساختار این شیلنگ‌ها، نشستی وجود دارد. در نتیجه از این نازل‌ها استفاده نشد و به‌کارگیری شیلنگ‌های معمولی با دو سرپیک در انتهای آن‌ها ترجیح داده شد (شکل ۷).

زبری سطح قطعه‌کار، مساحت سایش سطح آزاد اصلی ابزار و لبه انباشته ابزار با توجه به دبی کمتر مصرفی سیال، به صورت هم‌زمان حداقل ممکن باشند، دبی‌ها و روش‌های مختلفی از پاشش در نظر گرفته شد. دبی در سه مقدار مختلف ۱۲، ۱۸ و ۲۴ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شده است. روش پاشش در پنج حالت مختلف با توجه به تعداد یک یا دو نازل و موقعیت‌های مختلف از قرارگیری نازل نسبت به موضع برش تحت زوایا و فواصل متفاوت در بالا یا پایین ابزار برشی در نظر گرفته شده است. در طرح آزمایش مرحله اول، به دلیل در نظر گرفتن پنج روش متفاوت پاشش و سه مقدار مختلف دبی، تعداد کل آزمون‌ها ۱۵ عدد است. در طی تمام آزمایشات تراشکاری مرحله اول، پارامترهای برشی در محدوده متوسطی (نه خشن و نه پرداخت) به صورت ثابت تنظیم گردیدند. پارامترهای برشی شامل سرعت برشی ۷۰ m/min، سرعت پیشروی ۰/۱۵ mm/rev و عمق برش شعاعی ۱ mm است. این پارامترهای برشی بر اساس انجام پیش‌آزمون‌های اولیه به صورت تجربی انتخاب شدند. در آزمایشات مرحله اول، بر روی هر نمونه قطعه‌کار به منظور رسیدن به حد مناسبی از سایش ابزار، روتراشی در ده پاس انجام شده است که طول هر پاس ۷۰ mm است و در نتیجه طول برش کلی برای هر نمونه قطعه‌کار برابر با ۷۰۰ mm است.

در آزمایشات مرحله دوم که به منظور بررسی مفید بودن روش خنک‌کاری برودتی انجام شده است، از بهترین تنظیمات حاصل از مدار که در آزمایشات مرحله قبل حاصل شد برای بررسی و مقایسه با روش خشک از لحاظ سایش و لبه انباشته ابزار و زبری و عیوب سطح قطعه‌کار استفاده شده است. در طرح آزمایش مرحله دوم، به دلیل در نظر گرفتن هر یک از پارامترهای برشی در سه سطح مختلف (سرعت برشی (m/min): ۴۰، ۹۰ و ۱۴۰، پیشروی (mm/rev): ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳، عمق برش شعاعی (mm): ۰/۵، ۱/۵ و ۲) تعداد آزمون‌ها ۹ عدد برای هر یک از روش‌های خشک و برودتی است و مجموعاً تعداد ۱۸ عدد آزمون در این مرحله انجام شد. در آزمایشات مرحله دوم، بر روی هر نمونه قطعه‌کار، روتراشی در پنج پاس انجام شده است که طول هر پاس ۷۰ mm است و در نتیجه طول برش کلی برای هر نمونه قطعه‌کار برابر با ۳۵۰ mm است. آزمایشات تحت هر دو روش خشک و برودتی انجام شده است. طرح آزمایشات مرحله دوم در جدول ۱ به همراه نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقادیر مساحت سایش سطح آزاد اصلی و آزمایشات زبری‌سنجی نشان داده شده است.

فشار مدار برودتی در تمام آزمایش‌های برودتی مراحل اول و دوم بر روی مقدار ثابت ۷۲ bar تنظیم و به کار گرفته شده است. برای هر یک از آزمون‌های تراشکاری (روتراشی) در هر دو مرحله، یک نمونه قطعه‌کار به شکل میلگردی به طول ۱۰۵ mm و قطر ۳۰ mm استفاده گردید. لازم به ذکر است، تمامی میلگردها قبل از انجام آزمایشات اصلی طراحی شده، دو طرف آن‌ها پیشانی تراشی گردیده بودند. برای هر آزمون ماشین‌کاری طول ۲۰ mm از میل‌گرد داخل سه‌نظام قرار می‌گیرد.

۳ بحث و تحلیل

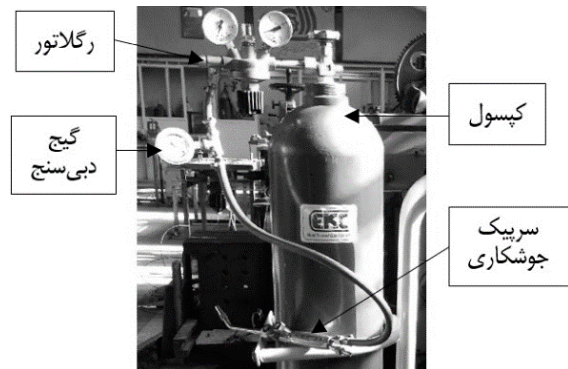
^۶rotameter ^۷gauge

جدول ۱: جدول طرح آزمایش مرحله دوم به همراه نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقادیر مساحت سایش سطح آزاد اصلی و آزمایشات زبری‌سنجی.

شماره آزمون	سرعت برشی (m/min)	سرعت پیشروی (mm/rev)	عمق برش شعاعی (mm)	مساحت سایش، خشک، (mm ²)	مساحت سایش، برودتی، (mm ²)	درصد بهبود مساحت سایش (برودتی نسبت به خشک)	زبری سطح، خشک، (μm)	زبری سطح، برودتی، (μm)	درصد بهبود زبری سطح (برودتی نسبت به خشک)
۱	۴۰	۰/۱۱	۰/۵	۰/۱۲۶	۰/۱۱۴	۹/۵۲٪	۱/۱۶	۱/۰۹	۶/۰۳٪
۲	۴۰	۰/۲	۱/۵	۸/۳۳۷	۷/۲۹۸	۱۲/۴۶٪	۱/۵۶	۱/۱۳	۲۷/۵۶٪
۳	۴۰	۰/۳	۲	۸/۵۵۰	۷/۵۷۴	۱۱/۴۱٪	۱/۷۷	۱/۲۰	۳۲/۲۰٪
۴	۹۰	۰/۱	۱/۵	۹/۰۲۷	۸/۹۹۴	۰/۳۶٪	۴/۸۳	۳/۹۰	۱۹/۲۵٪
۵	۹۰	۰/۲	۲	۷/۶۹۶	۷/۱۷۵	۶/۷۷٪	۱/۸۷	۰/۹۰	۵۱/۸۷٪
۶	۹۰	۰/۳	۰/۵	۰/۵۱۸	۰/۴۱۰	۲۰/۸۵٪	۱/۲۲	۰/۸۵	۳۰/۳۳٪
۷	۱۴۰	۰/۱	۲	۸/۲۱۹	۵/۴۳۱	۳۳/۹۲٪	۱۰/۶۸	۷/۹۸	۲۵/۲۸٪
۸	۱۴۰	۰/۲	۰/۵	۰/۰۷۴	۰/۰۶۴	۱۳/۵۱٪	۳/۴۸	۱/۵۲	۵۶/۳۲٪
۹	۱۴۰	۰/۳	۱/۵	۸/۷۰۲	۶/۵۷۹	۲۴/۴۰٪	۸/۰۱	۷/۵۶	۵/۶۲٪

حال به منظور اندازه‌گیری دما و فهمیدن این که آیا دمای خروجی مدار دمای برودتی (زیر صفر درجه سانتی‌گراد) است یا خیر، از ترموستات^۸ و آشکارساز دمای مقاومتی^۹ استفاده شد. آشکارساز دمای مقاومتی به دلیل ماهیتش به تدریج دمای تغییر می‌کند، بنابراین برای مدتی باید مدار را باز گذاشت. ولی با باز گذاشتن مدار پس از مدتی، سیال به صورت پیوسته خارج نمی‌شود. عدم پیوستگی خروج سیال باعث می‌شود که جریان آن غیر قابل پیش‌بینی و در نتیجه خنک‌کاری ناپیوسته باشد. دلیل به وجود آمدن این مشکلات یخ‌زدگی داخل رگلاتور پیش‌بینی می‌شود.

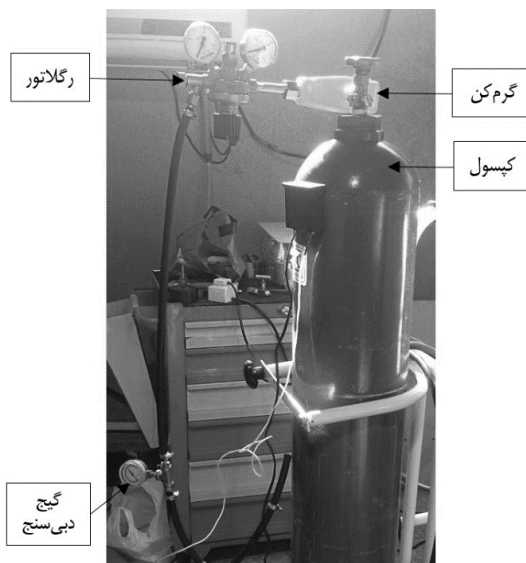
به هر حال با مشکل عدم پیوستگی خروج سیال مواجه شده که به منظور حل این مشکل گرم‌کنی مطابق شکل ۸ بعد از خروجی کپسول و قبل از رگلاتور نصب شد. با راه‌اندازی این مدار، رگلاتور گرم و دیرتر دچار یخ‌زدگی داخلی شد. در نتیجه مدار مدت زمان طولانی‌تری (حدود ۱ دقیقه و ۳۰ ثانیه) پیوستگی خروج سیال را نسبت به هنگامی که گرم‌کن وجود نداشت، حفظ کرد. ولی این مدار هم پس از مدتی پیوستگی خود را از دست داد.



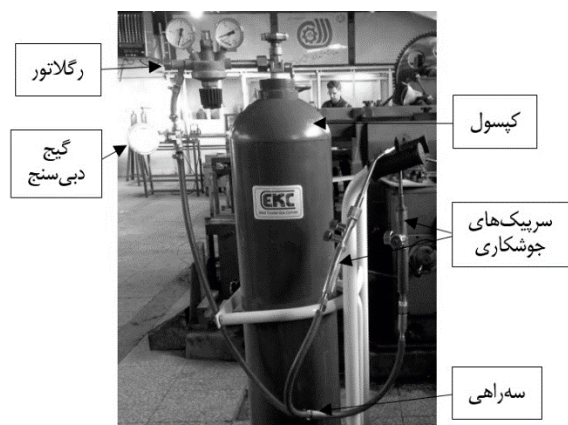
شکل ۵: مدار با یک خروجی شامل کپسول، رگلاتور، گیج دبی‌سنج و سرپیک.



شکل ۶: مدار با دو خروجی شامل کپسول، رگلاتور و گیج دبی‌سنج.



شکل ۸: نصب گرم‌کن بعد از خروجی کپسول و قبل از رگلاتور. مدار با دو خروجی شامل کپسول، گرم‌کن، رگلاتور، گیج دبی‌سنج.



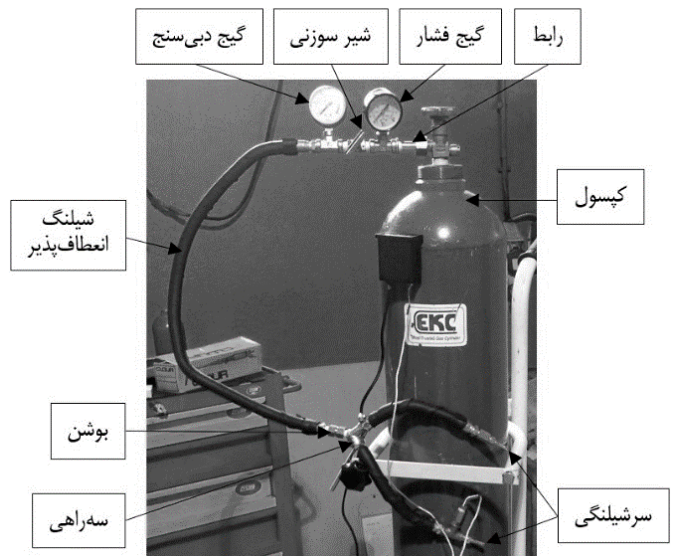
شکل ۷: مدار با دو خروجی شامل کپسول، رگلاتور، گیج دبی‌سنج و سرپیک‌های جوشکاری.

به منظور رفع مشکل متناوب بودن خروج سیال و ایجاد پیوستگی

⁸thermostat ⁹resistance temperature detector

سیال به صورت ترکیب گاز و یخ خشک و با پیوستگی از سرپیک خارج شد، ولی پس از مدتی سیال با تناوب از سرپیک خارج می‌شد که علت این ناپیوستگی را می‌توان تجمع یخ خشک در داخل سرپیک و بسته شدن مسیر عبور آن دانست. در نتیجه تصمیم به جدا کردن سرپیک گرفته شد که در این حالت (مدار شکل ۹)، سیال به صورت پیوسته تحویل می‌یابد.

برای مدار نهایی، با توجه بیشتر به اجزایی که مدار به دست آمده شکل ۹ را تشکیل می‌دهند، پی برده شد که حذف یک گیج فشار و یک شیر سوزنی، تأثیر خاصی بر مدار ندارد. همچنین برای حل مشکل عدم انعطاف‌پذیری شیلنگ فشار قوی (با جنس مرکب از پلاستیک و الیاف فولاد)، آن را با شیلنگ انعطاف‌پذیر با جنس فولاد ضدزنگ که تحمل فشار بیش از ۱۰۰ bar را دارد، جایگزین کرده. از طرفی، برای متمرکز کردن خروج سیال، در انتهای شیلنگ سرشیلنگی نصب شده است. این تغییرات در مدار شکل ۱۱ اعمال شده است. در نهایت مداری که پس از انجام بسیاری آزمون و خطا و عیب‌یابی حاصل شد، همان طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، شامل کپسول، گیج فشار، شیر سوزنی، گیج دبی‌سنج، نازل انعطاف‌پذیر و سرشیلنگی است. از این مدار می‌توان یک یا دو خروجی به صورت پیوسته تحویل گرفت. در مورد مشخصات برخی از اجزای مدار لازم به ذکر است که کپسول CO₂ شامل لوله سیفون^{۱۰}، شیر اطمینان و شیر قطع و وصل جریان است که از درجه فشار ۸۰ bar و گیج دبی‌سنج حداکثر دبی ۶۰ l/min را اندازه‌گیری می‌کنند.



شکل ۱۱: مدار با دو خروجی شامل کپسول، گیج فشار، شیر سوزنی، گیج دبی‌سنج، سرشیلنگی. نحوه اندازه‌گیری دما نیز نمایان است.

۲.۳ تعیین بهترین حالت مدار برودتی

آزمایشات مرحله اول، بهترین حالت مدار (روشی از پاشش سیال و دبی از سیال که مساحت سایش سطح آزاد اصلی ابزار، لبه انباشته ابزار و زیری سطح قطعه‌کار را با توجه به مقدار مصرف پایین‌تر دبی پاشش سیال CO₂ به کمترین مقدار خود می‌رساند) را تعیین کرد. با اجرای طرح آزمایشات مرحله اول، سطوحی از عوامل روش خنک‌کاری و دبی که بهترین حالت مدار را نتیجه

دائمی در خروج مواد برودتی و در نتیجه داشتن خنک‌کاری پیوسته در حین ماشین‌کاری و از طرفی هم در اختیار گرفتن جریان به طور کامل، رگلاتور را حذف کرده و مدار دیگری طراحی و ساخته شد. در این مدار، برای کنترل جریان سیال از شیرهای سوزنی، گیج‌های فشار و دبی‌سنج استفاده شد. این مدار که در شکل ۹ نشان داده شده است، مشکل تناوب بودن خروج سیال را رفع کرده و توانایی کار کردن به صورت پیوسته را دارد. به علاوه، شکل ۹ نحوه اندازه‌گیری دما را نشان می‌دهد. در مدار شکل ۹، ترموستات دما را پس از ۵ دقیقه ۷۲/۲- درجه سانتی‌گراد نشان داد (شکل ۱۰). لازم به ذکر است که در این مدار، برای نازل، از شیلنگ فشار قوی که جنس آن مرکب از پلاستیک و الیاف فولاد است، استفاده شد. دلیل جایگزینی شیلنگ‌های فشاری قوی (تحمل فشار بیشتر) با شیلنگ‌های معمولی، حذف رگلاتور فشار از مدار است که سبب می‌شود فشار بیشتری به شیلنگ اعمال شود. اما پس از استفاده از آن‌ها دریافت شد که این شیلنگ‌ها به دلیل سرمای شدید حاصل از عبور سیال برودتی، خشک می‌شوند و انعطاف‌پذیری لازم را پس از مدتی ندارند. در ادامه راه‌کار رفع این مشکل بیان شده است.



شکل ۹: مدار با یک خروجی شامل کپسول، گیج فشار اول، شیر سوزنی اول، گیج فشار دوم، شیر سوزنی دوم، گیج دبی‌سنج. نحوه اندازه‌گیری دما نیز نمایان است.

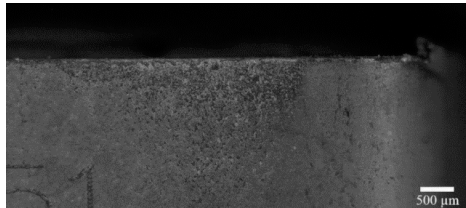


شکل ۱۰: نمایش دمای اندازه‌گیری شده ۷۲/۲- درجه سانتی‌گراد توسط ترموستات برای مداری که قابلیت تحویل سیال را به صورت پیوسته دارد.

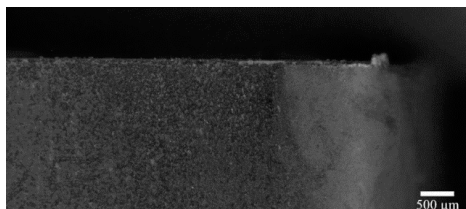
به منظور متمرکز کردن پاشش سیال برای مدار شکل ۹، سرپیک جوشکاری در انتهای خروجی نازل به‌کار گرفته شد. با راه‌اندازی مدار، ابتدا

¹⁰siphone tube

می‌دهند، روش خنک‌کاری با یک نازل در موقعیت بالای اینسرت برش (با ۸۰ درجه زاویه تند نسبت به سطح براده ابزار و ۲۰ mm فاصله خروجی نازل از نوک ابزار، شکل ۱۲) و دبی ۱۲۱/min تعیین شد. این سطوح انتخابی زبری سطح $0.95 \mu\text{m}$ و مساحت سایش سطح آزاد اصلی 0.408mm^2 را ایجاد کرده است و هیچگونه لبه انباشته‌ای تشکیل نداده است. بنابراین تمام آزمون‌های برودتی مرحله دوم، با استفاده از روش پاشش مشخص شده در شکل ۱۲ و دبی ۱۲۱/min که به کمک آزمون‌های مرحله اول تعیین شدند، انجام می‌شوند. لازم به ذکر است که در این روش پاشش (شکل ۱۲)، سیال مستقیماً به سطح براده، سطح آزاد اصلی و سطح آزاد فرعی اینسرت پاشیده می‌شود. البته چون سیال با فشار به سطح براده اینسرت برخورد می‌کند، بخشی از آن منحرف شده و به قطعه‌کار نیز اعمال می‌شود.



الف) حالت برودتی



ب) حالت خشک

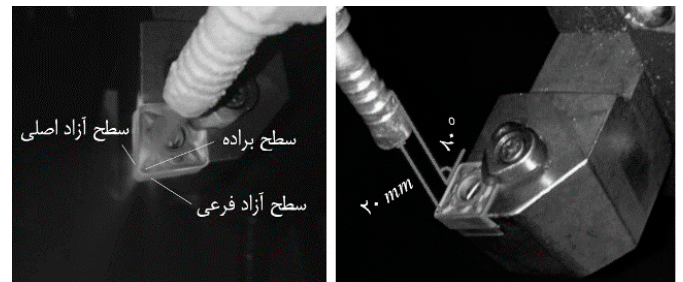
شکل ۱۳: سطح آزاد اصلی ابزار در آزمون ۷ تحت شرایط خشک و برودتی (X20).

۲.۳.۳ انباشتگی ماده بر نوک ابزار و سطح براده آن

در آزمایشات انجام شده، انباشتگی مواد بر روی نوک ابزار و سطح براده در حالت برودتی نسبت به حالت خشک پایین‌تر بوده است. به عنوان نمونه، شکل ۱۴، تصاویر حاصل از میکروسکوپ نوری از نوک ابزارهای استفاده شده در آزمون ۵ از جدول ۱ را تحت شرایط خشک و برودتی با بزرگ‌نمایی ۲۰ برابر نشان می‌دهد که در آن در روش خشک انباشتگی از ماده بر روی براده‌شکن تشکیل شده است، هم‌چنین در لبه برشی فرعی، لبه انباشته بزرگی تشکیل شده است. در حالی که با همان پارامترهای برشی آزمون ۵، با استفاده از روش برودتی، تشکیل انباشتگی ماده بر روی براده‌شکن کمتر بوده و لبه انباشته نوک ابزار به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

دلایل کاهش انباشتگی ماده بر لبه ابزار و هم‌چنین سطح براده در روش برودتی CO_2 نسبت به روش خشک در ادامه بیان شده است. در روش برودتی دمای سرد دی‌اکسیدکربن امکان جوش خوردن براده‌ها به ابزار را کاهش می‌دهد [۱۴]. از طرفی با نفوذ دی‌اکسیدکربن به فصل مشترک ابزار - براده، لایه گاز در ناحیه تماس ابزار و براده به عنوان روانکار عمل کرده و موجب کاهش ضریب اصطکاک و کاهش طول تماس بین ابزار - براده خواهد شد [۲، ۵، ۱۵]. این امر به دلیل کاهش چسبندگی و قدرت اتصالات ابزار و براده است [۵]. در واقع جریان سیال، میل ترکیبی (تمایل به تشکیل پیوند) مواد ابزار و قطعه‌کار و رسوب تدریجی لایه‌های براده قطعه‌کار را برای تشکیل انباشتگی ماده روی نوک ابزار یا سطح براده آن کاهش می‌دهد [۱].

شکل ۱۲: روش پاششی که با دبی ۱۲۱/min مدار را در بهترین حالت قرار می‌دهد. حال با استفاده از طرح آزمایشات مرحله دوم، هر دو روش خشک و برودتی از لحاظ سایش سطح آزاد اصلی ابزار، انباشتگی ماده بر نوک ابزار و سطح براده آن، زبری سطح قطعه‌کار و توپوگرافی سطح قطعه‌کار (از لحاظ عیوب سطحی) مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند.



شکل ۱۲: روش پاششی که با دبی ۱۲۱/min مدار را در بهترین حالت قرار می‌دهد.

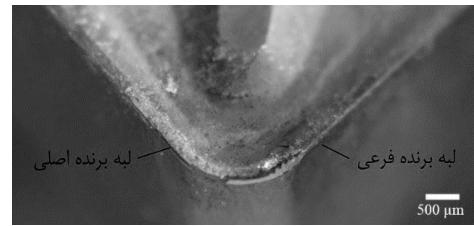
شکل ۳.۳ مقایسه روش برودتی و روش خشک

۱.۳.۳ سایش سطح آزاد اصلی ابزار

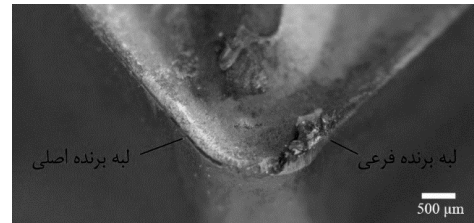
همان‌طور که قبلاً اشاره شد، برای بیان سایش سطح آزاد اصلی ابزار به صورت کمی (عددی) از مساحت آن استفاده شده است. نتایج مقادیر مساحت سایش سطح آزاد اصلی در جدول ۱ درج شده است که مقدار مساحتی از سطح آزاد اصلی ابزار است که در محدوده تعیین شده دچار سایش شده‌اند. در تمام آزمایشات انجام شده، مساحت سایش سطح آزاد اصلی قطعه‌کار در حالت برودتی نسبت به حالت خشک از حداقل ۳۶٪ تا حداکثر ۳۳/۹۲ درصد کاهش یافته است. به عنوان نمونه، شکل ۱۳، تصاویر حاصل از میکروسکوپ نوری از سطح آزاد اصلی ابزارهای استفاده شده در آزمون ۷ از جدول ۱ را تحت شرایط خشک و برودتی با بزرگ‌نمایی ۲۰ برابر نشان می‌دهد که در آن مساحت سایش کمتر حاصل از روش برودتی نسبت به خشک نمایان است. دلایل کاهش مساحت سایش سطح آزاد اصلی در روش برودتی CO_2 نسبت به روش خشک در ادامه بیان شده است. همان‌طور که از شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، سیال برودتی به‌گونه‌ای اعمال می‌شود که سطح آزاد اصلی ابزار و قطعه‌کار نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرند. سیال با کاهش دما و کاهش اصطکاک بین سطح آزاد ابزار و سطح قطعه تازه ایجاد شده که ساینندگی و چسبندگی را به‌وسیله کاهش اتصالات ماده قطعه‌کار با ابزار کم می‌کند،

عیوب مختلفی که در هنگام تولید قطعه در آن پدید می‌آید، ممکن است موجب نقصان یکپارچگی سطح آن شود از این رو به بررسی توپوگرافی سطح قطعه کار از لحاظ عیوب سطحی پرداخته شده است.

در تمام آزمایشات انجام شده، از علائم نمایان شده بر روی سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده خشک و برودتی مشخص شده است که سطح ایجاد شده توسط روش برودتی در مقایسه با روش خشک دارای عیوب کمتری بوده و سطحی بسیار همگن‌تر، یکنواخت‌تر و صاف‌تر ایجاد کرده است. به عنوان نمونه، شکل ۱۵، تصاویر حاصل از میکروسکوپ نوری از سطح قطعه‌کارهای ماشین‌کاری شده در آزمون ۱ از جدول ۱ را تحت شرایط خشک و برودتی با بزرگ‌نمایی ۵۰ برابر نشان می‌دهد که در آن عیوب (جرخوردگی، خراشیدگی، حفره و لبه انباشته) کمتری در روش برودتی نسبت به خشک ملاحظه می‌شود که در ادامه دلایل آن توضیح داده شده است.



(الف) برودتی



(ب) خشک

شکل ۱۴: ابزار آزمون ۵ تحت شرایط خشک و برودتی (X20).

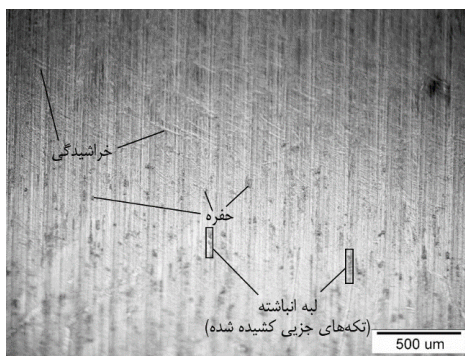
۳.۳.۳ زیری سطح قطعه‌کار

برای بیان زیری سطح، از مقدار متوسط حسابی (Ra) استفاده شده است. نتایج آزمایشات زیری‌سنجی در جدول ۱ نشان داده شده است که میانگین شش بار زیری‌سنجی برای هر قطعه‌کار حاصل از روش خشک یا برودتی است. در تمام آزمایشات انجام شده، زیری سطح در تراشکاری برودتی CO₂ نسبت به تراشکاری خشک، از حداقل ۵/۶۲ تا حداکثر ۵۶/۳۲ درصد کاهش یافته است.

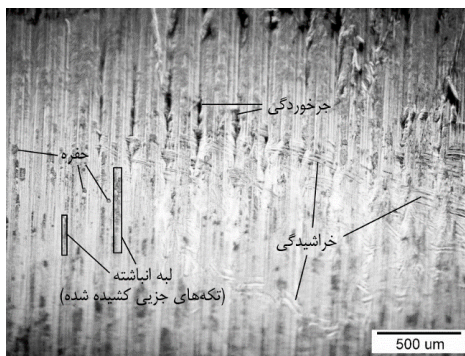
دلایل کاهش زیری سطح در روش برودتی CO₂ نسبت به روش خشک در ادامه بیان شده است. همان‌طور که از شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، سیال برودتی به‌گونه‌ای اعمال می‌شود که مستقیماً سطح براده ابزار و قطعه‌کار تحت تأثیر قرار می‌گیرند. حال سیال برودتی همان‌طور که توضیح داده شد موجب کاهش تشکیل لبه انباشته می‌شود. لبه انباشته یکی از عواملی است که تأثیر نامطلوبی بر صافی سطح در برش دارد. لبه انباشته در واقع، هندسه لبه برش ابزار را تغییر می‌دهد. هرچه شعاع نوک لبه انباشته بیشتر باشد، سطح تمام شده ناصاف‌تر به‌وجود می‌آید [۱، ۲]. هم‌چنین احتمال دارد سایش کاهش یافته سطح آزاد اصلی ابزار در روش برودتی که در بخش سایش ابزار توضیح داده شد با کاهش زیری سطح در روش برودتی ارتباط داشته باشد، زیرا در تمام آزمون‌ها با استفاده از روش برودتی سایش سطح آزاد اصلی ابزار همانند زیری سطح قطعه‌کار کاهش یافته است (جدول ۱). هم‌چنین به‌کار بردن سیال خنک‌کار، اصطکاک در فصل مشترک ابزار-براده را کاهش می‌دهد [۱، ۱۵]. اصطکاک کمتر، طول تماس ابزار-براده را کاهش خواهد داد که باعث کاهش نیروی برشی می‌گردد [۱۳، ۱۵]. نیروهای برشی کمتر، ارتعاشات کمتری را در ماشین‌کاری تولید می‌نمایند، بدین ترتیب زیری سطح کمتری در قطعه ماشین‌کاری شده در حین ماشین‌کاری برودتی حاصل می‌گردد [۱۳].

۴.۳.۳ توپوگرافی سطح قطعه‌کار (از لحاظ عیوب سطحی)

یکپارچگی سطح، ملاحظه‌ای مهم در عملیات تولیدی است که هدف از آن اطمینان از عملکرد مطلوب و مطمئن سطوح در محصولات تولیدی است.



(الف) برودتی



(ب) خشک

شکل ۱۵: بافت سطح ماشین‌کاری شده در آزمون ۱ تحت شرایط خشک و برودتی (X50).

طبق سازوکار ایجاد جرخوردگی در [۱۶، ۱۷]، با اعمال سیال CO₂ به ناحیه برش، ۱- جریان سیال، ذرات کنده شده از ابزار و سطح قطعه‌کار را از ناحیه برش دور کرده و از این‌رو از کشیده شدن و شخم‌زنی آن‌ها بر روی سطح قطعه‌کار جلوگیری می‌کند و ۲- دمای پایین سیال، نرم‌شدگی کمتری از قطعه‌کار را فراهم می‌آورد که مانع از نفوذ بیشتر ذرات کنده شده از ابزار و قطعه‌کار به داخل سطح قطعه‌کار و در نتیجه جرخوردگی بیشتر می‌گردد [۱۶]. طبق سازوکار ایجاد خراشیدگی در [۱۶]، جریان سیال در روش برودتی با دور کردن براده، از ضربه براده به سطح قطعه‌کار و ایجاد خراش بر روی آن جلوگیری می‌کند. طبق سازوکار ایجاد حفره در [۱، ۱۷-۱۹]، با اعمال سیال

۵/۶۲٪ تا حداکثر ۵۶/۳۲٪ کاهش یافته؛ از لحاظ توپوگرافی سطح قطعه‌کار، عیوب سطح مانند جرخوردگی، خراشیدگی، حفره، لبه انباشته و غیره را کاهش داده و سطحی بسیار همگن‌تر، یکنواخت‌تر و صاف‌تر ایجاد نموده است که این نتایج، مفید بودن روش برودتی را نشان می‌دهند.

مراجع

- [1] Kalpakjian, Serope. *Manufacturing engineering and technology*. Institute of Publications and Printing of Tehran University, 2001.
- [2] Jerold, B Dilip and Kumar, M Pradeep. Experimental comparison of carbon-dioxide and liquid nitrogen cryogenic coolants in turning of aisi 1045 steel. *Cryogenics*, 52(10):569-574, 2012.
- [3] Pittalà, Gaetano M. A study of the effect of co2 cryogenic coolant in end milling of ti-6al-4v. *Procedia Cirp*, 77:445-448, 2018.
- [4] Hotz, H, Kirsch, B, Becker, S, Harbou, E Von, Muller, R, and Aurich, JC. Modification of surface morphology during cryogenic turning of metastable austenitic steel aisi 347 at different parameter combinations with constant co2 consumption per cut. *Procedia Cirp*, 77:207-210, 2018.
- [5] Jerold, B Dilip and Kumar, M Pradeep. Machining of aisi 316 stainless steel under carbon-di-oxide cooling. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(10):1059-1065, 2012.
- [6] Wika, KK, Gurdal, O, Litwa, P, and Hitchens, C. Influence of supercritical co2 cooling on tool wear and cutting forces in the milling of ti-6al-4v. *Procedia Cirp*, 82:89-94, 2019.
- [7] Magadum, Sunil, Kumar, Arun, Yoganath, VG, and Srini-vasa, CK. Cryogenic machining of ss304 steel. 2014.
- [8] Umbrello, Domenico, Pu, Z, Caruso, S, Outeiro, JC, Jayal, AD, Dillon, OW, and Jawahir, IS. The effects of cryogenic cooling on surface integrity in hard machining. *Procedia Engineering*, 19:371-376, 2011.
- [9] Babamiri, Mohammad. Cryogenic cooling a new approach to cooling cutting tool. *Technical Journal of Manufacturing and production Engineering*, (38):204-210, 2012.
- [10] Sharma, Vishal S, Dogra, Manu, and Suri, NM. Cooling techniques for improved productivity in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(6):435-453, 2009.
- [11] Tajdari, Mahdi, Zare Chavoshi, Saeed, and Shahbazi, Ehsan. Design and requirements of cryogenic cooling process using liquid nitrogen in turning, 2009.
- [12] Khan, Ahsan Ali and Ahmed, Mirghani I. Improving tool life using cryogenic cooling. *Journal of materials processing technology*, 196(1-3):149-154, 2008.
- [13] Gupta, Munish Kumar and Sood, Pardeep Kumar. Optimizing multi characteristics in machining of aisi 4340 steel using taguchi's approach and utility concept. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 97(1):63-69, 2016.

CO₂ به ناحیه برش، ۱- مقدار لبه انباشته کاهش می‌یابد (دلیل آن پیشتر ذکر شد)، بنابراین مقدار کمتری از لبه انباشته وجود خواهد داشت تا بر روی سطح قطعه‌کار بنشینند و در حین برشکاری از سطح قطعه‌کار جدا شود و حفره ایجاد کند ۲- جریان سیال، ذرات کنده شده از ابزار و قطعه‌کار را از ناحیه برش دور کرده و از این‌رو از چسبیدن آن‌ها بر روی سطح قطعه‌کار که ممکن است به یک‌باره و به‌طور کامل از جا برداشته شوند و حفره ایجاد کنند، جلوگیری می‌کند و ۳- دمای پایین سیال، نرم‌شدگی کمتری از قطعه‌کار را فراهم می‌آورد که مانع از نفوذ بیشتر ذرات ابزار و براده‌ها به داخل سطح قطعه‌کار و در نتیجه حفره بیشتر می‌گردد [۱۶]. طبق سازوکار ایجاد لبه انباشته در [۲۰]، با اعمال سیال CO₂ به ناحیه برش، لبه انباشته کمتری بر ابزار تشکیل می‌شود و بنابراین مقدار کمتری از آن بر سطح قطعه‌کار به صورت تکه‌های جزئی کشیده شده رسوب می‌کند. دلایل کاهش تشکیل لبه انباشته بر ابزار در روش برودتی، در بخش لبه انباشته توضیح داده شد.

۴ نتایج

در این تحقیق طراحی و ساخت مدار برودتی CO₂، تعیین بهترین حالت مدار و بررسی تأثیر آن بر ابزار و قطعه‌کار از طریق مقایسه با روش خشک در تراشکاری فولاد ضدزنگ 304L صورت گرفت که دارای نتایج زیر است:

طراحی و ساخت مداری با قابلیت‌هایی که در ادامه ذکر شده است: قابل کنترل بودن شدت جریان سیال، حفظ پیوستگی خروج سیال بدون هیچ‌گونه قطع‌شدگی و در نتیجه داشتن خنک‌کاری یکسان و پیوسته در طول انجام ماشین‌کاری، نداشتن محدودیت در مدت زمان استفاده از مدار (عدم نیاز به استراحت دادن به دستگاه خنک‌کاری)، عدم خشک‌شدگی (بیخ‌زدگی) نازل و داشتن انعطاف‌پذیری حرکتی لازم متناسب با اجزای سخت‌افزاری متحرک ماشین، امکان تنظیم زوایا و ثابت نگه داشتن بدون هیچ‌گونه لرزش نازل(های) پاشش سیال خنک‌کار تحت موقعیت‌ها، فواصل و زوایای مختلف در حین فرآیند ماشین‌کاری، سهولت در جابه‌جایی کل مجموعه و استفاده از آن در دیگر ماشین‌های ابزار.

برای آزمون‌هایی که به‌منظور دستیابی به بهترین حالت مدار انجام شده‌اند، روش پاشش با یک نازل در موقعیت بالای اینسرت برش (جزئیات روش پاشش در شکل ۱۲) با دبی ۱۲۱/min کمترین مساحت سایش سطح آزاد اصلی ابزار، لبه انباشته ابزار و زبری سطح قطعه‌کار را با توجه به مقدار مصرف پایین‌تر دبی پاشش سیال CO₂ ایجاد کرده‌اند که بهترین حالت مدار است.

برای آزمون‌هایی ماشین‌کاری که تحت پارامترهای برشی ارائه شده در جدول ۱ انجام شده‌اند و با توجه به مقادیر درصد بهبود مساحت سایش سطح آزاد اصلی ابزار و زبری سطح ماشین‌کاری شده در حالت برودتی نسبت به خشک که در جدول ۱ نیز محاسبه شده و مندرج است، نتیجه می‌شود که در روش برودتی نسبت به روش خشک تحت شرایط برشی یکسان: سطح آزاد اصلی ابزار متحمل سایش کمتری شده است و مساحت سایش سطح آزاد اصلی از حداقل ۰/۳۶٪ تا حداکثر ۳۳/۹۲٪ کاهش یافته؛ لبه انباشته و انباشتگی مواد بر روی سطح براده کاهش یافته؛ زبری سطح قطعه‌کار از حداقل

- [14] Yildiz, Yakup and Nalbant, Muammer. A review of cryogenic cooling in machining processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(9):947-964, 2008.
- [15] Selvaraj, D Philip, Chandramohan, P, and Mohanraj, M. Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using taguchi method. *Measurement*, 49:205-215, 2014.
- [16] Bordin, A, Bruschi, S, and Ghiotti, A. The effect of cutting speed and feed rate on the surface integrity in dry turning of cochrmo alloy. *Procedia Cirp*, 13:219-224, 2014.
- [17] Ulutan, Durul and Ozel, Tugrul. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(3):250-280, 2011.
- [18] Thakur, A and Gangopadhyay, S. State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 100:25-54, 2016.
- [19] Fernández-Abia, Ana Isabel, García, Joaquín Barreiro, and de Lacalle, Luis N López. High-performance machining of austenitic stainless steels. in *Machining and machine-tools*, pp. 29-90. Elsevier, 2013.
- [20] Danish, Mohd, Ginta, Turnad Lenggo, Habib, Khairul, Carou, Diego, Rani, Ahmad Majdi Abdul, and Saha, Bidyut Baran. Thermal analysis during turning of az31 magnesium alloy under dry and cryogenic conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(5-8):2855-2868, 2017.