



Investigating the Effects of Flow Rate and Spraying Methods of CO₂ Fluid on Tool Wear and workpiece Surface Quality in Cryogenic Turning of 304-L Stainless Steel

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Dindar D.¹ MSc,

Jabbaripour B.*¹ PhD

How to cite this article

Dindar D, Jabbaripour B. Investigating the Effects of Flow Rate and Spraying Methods of CO₂ Fluid on Tool Wear and workpiece Surface Quality in Cryogenic Turning of 304-L Stainless Steel. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(4):819-832.

ABSTRACT

Increasing workpiece surface quality and reducing tool wear are always the most important ones in machining purposes. There are basic challenges to achieve optimum conditions for workpiece surface and tool life in different machining operations of austenitic stainless steel 304L due to low thermal conductivity and creating high temperatures at the cutting zone. Applying conventional cooling methods such as flood techniques does not usually provide desirable control of machining temperature. Also, their use often creates environmental problems. Recently, the cryogenic cooling process has been considered by researchers to reduce these problems in various machining methods. In this research, turning of 304L stainless steel using cryogenic cooling of CO₂ have been studied to investigate the effect of flow rate and fluid spraying method on workpiece surface roughness and tool wear. For this purpose, the tool-workpiece contact zone has been cooled in five different methods of CO₂ fluid spraying according to the number and position of the spraying nozzles (Up1, Up2, Down, Up1-Down, Up2-Down) and three different flow rates (12, 18 and 24 l/min). The minimum main flank wear of the tool was achieved in the Up1 cooling method and 18 l/min flow rate and the minimum workpiece surface roughness was achieved in the Up1 cooling method and 12 l/min flow rate. Regarding economic considerations to reduce the consumption of spraying flow of CO₂ fluid and achieving the minimum main flank wear of the tool, built-up edge and workpiece surface roughness, the optimum spraying method and flow rate were obtained as Up1 and 12 l/min, respectively.

Keywords Turning; 304L Stainless Steel; CO₂ Cryogenic Cooling; Tool Wear; Surface Roughness

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Emam Hasan Boulevard, Ashrafi Esfahani Boulevard, Pounak Square, Tehran, Iran. Postal Code: 1483766957

Phone: +98 (21)44600038

Fax: +98 (21)44600038

beh.jabbaripour@iauctb.ac.ir

Article History

Received: May 03, 2019

Accepted: August 09, 2019

ePublished: April 17, 2020

CITATION LINKS

[1] Manufacturing engineering and technology [2] Investigation of cooling and lubrication strategies for machining high-temperature alloys [3] A review of cryogenic cooling in machining processes [4] Flushing strategies for high performance, efficient and environmentally friendly cutting [5] Machining of AISI 316 stainless steel under carbon-dioxide cooling [6] New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V [7] Improving tool life using cryogenic cooling [8] Experimental investigation of machining AISI 1040 Medium carbon steel under cryogenic machining: A comparison with dry machining [9] Experimental comparison of carbon-dioxide and liquid nitrogen cryogenic coolants in turning of AISI 1045 steel [10] High performance cutting of gamma titanium aluminides: Influence of lubricoolant strategy on tool wear and surface integrity [11] Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments [12] Cryogenic machining of SS304 steel [13] Deformation induced surface hardening when turning metastable austenitic steel AISI 347 with different cryogenic cooling strategies [14] Investigation of white layers formed in conventional and cryogenic hard turning of steels [15] Design and requirements of cryogenic cooling process using liquid nitrogen in turning [16] Cooling techniques for improved productivity in turning [17] Surface integrity characteristics of NiTi shape memory alloys resulting from dry and cryogenic machining [18] Optimizing multi characteristics in machining of AISI 4340 steel using Taguchi's approach and utility concept

بررسی تاثیر دبی و روش پاشش سیال CO₂ بر سایش ابزار و کیفیت سطح قطعه‌کار در تراشکاری کرایوژنیک فولاد ضدزنگ 304L

دانیال دیندار MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

بهزاد جباری‌پور PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

افزایش کیفیت سطح قطعه‌کار و کاهش سایش ابزار همواره جزو مهم‌ترین اهداف در ماشینکاری هستند. در فرآیندهای مختلف ماشینکاری فولاد ضدزنگ آستنیتی 304L، به دلیل ضریب انتقال حرارت پایین و ایجاد دمای بالا در موضع برش برای رسیدن به شرایط بهینه سطحی قطعه‌کار و عمر ابزار، چالش‌های اساسی وجود دارد. بسیاری از اوقات اعمال روش‌های خنک‌کاری مرسوم مانند تکنیک سیلابی، کنترل مطلوبی بر دمای ماشینکاری را سبب نمی‌شود. همچنین استفاده از آن‌ها اغلب مشکلات زیست‌محیطی را ایجاد می‌کند. اخیراً فرآیند خنک‌کاری کرایوژنیک برای کاهش این عیوب در روش‌های مختلف ماشینکاری مورد توجه محققان قرار گرفته است. در تحقیق جاری تراشکاری فولاد ضدزنگ 304L با استفاده از خنک‌کاری کرایوژنیک CO₂ به منظور بررسی تاثیر دبی و روش پاشش سیال بر زبری سطح قطعه‌کار و سایش ابزار مورد مطالعه قرار گرفته است. به همین منظور موضع تماس ابزار-قطعه‌کار به پنج روش مختلف از پاشش سیال CO₂ بر اساس تعداد و موقعیت قرارگیری نازل‌های پاشش (Up1, Up2, Down, Up1-Down, Up2-Down) و سه دبی متفاوت (۱۲، ۱۸ و ۲۴ لیتر بر دقیقه) خنک‌کاری شده است. کمترین سایش سطح آزاد اصلی ابزار در روش خنک‌کاری Up1 و دبی ۱۸۱/min و کمترین زبری سطح قطعه‌کار در روش Up1 و دبی ۱۲۱/min به دست آمد. با توجه همزمان به ملاحظات اقتصادی برای کاهش مقدار مصرف دبی پاشش سیال CO₂ و رسیدن به حداقل مقدار سایش سطح آزاد اصلی ابزار، لبه انباشته ابزار و زبری سطح قطعه‌کار، روش پاشش و دبی بهینه به ترتیب به صورت Up1 و ۱۲۱/min به دست آمدند.

کلیدواژه‌ها: تراشکاری، فولاد ضدزنگ 304L، خنک‌کاری کرایوژنیک CO₂، سایش ابزار، زبری سطح

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۱۸

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

۱- مقدمه

اگر در فرآیند ماشینکاری افزایش گرمای تولیدشده در موضع برش بیش از حد باشد، مشکلاتی را به وجود می‌آورد. گرمای بیش از اندازه می‌تواند موجب مشکلاتی از جمله تاثیر نامطلوب بر استحکام، سختی و مقاومت به سایش ابزار، تنزل یکپارچگی سطح ماشینکاری‌شده و بنابراین تاثیر نامطلوب بر خواص قطعه، تغییرات ابعادی در قطعه تحت ماشینکاری، تغییر نامطلوب میکروساختار و ترکیب شیمیایی قطعه‌کار شود. این مشکلات

موانعی برای افزایش نرخ براده‌برداری در فرآیندهای ماشینکاری هستند. دلایل مختلفی برای افزایش دما که موجب مشکلات ذکرشده می‌شود (مانند استحکام بالاتر ماده قطعه‌کار، گرمای ویژه کمتر ماده قطعه‌کار، ضریب هدایت حرارتی پایین‌تر ماده قطعه‌کار و همچنین افزایش سرعت برشی، پیشروی و عمق برش) می‌تواند وجود داشته باشد^[1].

فولاد ضدزنگ آستنیتی 304L یکی از انواع فولاد ضدزنگ است که اصلاح‌شده نوع ۳۰۴ با حداقل کربن برای محدودیت بیشتر تشکیل رسوب در حین جوشکاری است. فولاد ضدزنگ آستنیتی 304L یکی از پرکاربردترین مواد در صنایع مختلف (همچون نفت، گاز و پتروشیمی، صنایع غذایی، دارویی و غیره) است که ماشینکاری آن به دلیل ضریب هدایت حرارتی پایین موجب تشدید نرخ افزایش دما می‌شود که منجر به کاهش عمر ابزار و کیفیت سطح قطعه‌کار می‌شود. برای حل این مشکلات باید دما را در منطقه برش تا حد ممکن و بهینه کاهش داد تا از طریق آن به کیفیت بالاتری برای قطعه‌کار و عمر بالاتری برای ابزار رسید و همچنین بتوان پارامترهای برشی را به منظور افزایش نرخ براده‌برداری در سطوح بالاتری تنظیم و استفاده نمود. برای کاهش و کنترل دما در موضع تماس ابزار-قطعه‌کار، روش‌های خنک‌کاری مختلفی وجود دارد که هر کدام دارای معایبی مانند خنک‌کاری متداول سیلابی یا تر (اشکال: وارد کردن حجم بالایی از مایعات برشکاری مصرفی هرز به محیط زیست)، خنک‌کاری فشار بالا (اشکال: روشی پرهزینه)، روانکاری مقدار کمینه یا MQL (اشکال: قابلیت خنک‌کاری محدود) نیز هستند^[2]؛ از طرف دیگر به‌کارگیری سیالات برشی مرسوم در صنعت به روش سیلابی، می‌تواند مشکلات ایجاد ترک خوردگی تنش‌ی یا لکه‌دار شدن سطح قطعه‌کار، ایجاد هزینه و زمان برای تمیزکاری قطعه‌کارها، فرسایش و استهلاک اجزای سخت‌افزاری ماشین ابزار، آلودگی آب و خاک در حین دفع نهایی آن، مخاطرات بیولوژیکی برای سلامتی اپراتور، سیستم‌های اضافی برای پمپ‌کردن، ذخیره‌سازی، تصفیه، بازیافت و خنک‌سازی و آلودگی براده را به دنبال داشته باشد^[1].

به علت مشکلات مذکور در روش‌های خنک‌کاری مرسوم، اخیراً، چه در سطح پژوهشی و چه صنعتی، استفاده از تکنیک جدید خنک‌کاری کرایوژنیک (تبریدی) در روش‌های مختلف ماشینکاری، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. علم کرایوژنیک (تبریدی) به بررسی و استفاده از مواد در دماهای بسیار پایین می‌پردازد. موضع برش در خنک‌کاری کرایوژنیک، عمدتاً دو سیال نیتروژن مایع LN₂ (دمای جوش -۱۹۶°C) و ترکیب گاز و ذرات یخ خشک دی‌اکسیدکربن (با دمای جوش -۵/۷۸°C) مورد توجه محققان بوده است. علی‌رغم قابلیت خنک‌کاری بالاتر نیتروژن مایع نسبت به گاز دی‌اکسید کربن، استفاده از خنک‌کار تبریدی نیتروژن مایع نیاز به تجهیزات ذخیره، نگهداری و مدار پاشش گران‌قیمت دارد که گاهی در مصارف صنعتی، هزینه‌های سربار حاصل از این تکنیک خنک‌کاری مقرون‌به‌صرفه نیست و در برخی

خنک کار کرایوژنیک در سرعت برشی بالاتر موثرتر بوده است و همچنین بیان کردند که خنک کاری کرایوژنیک در نرخ پیشروی بالاتر موثرتر از عمق برشی بالاتر است.

گوپتا و همکاران^[8]، تاثیر خنک کاری کرایوژنیک نیتروژن مایع به روش پاشش مستقیم در تراشکاری فولاد کربن متوسط AISI1040 را بر سایش ابزار مثل سایش سطوح براده و آزاد، زبری سطح، نیروهای برشی و دمای برش در مقایسه با ماشینکاری خشک بررسی کردند. آزمون‌ها با استفاده از ابزار اینسرتی تنگستن کارباید بدون پوشش در نرخ‌های پیشروی متفاوت و سرعت برشی ثابت انجام شدند. آن‌ها مشاهده کردند که استفاده از خنک کاری کرایوژنیک منجر به مقدار کمتر سایش سطوح براده و آزاد در کنار ایجاد صافی سطح بهتر شده است. همچنین مشخص شد که نیتروژن مایع برای افزایش در نرخ پیشروی مفیدتر است. نتایج تجربی آن‌ها اثبات کرد که به کارگیری خنک کار کرایوژنیک، به طور کلی عملکرد ماشینکاری فولاد کربن متوسط AISI1040 با استفاده از اینسرت تنگستن کارباید را در مقایسه با ماشینکاری خشک بهبود می‌دهد.

جرالد و کومار^[9]، تاثیر خنک کاری کرایوژنیک با CO₂ به روش پاشش مستقیم را بر دمای برش، نیروی برشی، سایش ابزار، زبری سطح و ریخت‌شناسی براده در مقایسه با ماشینکاری خشک و تر در تراشکاری قطعه کار به جنس فولاد ضدزنگ AISI316 تحقیق کردند. آن‌ها دریافتند که در ماشینکاری CO₂ در مقایسه با ماشینکاری تر و خشک، دمای برش به ترتیب (حداکثر) تا حدود ۳۵ و ۵۰٪ کاهش یافته، صافی سطح قطعه کار ماشینکاری 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 کومار^[9] در تحقیقی دیگر، مقایسه تجربی خنک کاری‌های کرایوژنیک CO₂، LN₂ و تر را در تراشکاری فولاد AISI1045 انجام دادند. آن‌ها دریافتند که خنک کاری کرایوژنیک CO₂، نیروهای برشی، صافی سطح، سایش ابزار و کنترل براده بهتری را نسبت به ماشینکاری تر و LN₂ کرایوژنیک نتیجه داده است.

کلاک و همکاران^[10]، تاثیر خنک کاری سیلابی، خنک کاری فشار بالا، خنک کاری کرایوژنیک با نیتروژن مایع و روانکاری مقدار کمینه در عملیات روتراشی تیتانیوم آلومیناید را بررسی نمودند. مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که خنک کاری کرایوژنیک با نیتروژن مایع به عنوان اطمینان‌بخش‌ترین روش برای کاهش سایش ابزار و همچنین کاستن از عیوب سطحی و زیرسطحی نتیجه می‌دهد. به ویژه، زبری سطح در مقایسه با دیگر شرایط خنک کاری کاهش چشمگیری یافته است و همچنین استحاله ریزساختاری زیرسطحی نیز کاهش یافته است.

کالیان کومار و چادهاری^[11]، اثر خنک کاری کرایوژنیک با نیتروژن مایع به روش پاشش مستقیم را روی سایش ابزار و نیروهای

از کاربردهای ماشینکاری به لحاظ اقتصادی، به هیچ عنوان توجیه‌پذیر نیست، در حالی که استفاده از سیال تبریدی دی‌اکسیدکربن با توجه به سهولت نگهداری، حمل و نقل و ساده‌تربودن المان‌های مدار پاشش، هزینه زیادی را تحمیل نمی‌کند^[13]. از طرفی دمای پایین نیتروژن مایع تحت فشار جوی موجب مشکلات خاص برای به کارگیری آن به عنوان یک خنک کار موثر می‌شود، اولاً کل سیستم تامین (نازل‌ها و شیرالات) باید عایق شوند تا از آسیب‌ها و کاهش ظرفیت خنک کاری جلوگیری شود و همچنین در صورتی که یکپارچه‌سازی سیستم خنک کاری با ماشین ابزار در نظر باشد، تمام خطوط اعمال خنک کار، اجزای ماشین و همچنین کانال‌های خنک کاری ابزار باید عایق شوند (که موجب دشواربودن عمل یکپارچه‌سازی می‌شود) و ثانیاً زمانی که نیتروژن مایع در تماس با سطوحی که دمای خیلی بالاتری دارند، قرار می‌گیرد، تبخیر می‌شود که این امر منجر به یک فیلم گاز عایق روی سطح می‌شود که اثر خنک کاری را کاهش می‌دهد و همچنین از آنجایی که حجم زیادی از نیتروژن تبخیر شده از خروجی خارج می‌شود، زمان طولانی باید سپری شود تا سیستم خنک و آماده استفاده باشد که حتی بعد از دستیابی به دمای خروجی مدنظر، فرآیند خنک کاری پایدار نیست که دلیل آن تولید نیتروژن گازی در سیستم تامین است؛ در صورتی که دی‌اکسیدکربن هیچ یک از این مشکلات را ندارد^[4]. همان‌طور که جرالد و کومار^[5] نیز ذکر کرده‌اند، معایب نسبی استفاده از نیتروژن مایع به عنوان خنک کار کرایوژنیک، محققان را به استفاده از دی‌اکسیدکربن و دیگر گازها به عنوان سیال برشی سوق داده است.

هنگ و همکاران^[6]، روش‌های خنک کاری کرایوژنیک گوناگونی را با استفاده از سیال نیتروژن مایع در ماشینکاری Ti-6Al-4V از لحاظ دماهای برشی مقایسه کردند. آن‌ها روش‌ها را از لحاظ کارایی (کاهش دما در موضع برش) از بدترین به بهترین رتبه‌بندی کردند که عبارت‌اند از: برش خشک، خنک کاری کرایوژنیک پشت ابزار، خنک کاری امولسیون، پیش‌خنک کاری قطعه کار، خنک کاری کرایوژنیک سطح آزاد اصلی، خنک کاری سطح براده و خنک کاری همزمان سطح براده و آزاد اصلی.

علیخان و احمد^[7]، بهبود عمر ابزار با استفاده از خنک کاری کرایوژنیک به کمک نیتروژن مایع را از طریق مقایسه با خنک کاری سنتی، حین ماشینکاری فولاد ضدزنگ ۳۰۴ با ابزارهای کاربایدی پوشش‌دار تیتانیوم- کربن- نیتراید مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش آن‌ها ابزارگیر به منظور اعمال نیتروژن مایع به عنوان خنک کار اصلاح شد، به طوری که نیتروژن مایع بتواند مستقیماً به ناحیه برش اعمال شود. آن‌ها نتیجه گرفتند که در صورت به کارگیری نیتروژن مایع با استفاده از ابزار اصلاح‌شده، عمر ابزار بیش از چهار برابر افزایش می‌یابد و در یک نرخ خنک کاری با سرعت برشی بالاتر، به وسیله خنک کار مرسوم، نمی‌توان بر گرمای اضافی در فصل مشترک براده- ابزار غلبه کرد؛ در نتیجه اعمال

(سایش کمتر ابزار) به منظور رسیدن به راندمان بالاتر ضروری است. با توجه به ضریب انتقال حرارت پایین فولاد ضدزنگ آستنیتی 304L و چالش تمرکز حرارتی زیاد در موضع برشی ابزار- قطعه کار، روشی از خنک کاری باید انتخاب شود که دما را تا حد قابل توجهی کم کند و عیوب سطحی قطعه کار و سایش ابزار را تا حد ممکن کاهش دهد. از طرفی به علت ملاحظات زیست محیطی و سلامت اپراتور، روش مورد استفاده باید کاملاً ایمن باشد. تکنیک خنک کاری نوین کرایوژنیک، روشی است که می تواند در ماشینکاری تا حدود زیادی این نیازها را برآورده سازد و بسیاری از مشکلات دیگر روش های خنک کاری متداول فعلی را ندارد.

همان طور که جرال و کومار^[5] نیز بیان داشته اند، بیشتر تحقیقات انجام شده در حوزه ماشینکاری کرایوژنیک مربوط به استفاده از نیتروژن مایع بوده است و تحقیقات بسیار محدودی با استفاده از سیال کرایوژنیک دی اکسید کربن در فرآیندهای ماشینکاری انجام شده است.

بر اساس آخرین اطلاع نویسندگان، تا کنون هیچ تحقیقی در خصوص تراشکاری کرایوژنیک با استفاده از سیال خنک کار دی اکسید کربن روی فولاد ضدزنگ 304L گزارش نشده است. لذا به دلیل خلأ تحقیقاتی در این حوزه، در این مطالعه تجربی به بررسی سایش ابزار و زبری سطح قطعه کار در فرآیند تراشکاری فولاد پرکاربرد ضدزنگ 304L با تکنیک خنک کاری کرایوژنیک با استفاده از سیال خنک کار دی اکسید کربن پرداخته می شود، به همین منظور یک نوع مدار خنک کاری سیال کرایوژنیک CO₂ در تحقیق جاری، طراحی، ساخته و استفاده شده است. از دیگر جنبه های نوآوری مطالعه جاری، بررسی تاثیر نحوه پاشش سیال کرایوژنیک CO₂ (با استفاده از یک یا دو نازل پاشش، تحت زوایا و فواصل مختلف نازل پاشش نسبت به سطوح براده، آزاد اصلی، آزاد فرعی ابزار و سطح قطعه کار) تحت دبی های متفاوت پاشش سیال روی زبری سطح قطعه کار و انواع خرابی های ابزار و همچنین استفاده از مساحت منطقه سایش سطح آزاد اصلی ابزار به عنوان معیاری کمی برای بررسی سایش ابزار است. در تحقیق فعلی، اهدافی که دنبال می شوند عبارتند از: طراحی آزمایشات و اجرای آن ها به منظور یافتن بهترین دبی و روش پاشش سیال کرایوژنیک CO₂ که در آن ها مشخصه های زبری سطح قطعه کار، مساحت سایش سطح آزاد اصلی ابزار با توجه به دبی مصرفی پایین تر سیال به صورت همزمان حداقل ممکن باشند و همچنین چگونگی تاثیر روش ها و دبی های مختلف پاشش سیال کرایوژنیک CO₂ بر سایش ابزار و زبری سطح قطعه کار در فرآیند تراشکاری فولاد ضدزنگ آستنیتی 304L بررسی می شود.

۲- تجهیزات، تنظیمات و طراحی آزمایش ها

جنس قطعه کار در تحقیق جاری فولاد ضدزنگ آستنیتی 304L است. ابزار برش مورد استفاده، الماسه (اینسرت) کاربایدی پوشش دار DM-120412 CNMG و با گرید M-10M-

برشی در ماشینکاری سرعت بالای فولاد ضدزنگ ۲۰۲ به صورت تجربی مطالعه کردند. آن ها نتیجه گرفتند که در ماشینکاری کرایوژنیک نسبت به خشک، نیروی برشی و سایش سطح آزاد ابزار به ترتیب در حدود ۱۴/۸۳ و ۳۷/۳۹% کاهش یافته است و مصرف بالای نیتروژن مایع، هزینه کل ماشینکاری را افزایش می دهد؛ همچنین خنک کاری کرایوژنیک در سرعت ها و پیشروی های بالا که لزوماً نرخ ماشینکاری بالا به همراه کیفیت بهتر را برآورده می سازد، موثرتر است.

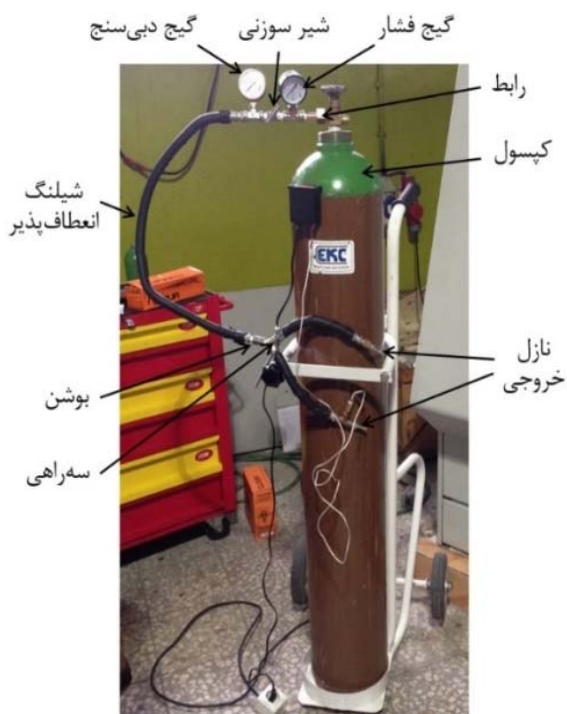
ماگادوم و همکاران^[12]، تراشکاری فولاد ضدزنگ ۳۰۴ را با استفاده از ابزار کاربایدی پوشش دار تحت روش کرایوژنیک و روش مرسوم سیلابی انجام دادند. آن ها دریافتند که به کارگیری نیتروژن مایع به عنوان خنک کار نسبت به روش مرسوم سیلابی موجب کاهش قابل توجه سایش ابزار، کاهش نیروی برشی و بهبود صافی سطح می شود.

مایر و همکاران^[13]، سخت شدگی سطح ناشی از تغییر شکل در هنگام تراشکاری فولاد آستنیتی ناپایدار AISI347 با روش های مختلف خنک کاری کرایوژنیک را مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیق آن ها چهار روش مختلف از خنک کاری کرایوژنیک (پیش خنک کاری قطعه کار با یک نازل خارجی نیتروژن مایع؛ خنک کاری غیرمستقیم ابزار با منبع داخلی نیتروژن مایع؛ پیش خنک کاری قطعه کار با دو نازل خارجی دی اکسید کربن؛ ترکیب خنک کاری غیرمستقیم ابزار با منبع داخلی نیتروژن مایع و پیش خنک کاری قطعه کار با دو نازل خارجی دی اکسید کربن) با روش خشک مقایسه می شود. نتایج آن ها نشان می دهد که تراشکاری کرایوژنیک فولادهای آستنیتی ناپایدار، فرصت افزایش سختی لایه سطحی قطعه کار را می دهد. همچنین تعیین کردند که ترکیب پیشروی بالا، سرعت برشی پایین و خنک کاری کرایوژنیک با منبع خارجی منجر به بالاترین مقادیر تشکیل ماتنزیت می شود. آن ها بیان داشتند، منبع LN₂ داخلی تاثیر معناداری بر دمای قطعه کار ندارد و روش های خنک کاری خارجی با LN₂ یا CO₂ منجر به دماهای پایین تر قطعه کار حین فرآیند برداشت ماده می شود.

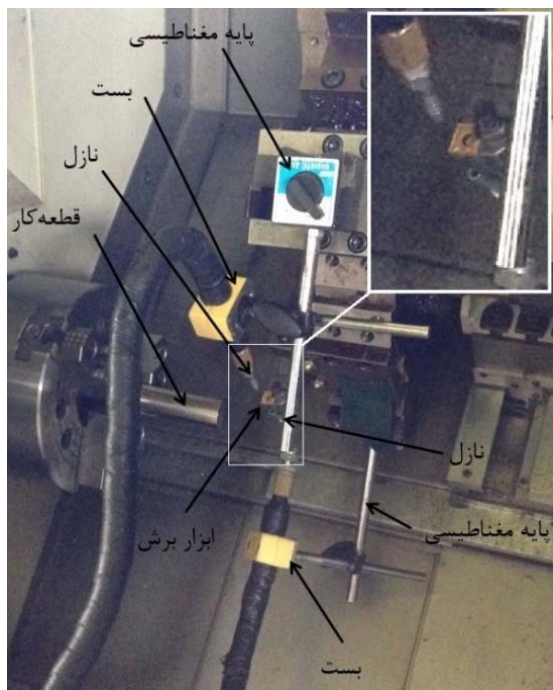
زورکی و همکاران^[14]، لایه های سفید تشکیل شده در سخت تراشی مرسوم و کرایوژنیک فولادها را مورد بررسی قرار دادند. آن ها دریافتند که خنک کاری پاششی LN₂ در ابزار برش و ناحیه تماس ابزار- قطعه کار به طور موثری ضخامت لایه های سفید و تحت تاثیر حرارت را محدود می کند، از نرم شدگی سطح قطعه کار جلوگیری می کند و توزیع تنش های پس ماند را بهبود می بخشد. همچنین عمر ابزارهای کارباید روکش دار اکسید آلومینیومی و CBN مورد استفاده در سخت تراشی، در مقایسه با روش های سیلابی و خشک، افزایش قابل توجهی می یابد که به تبع آن استفاده از نرخ براده برداری بالاتر امکان پذیر می شود.

از آنجا که در فرآیندهای ماشینکاری سعی بر بهبود کیفیت تولید و کاهش هزینه است، بنابراین تحقیق برای دستیابی همزمان به کیفیت بهتر قطعه کار (زبری سطح کمتر) و عمر بیشتر ابزار

پاس انجام شده است که طول هر پاس ۷۰mm است و در نتیجه طول برش کلی برای هر نمونه قطعه کار برابر با ۷۰۰mm است. دبی پاشش سیال قبل از انجام هر آزمون روی مقدار مورد نظر تنظیم و سپس به کار گرفته شده است. فشار پاشش مدار کرایونیک در تمام آزمایشها روی مقدار ثابت ۲۲bar تنظیم و به کار گرفته شده است.



شکل ۱) مدار کرایونیک دی اکسید کربن



شکل ۲) نمایی از بستن ابزار برشی و قطعه کار روی ماشین تراش کنترل عددی کامپیوتری و گیره بندی نازل های پاشش سیال CO₂ کرایونیک

251YBM30 ساخت شرکت ZCC است. علی رغم صرف هزینه زیاد به منظور تخمین دقیق میزان سایش ابزار، در هر یک از آزمون های تراشکاری از یک لبه اینسرت جدید استفاده شده است. ابزارگیر مورد استفاده ساخت شرکت AKKO و با مشخصات C12M-2525-PCLNL است. ماشین ابزار مورد استفاده، یک ماشین تراش CNC است.

برای ارزیابی سایش ابزار از دو نوع میکروسکوپ نوری استفاده شده است. در تصاویری از ابزار که دارای بزرگنمایی ۲۰ و ۵۰ هستند، به ترتیب از میکروسکوپ های نوری Olympus SZX 16 و Olympus M51BX استفاده شده است. برای ارزیابی زبری سطح قطعه روتراشی شده از دستگاه زبری سنج تیلور هابسون سارترونیک ۲۵ استفاده شده است. دقت دستگاه ۰/۱ میکرومتر است. طول اندازه گیری برای هر نمونه زبری سنجی ۴mm است.

مدار طراحی و ساخته شده در تحقیق جاری به منظور انجام عملیات خنک کاری کرایونیک CO₂، شامل کپسول، رابط، گنج فشارسنج، شیر سوزنی کنترل دبی، گنج دبی سنج، شیلنگ استیل انعطاف پذیر با پوشش عایق حرارتی، بوشن، سهراهی و دو نازل خروجی است (شکل ۱). از این مدار هم می توان یک خروجی و هم می توان با استفاده از بوشن و سهراهی، دو خروجی به صورت پیوسته تحویل گرفت. طراحی و ساخت این مدار به گونه ای انجام شد تا قابلیت هایی نظیر: قابل کنترل بودن شدت جریان (دبی) سیال، حفظ پیوستگی خروج سیال و در نتیجه داشتن خنک کاری یکسان و پیوسته، عدم نیاز به استراحت دادن به دستگاه خنک کاری، عدم خشک شدگی (یخ زدگی) شیلنگ ها و نازل و داشتن انعطاف پذیری حرکتی لازم متناسب با اجزای سخت افزاری متحرک ماشین تراش، امکان تنظیم زوایا و ثابت نگه داشتن بدون هیچ گونه لرزش نازل(های) پاشش سیال خنک کار تحت فواصل، موقعیت ها و زوایای مختلف در حین فرآیند ماشینکاری را داشته باشد.

شکل ۲، نحوه بستن ابزار و قطعه کار روی ماشین تراش CNC و گیره بندی نازل های پاشش برای ثابت نگه داشتن آنها جهت عملیات روتراشی حین آزمون های ماشینکاری را نشان می دهد. طراحی آزمایش انجام شده، طرح سطح پاسخ اپتیمال (RSM Optimal) بوده است. به دلیل در نظر گرفتن پنج وضعیت متفاوت پاشش (Up1, Up2, Down, Up1-Down, Up2-Down) و سه مقدار مختلف دبی (۱۲، ۱۸ و ۲۴ لیتر بر دقیقه)، تعداد کل آزمون ها ۱۵ عدد است که در جدول ۱ نشان داده شده است. طی تمام آزمایشات تراشکاری، پارامترهای برشی در محدوده متوسطی (نه خشن و نه پرداخت) به صورت ثابت تنظیم شدند. پارامترهای برشی شامل سرعت برشی ۷۰m/min، سرعت پیشروی ۱/۱۵mm/rev و عمق برش ۱mm است. این پارامترهای برشی بر اساس انجام پیش آزمون های اولیه به صورت تجربی انتخاب شدند. برای هر یک از آزمون های تراشکاری (روتراشی) یک نمونه قطعه کار به شکل میلگردی به طول ۱۰۵mm و قطر ۳۰mm استفاده شد. برای هر آزمون ماشینکاری روی هر نمونه قطعه کار روتراشی در ۱۰

شماره آزمون	روش پاشش	دبی پاشش (l/min)
۱	Up1	۲۴
۲	Up1	۱۸
۳	Up1	۱۲
۴	Up2	۲۴
۵	Up2	۱۸
۶	Up2	۱۲
۷	Down	۲۴
۸	Down	۱۸
۹	Down	۱۲
۱۰	Up1-Down	۲۴
۱۱	Up1-Down	۱۸
۱۲	Up1-Down	۱۲
۱۳	Up2-Down	۲۴
۱۴	Up2-Down	۱۸
۱۵	Up2-Down	۱۲

ترکیب شده‌اند. بنابراین با توجه به ملاحظات که ذکر شد، روش‌های پاشش به قرار زیر هستند.

۱- روش Up1: همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، یک نازل در بالای اینسرت قرار گرفته است. نازل با سطح براده اینسرت زاویه ۸۰ درجه می‌سازد. خروجی نازل از نوک ابزار ۲۰mm فاصله دارد. 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.



شکل ۳) روش Up1 در آزمون‌های ۱، ۲ و ۳؛ موقعیت قرارگیری نازل (تصویر راست) و نواحی که تحت پاشش سیال قرار می‌گیرند (تصویر چپ)

۲- روش Up2: همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، یک نازل در بالای اینسرت قرار گرفته است. نازل با سطح براده اینسرت زاویه ۱۵ درجه و با سطح آزاد اصلی اینسرت زاویه ۱۵ درجه می‌سازد. خروجی نازل از نوک ابزار ۱۳mm فاصله دارد. سیال مستقیماً به سطح براده، سطح آزاد اصلی، لبه برنده فرعی اینسرت و قطعه‌کار پاشیده می‌شود. در این روش نسبت به روش Up1 سهم بیشتری از سیال به قطعه‌کار پاشش و خنک‌کاری بیشتری روی سطح قطعه‌کار انجام می‌شود، چون قطعه‌کار روبه‌روی خروجی نازل و جریان سیال قرار گرفته است.



شکل ۴) روش Up2 در آزمون‌های ۴، ۵ و ۶؛ موقعیت قرارگیری نازل (تصویر راست) و نواحی که تحت پاشش سیال قرار می‌گیرند (تصویر چپ).

۳- طراحی و تنظیم حالات مختلف پاشش سیال کرایوژنیک CO₂

روش (تعداد و موقعیت قرارگیری نازل‌های) پاشش سیال کرایوژنیک CO₂ در پنج سطح مختلف است که با نام‌های Up1، Up2، Down، Down-Up1 و Down-Up2 نام‌گذاری شده‌اند که در ادامه هر یک از این روش‌های پنج‌گانه پاشش معرفی می‌شوند.

راستاهای پاشش مورد استفاده باید به قدری نسبت به یکدیگر تغییرات داشته باشند که اگر می‌توانند تغییری بر نتایج ماشینکاری ایجاد کنند، تاثیرشان نمایان شود. بدیهی است که اگر تغییرات راستای پاشش سیال کم باشد، تغییراتی که در نتایج ماشینکاری می‌تواند وجود داشته باشد، کمتر نشان داده می‌شود؛ به همین دلیل برای جلوگیری از رخداد چنین موضوعی، نازل هم در بالای ابزار و هم در پایین ابزار قرار گرفته و همچنین در دو حالتی که نازل در بالای ابزار است، اختلاف زاویه محسوس ۸۰ درجه بین آن‌ها در نظر گرفته شده است. در عین حال موقعیت نازل پاشش باید به‌گونه‌ای باشد که امکان تنظیم آن به‌صورت عملی امکان‌پذیر باشد. راستاهای پاشش به‌صورت معقول انتخاب شده‌اند، یعنی در صورتی که نازل در بالای اینسرت قرار گیرد، باید طبق روال مرسوم زاویه تند با سطح براده ابزار بسازد و در صورتی که نازل در پایین اینسرت قرار گیرد، باید بیشترین مقدار از سیال خنک‌کاری که خارج می‌شود را به سمت ناحیه برش بپاشد. سعی شده است تا فواصل خروجی نازل‌ها حداقل امکان به نوک ابزار نزدیک باشد تا تمرکز بیشتری از سیال بر موضع برش باشد؛ زیرا سیال با دورتر شدن از خروجی نازل، دارای تمرکز کمتر و به عبارتی پخش‌تر می‌شود. از طرفی نازل‌ها به‌دلیل تجمع براده‌ها به دور آن‌ها نمی‌توانند بیشتر از حدی معین، به نوک ابزار نزدیک باشند. از طرفی برای بررسی تاثیر خنک‌کاری در دو راستای مختلف از پاشش به‌صورت همزمان، هر یک از راستاهای پاشش با یکدیگر

۵- روش Down-Up2: همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، یک نازل در بالا و یک نازل در پایین اینسرت قرار گرفته است. این روش عملاً ترکیب روش‌های Up2 و Down است. با توجه به توضیح روش Up2، در روش Up2 نسبت به روش Up1 بخش بیشتری از پاشش سیال به قطعه‌کار اعمال و خنک‌کاری بیشتری روی آن انجام می‌شود. بنابراین در روش Down-Up2 نسبت به Down-Up1 نیز بخش بیشتری از پاشش سیال به قطعه‌کار اعمال و خنک‌کاری بیشتری روی آن انجام می‌شود؛ زیرا قطعه‌کار روبه‌روی نازل بالا و در مسیر جریان سیال قرار گرفته است.



شکل ۷) روش Down-Up2 در آزمون‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵؛ موقعیت قرارگیری نازل‌ها (تصویر راست) و نواحی که تحت پاشش سیال قرار می‌گیرند (تصویر چپ).

دبی پاشش سیال کرایوژنیک CO₂ به ناحیه برش در سه سطح مختلف با مقادیر ۱۲، ۱۸ و ۲۴ لیتر بر دقیقه است. در هر یک از روش‌های پاشش ذکر شده، با افزایش دبی از ۱۲ به ۲۴ l/min، سهم بیشتری از سیال به قطعه‌کار پاشش می‌شود و خنک‌کاری بیشتری روی آن انجام می‌شود. بدیهی است که با افزایش دبی پاششی، مقدار مصرف دی‌اکسیدکربن افزایش و هزینه خنک‌کاری هم بیشتر می‌شود. لازم به ذکر است که در پاشش‌های ۲ نازل، طبیعتاً دبی تنظیم شده و معین پاشش بین دو نازل تقسیم می‌شود و دبی خروجی هر نازل کمتر از حالات تک‌نازله است.

۴- تاثیر روش پاشش سیال کرایوژنیک و دبی پاشش بر مشخصه‌های خروجی فرآیند تراشکاری

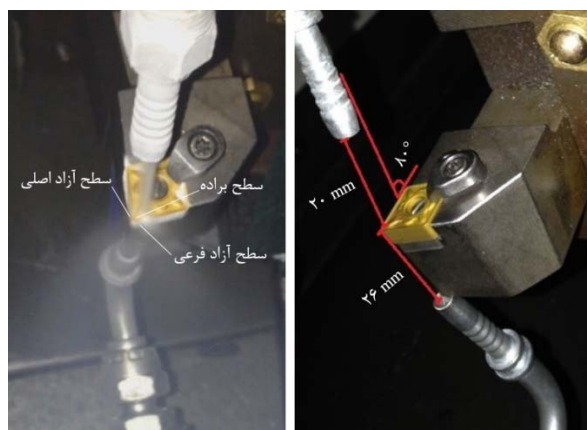
در ادامه، خرابی‌های ابزار در حین فرآیند تراشکاری شامل سایش سطح آزاد اصلی، لبه انباشته و لب‌پرشدگی ابزار و همچنین زبری سطح قطعه‌کار مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. نتایج مساحت سایش سطح آزاد اصلی ابزار و زبری سطح قطعه‌کار در جدول ۲ نشان داده شده است.

۳- روش Down: همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، یک نازل در پایین اینسرت قرار گرفته است. نازل در امتداد فصل مشترک سطوح آزاد اصلی و فرعی اینسرت قرار دارد. خروجی نازل از نوک برنده ابزار ۲۶ mm فاصله دارد. سیال مستقیماً به سطح آزاد اصلی و سطح آزاد فرعی اینسرت و قطعه‌کار پاشیده می‌شود. در این روش نسبت به روش Up1 بخش بیشتری از پاشش سیال به قطعه‌کار اعمال و خنک‌کاری بیشتری روی آن انجام می‌شود، چون قطعه‌کار عمدتاً در مقابل جریان سیال قرار دارد که به دلیل موقعیت قرارگیری نازل است. در این روش نسبت به روش Up2 بخش کمتری از پاشش سیال به قطعه‌کار اعمال و خنک‌کاری کمتری روی آن انجام می‌شود؛ چرا که خود قطعه‌کار کمتر در مقابل امتداد جریان سیال قرار دارد.



شکل ۵) روش Down در آزمون‌های ۷، ۸ و ۹؛ موقعیت قرارگیری نازل (تصویر راست) و نواحی که تحت پاشش سیال قرار می‌گیرند (تصویر چپ).

۴- روش Down-Up1: همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، یک نازل در بالا و یک نازل در پایین اینسرت قرار گرفته است. این روش عملاً ترکیب روش‌های Up1 و Down است.



شکل ۶) روش Down-Up1 در آزمون‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲؛ موقعیت قرارگیری نازل‌ها (تصویر راست) و نواحی که تحت پاشش سیال قرار می‌گیرند (تصویر چپ).

۱-۴- بحث و بررسی مساحت سایش سطح آزاد اصلی ابزار

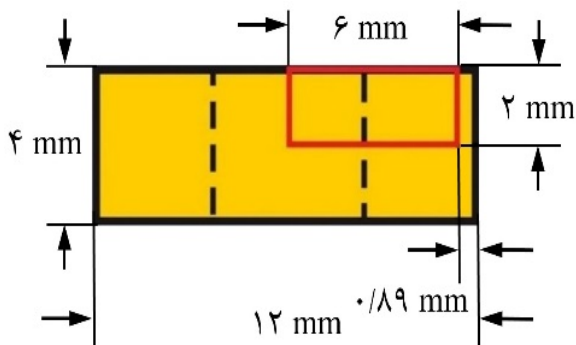
در تمام آزمایش‌های انجام‌شده، سطح آزاد اصلی ابزارهای برش دچار تغییراتی مثل سایندگی و رسوب ماده قطعه‌کار شده‌اند. تمامی این موارد با هم تحت عنوان سایش سطح آزاد اصلی ابزار به‌صورت کمی (عددی) از طریق محاسبه مساحت آن، برای تمام آزمایش‌ها بررسی شده‌اند. محدوده‌ای که این مساحت محاسبه می‌شود، مستطیلی به اندازه تقریباً یک‌چهارم کل سطح آزاد اصلی ابزار است؛ همان‌طور که در شکل ۸ این محدوده مشخص شده است و لازم به ذکر است که ابعاد و فواصل تعیین‌شده در این شکل کاملاً بر اساس مشخصات هندسی کد اینسرت ابزار مصرفی استفاده‌شده در این تحقیق لحاظ شده‌اند. بدیهی است که این محدوده، چارکی است که نوک ابزار در آن سمت باشد. محدوده در راستای طولی در مختصاتی که بخش منحنی‌شکل نوک ابزار به پایان می‌رسد یعنی به فاصله $0/89\text{mm}$ نسبت به بیرونی‌ترین قسمت ابزار یعنی نوک آن (که این مقدار با توجه به تصویر تعیین شده است) شروع می‌شود، زیرا سطح تخت ابزار که مساحت سایش در آن محاسبه می‌شود، موازی با دوربین میکروسکوپ است و بنابراین تصویر آن بخش تخت ابزار مقدار صحیحی از محاسبه مساحت را ارائه می‌دهد و همچنین بدیهی است که سطحی از ابزار که به شکل منحنی است، در موازات دوربین میکروسکوپ نیست و بنابراین محاسبه‌ای که از تصویر بخش منحنی‌شکل ابزار انجام می‌شود، مقدار صحیحی از مساحت را ارائه نمی‌دهد. به همین دلیل در تصویر سطح جانبی ابزار، بخش منحنی‌شکل در محدوده محاسبه قرار نگرفته است و محدوده در راستای طولی از فاصله $0/89\text{mm}$ از نوک ابزار شروع شده است. در واقع، بخش نوک ابزار منحنی‌شکل است و با بخشی از ابزار که دارای سطح تخت است، هم‌سطح نیست؛ پس هرچه محدوده مساحت‌ها، قسمت‌های منحنی را شامل نشود، مساحت حاصل دقت بیشتری خواهد داشت.

این محدوده در راستای طولی به اندازه 6mm از نوک ابزار (وسط ضلع اینسرت در راستای لبه برشی اصلی) ادامه می‌یابد. محدوده در راستای عرضی، از لبه برشی اصلی شروع می‌شود و تا 2mm در زیر این خط (وسط ضلعی که در پایین نوک ابزار قرار دارد) ادامه می‌یابد. اگر این فواصل در راستای طولی کمتر از 6mm و در راستای عرضی کمتر از 2mm در نظر گرفته شود، مساحت سایش برخی از ابزارها تقریباً مساوی می‌شود، ولی با بیشتر در نظر گرفتن محدوده، تفاوت سایش‌ها بیشتر معلوم می‌شود و دقیق‌تر محاسبه می‌شوند. اگر این فواصل در راستای طولی بیشتر از 6mm و در راستای عرضی بیشتر از 2mm در نظر گرفته شود، این فواصل از نوک ابزار بسیار دور می‌شود و فواصل دورتر از نوک ابزار اهمیت کمتری دارند. در ضمن با در نظر گرفتن وسط اضلاع ذکرشده (یعنی 6mm و 2mm) تقریباً یک‌چهارم کل سطح آزاد را می‌توان بررسی نمود. برای اندازه‌گیری کمی و تخمین مساحت ناحیه سایش سطح آزاد اصلی ابزار روی تصاویر گرفته‌شده از اینسرت‌های ابزار با

میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ۲۰ برابر، از نرم‌افزار Image J استفاده شده است.

جدول ۲) نتایج مساحت سایش سطح آزاد اصلی ابزار و زبری متوسط سطح قطعه‌کار حاصل از آزمایش‌های تراشکاری کرایونژنیک

شماره آزمون	مساحت سایش سطح آزاد اصلی (mm^2)	زبری متوسط سطح (μm)
۱	۰/۴۵۵	۱/۲۳
۲	۰/۳۸۲	۱/۰۴
۳	۰/۴۰۸	۰/۹۵
۴	۱/۴۰۲	۴/۱۸
۵	۱/۱۹۳	۱/۱۳
۶	۰/۴۷۴	۱/۸۰
۷	۰/۸۰۶	۱/۳۲
۸	۰/۴۰۰	۱/۱۹
۹	۰/۵۰۲	۱/۶۵
۱۰	۰/۷۷۴	۲/۴۴
۱۱	۰/۴۴۰	۱/۴۹
۱۲	۰/۸۱۲	۱/۸۷
۱۳	۷/۲۲۵	۵/۱۹
۱۴	۱/۶۱۱	۳/۴۷
۱۵	۱/۵۲۴	۱/۰۳



شکل ۸) نمای شماتیک جانبی ابزار و محدوده‌ای که مساحت سایش سطح آزاد ابزار در آن محاسبه می‌شود

شکل ۹، به‌عنوان مثالی از سطح آزاد اصلی ابزار استفاده‌شده در آزمون ۳ که در آن مرز محدوده مساحت سایش توسط یک منحنی بسته رنگی مشخص شده و با توجه همزمان به میزان سایش ابزار، زبری سطح قطعه‌کار و مقدار مصرفی دبی پاشش سیال CO_2 ، بهینه‌ترین حالت است، ارائه شده است. نتایج مقادیر مساحت سایش سطح آزاد اصلی برای تمام آزمون‌ها در جدول ۲ درج شده است. نمودار ۱، اثر تغییرات روش‌های پاشش سیال کرایونژنیک و دبی مصرفی سیال را روی مساحت سایش سطح آزاد اصلی ابزار نشان می‌دهد. طبق این نمودار و مقادیر جدول ۲، کمترین مقدار مساحت سایش در روش خنک‌کاری Up1 و دبی (1 l/min) ؛ آزمون ۲) رخ داده است که مقدار آن $0/382\text{mm}^2$ است.

برشی می‌شود و به همین دلیل، نرخ سایش ابزار در حالت Down نسبت به حالت Up1 بیشتر و نسبت به حالت Up2 کمتر است. (جدول ۲؛ نمودار ۱)

در مورد دلیل نتایج مذکور می‌توان بیان کرد که روشی که خنک‌کاری بیشتری دارد، دمای قطعه کار را بیشتر کاهش داده که موجب افزایش استحکام و سختی مواد و کاهش میزان تغییر شکل پلاستیک ماده قطعه کار می‌شود و از طرفی کاهش دما موجب کاهش چقرمگی و میزان داکتیل بودن مواد شده و قابلیت شکنندگی آن‌ها را افزایش می‌دهد. این افزایش استحکام و سختی قطعه کار و کاهش چقرمگی آن موجب افزایش مقاومت به سایش قطعه کار شده و در نتیجه میزان سایش سطح آزاد اصلی ابزار افزایش خواهد یافت [15].

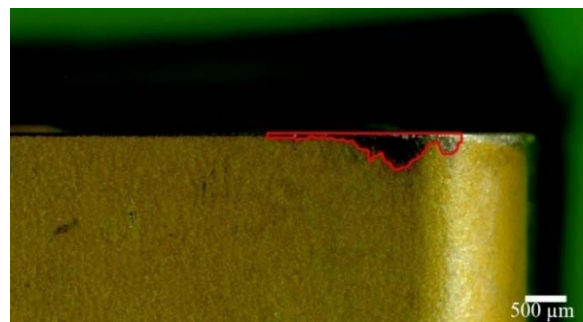
۲-۱-۴- بررسی مساحت سایش سطح آزاد اصلی ابزار در دبی‌های مختلف پاشش

با توجه به نمودار ۱ و جدول ۲، برای تمام حالات پاشش، مساحت سایش سطح آزاد اصلی ابزار حاصل از دبی ۱۸ l/min نسبت به دبی ۲۴ l/min کمتر است. به این دلیل که دبی ۲۴ l/min خنک‌کاری بیشتری از قطعه کار را انجام می‌دهد، دمای قطعه کار را بیشتر کاهش داده که باعث افزایش استحکام و سختی قطعه کار و کاهش چقرمگی آن و در نهایت موجب افزایش مقاومت به سایش قطعه کار شده و در نتیجه میزان سایش سطح آزاد اصلی ابزار افزایش می‌یابد.

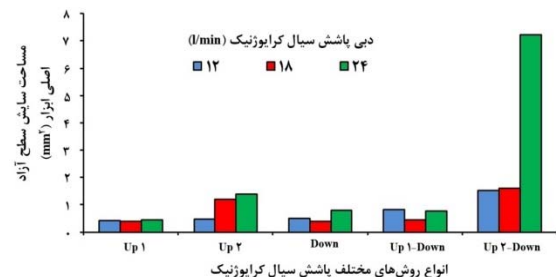
برای روش‌های Up1، Down، Up1 و Down-Up1 مساحت سایش حاصل از دبی ۱۸ l/min نسبت به دبی ۱۲ l/min کمتر است. به این دلیل که دبی ۱۲ l/min نرخ خنک‌کاری کمتری نسبت به دبی ۱۸ l/min انجام می‌دهد، در نتیجه دما در ناحیه برش را کمتر کاهش می‌دهد و از آنجایی که دمای بیشتر، سایش بیشتری از سطح آزاد به جا می‌گذارد، در نتیجه سایش حاصل از دبی ۱۲ l/min بیشتر از دبی ۱۸ l/min است (جدول ۲؛ نمودار ۱).

برای روش‌های Up2 و Down-Up2 مساحت سایش حاصل از دبی ۱۸ l/min نسبت به دبی ۱۲ l/min بیشتر است. به این دلیل که قطعه کار در روش‌های Up2 و Down-Up2 مقابل خروجی نازل بالایی قرار دارد، رابطه مستقیم قوی‌تری بین دبی ۱۲ تا ۲۴ l/min با سایش ابزار (به دلیل افزایش استحکام و سختی قطعه کار و کاهش چقرمگی آن که موجب افزایش مقاومت به سایش قطعه کار می‌شود) در این دو روش نسبت به روش‌های دیگر وجود دارد؛ یعنی برای این دو روش با افزایش بیشتر دبی ۱۲ تا ۲۴ l/min به دلیل خنک‌کاری بیشتر سطح قطعه کار دمای آن بیشتر کاهش می‌یابد که باعث افزایش استحکام و سختی قطعه کار و کاهش چقرمگی آن و در نهایت موجب افزایش مقاومت به سایش قطعه کار شده و در نتیجه میزان سایش سطح آزاد اصلی ابزار افزایش می‌یابد (جدول ۲؛ نمودار ۱).

باید به این نکته توجه شود که دو روش Up2 و Down-Up2 به دلیل وجود یک نازل با موقعیت یکسان در بالای اینسرت که



شکل ۹) سطح آزاد اصلی ابزار در آزمون ۳ تحت روش پاشش Up1 و دبی ۱۲ l/min (20 X)



نمودار ۱) اثر تغییرات روش‌های پاشش سیال کرایوژنیک و دبی پاشش بر مقدار مساحت سایش سطح آزاد اصلی ابزار

۲-۱-۴- بررسی مساحت سایش سطح آزاد اصلی ابزار در روش‌های مختلف پاشش

با توجه به نمودار ۱ و جدول ۲، مساحت سایش حاصل از روش Up1 برای هر سه مقدار دبی، نسبت به روش Up2 کمتر است. همچنین سایش سطح آزاد اصلی ابزار در روش Down-Up1 برای هر سه مقدار دبی، نسبت به روش Down-Up2 که در آن‌ها روش Down با روش‌های Up1 و Up2 ترکیب شده است، کمتر است. این دو مقایسه مذکور نشان می‌دهد که همواره مساحت سایش حالتی که در آن Up1 وجود دارد نسبت به حالتی که در آن Up2 به کار رفته کمتر است.

با توجه به روش‌های پاشش که در بخش ۳ توضیح داده شد، روش Up1 نسبت به Up2 و همچنین روش Down-Up1 نسبت به Down-Up2 موجب خنک‌کاری کمتر سطح قطعه کار می‌شود و در حالت Up1 و Down-Up1، سهم بیشتری از پاشش سیال کرایوژنیک روی ابزار برشی متمرکز است و به این دلیل نرخ سایش ابزار در حالت Up1 نسبت به Up2 و همچنین نرخ سایش در حالت Down-Up1 نسبت به Down-Up2 کمتر است.

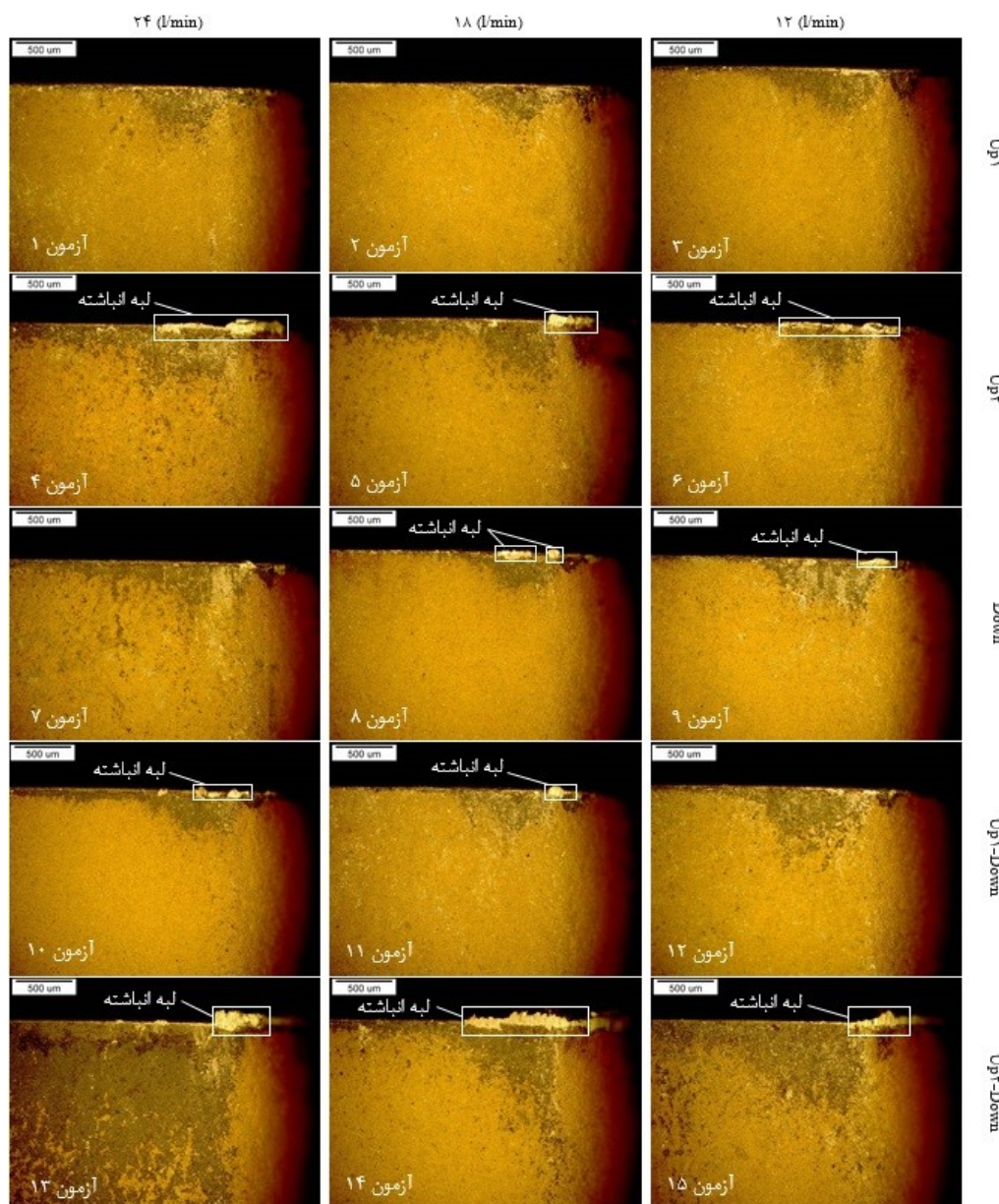
برای هر سه مقدار دبی مختلف، مساحت سایش سطح آزاد اصلی ابزار حاصل از حالت Down نسبت به Up1 بیشتر و نسبت به حالت Up2 کمتر است (غیر از روش Down و روش Up2 در دبی ۱۲ l/min با توجه به روش‌های پاشش که در بخش ۳ توضیح داده شد، میزان خنک‌کاری سطح قطعه کار در حالت Down نسبت به Up1 بیشتر و نسبت به حالت Up2 کمتر است و لذا سهم کمتری از پاشش سیال کرایوژنیک متوجه سطوح ابزار

است. همچنین برای تمام مقادیر مختلف دبی پاشش سیال کرایوژنیک، لبه انباشته در روش Down-Up1 نسبت به روش Down-Up2 که در آن‌ها روش Down با روش‌های Up1 و Up2 ترکیب شده است، کمتر است. این دو مقایسه نشان می‌دهد که همواره لبه انباشته روشی که در آن Up1 وجود دارد، نسبت به روشی که در آن Up2 به کار رفته، کمتر است. لبه انباشته حاصل از روش Down نسبت به Up1 بیشتر و نسبت به Up2 کمتر است. البته در روش‌های Up1 و Down در دبی ۲۴۱/min لبه انباشته‌ای ملاحظه نمی‌شود و در روش‌های Up2 و Down در دبی ۱۸۱/min لبه انباشته تقریباً برابری ملاحظه می‌شود. دلیل این تفاوت‌ها در تشکیل لبه انباشته، موقعیت نازل‌های پاشش سیال کرایوژنیک CO₂ و در نتیجه جهاتی است که جریان سیال خنک‌کار روی سطوح ابزار حرکت می‌کند.

به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۷ نشان داده شده است، برای سایش ابزار به‌ازای تغییر دبی از ۱۲ تا ۲۴۱/min رفتار مشابهی دارند. همچنین در مورد دو روش Up1 و Down-Up1 به دلیل وجود یک نازل با موقعیت یکسان در بالای اینسرت که به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۶ نشان داده شده است، برای سایش ابزار به‌ازای تغییر دبی از ۱۲ تا ۲۴۱/min رفتار مشابهی دارند.

۲-۴- بحث و بررسی لبه انباشته ابزار

شکل ۱۰، تصاویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ۵۰ برابر از سطح آزاد اصلی ابزار را در تمام آزمون‌های ماشینکاری، تحت روش‌های مختلف پاشش و دبی‌های متفاوت برای بررسی و مقایسه لبه انباشته نشان می‌دهد. در حالت Up1 و برای هر سه مقدار دبی، هیچ‌گونه لبه انباشته‌ای ملاحظه نمی‌شود؛ در حالی که در روش Up2 و برای هر سه مقدار مختلف دبی، لبه انباشته تشکیل شده

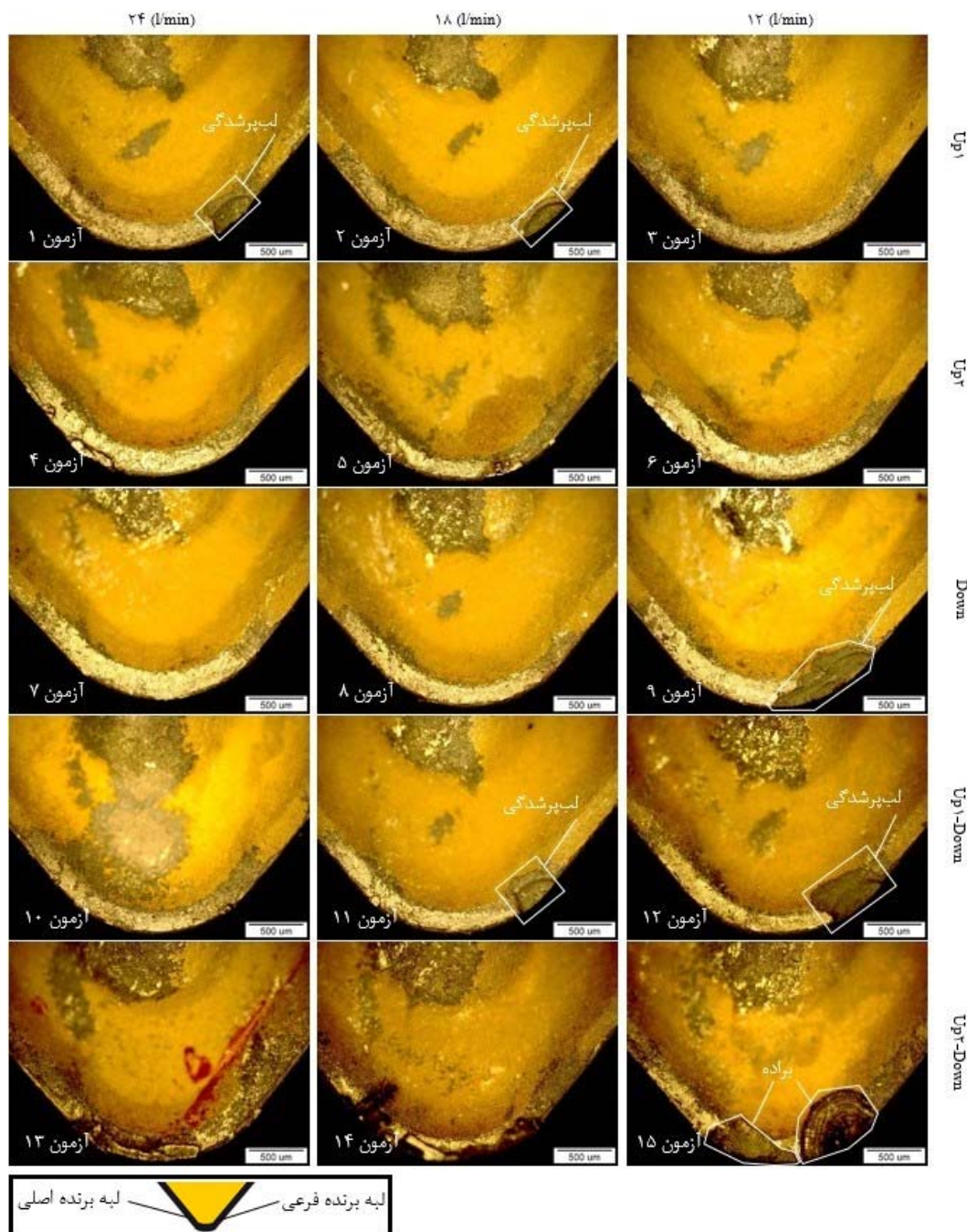


شکل ۱۰) تصاویر میکروسکوپی سطح آزاد اصلی ابزار در تمام آزمون‌ها تحت روش‌های مختلف پاشش و دبی‌های متفاوت برای مقایسه لبه انباشته (50 x)

تحقیق جاری، عملیات روتراشی طی ۱۰ پاس صورت می‌گیرد که با شروع هر پاس به ابزار، ضربه (شوک مکانیکی) وارد شده است و ممکن است ضربه حین انجام برش اتفاق افتاده باشد. وجود ترک یا عیب در سطوح و لبه‌های برنده ابزار به واسطه سایش شدید حاصل از فرآیند ماشینکاری می‌تواند دلیل دیگری برای لب‌پرشدگی در آزمون‌های ذکرشده باشند. با توجه به شکل ۱۱ (آزمون ۱۵)، براده حاصل از ماشینکاری به نوک ابزار چسبیده (جوش خورده) است که این پدیده نباید با لب‌پرشدگی ابزار اشتباه گرفته شود و این دو با یکدیگر متفاوت هستند.

۳-۴- بحث و بررسی لب‌پرشدگی ابزار

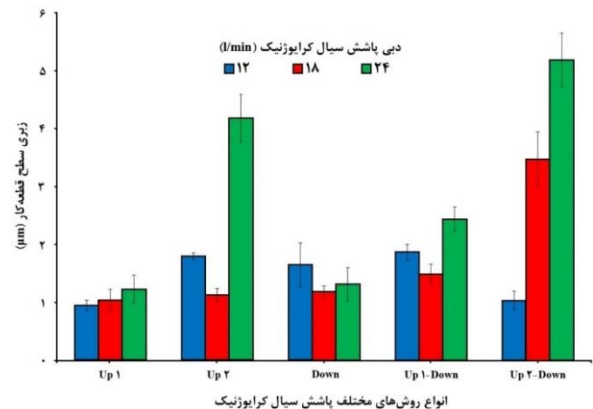
شکل ۱۱، تصاویر میکروسکوپی نوری در بزرگنمایی ۵۰ از سطح براده ابزار را در تمام آزمون‌های ماشینکاری، تحت روش‌های مختلف پاشش و دبی‌های متفاوت برای بررسی و مقایسه لب‌پرشدگی ابزار، نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در آزمون‌های ۱، ۲، ۹، ۱۱ و ۱۲، لب‌پرشدگی در لبه برنده فرعی اتفاق افتاده است. عمل خنک‌کاری سیال کرایوژنیک، تناوب حرارتی را که ابزار برش با آن روبه‌رو است، افزایش داده و این تغییرات تناوبی در دمای ابزار حین برش ممکن است منجر به خستگی حرارتی (شوک حرارتی) شود. از طرفی در آزمون‌های ماشینکاری



شکل ۱۱) تصاویر میکروسکوپی سطح براده ابزار در تمام آزمون‌ها تحت روش‌های مختلف پاشش و دبی‌های متفاوت برای مقایسه لب‌پرشدگی (50 x)

۴-۴- بحث و بررسی زبری سطح قطعه کار

برای بیان زبری سطح، از مقدار متوسط حسابی (Ra) استفاده شده است. نتایج آزمایش‌های زبری‌سنجی در جدول ۲ نشان داده شده است. هر عدد ذکر شده در ستون زبری سطح در جدول ۲ میانگین سه بار زبری‌سنجی برای هر سطح تراشکاری شده در هر آزمون است. نمودار ۲، اثر تغییرات حالت پاشش و دبی پاشش سیال کرایونیک CO₂ را روی زبری سطح قطعه کار نشان می‌دهد. کمترین زبری سطح در روش خنک‌کاری Up1 و دبی ۱۲/۱min (آزمون ۳) رخ داده است که مقدار آن ۰/۹۵mm است.



نمودار ۲) اثر تغییرات روش‌های پاشش سیال کرایونیک و دبی پاشش روی زبری سطح قطعه کار

با توجه به نمودار ۲ و مقادیر جدول ۲، برای هر سه مقدار دبی پاشش، زبری سطح حاصل از روش Up1 نسبت به روش Up2 کمتر است. همچنین زبری سطح ماشینکاری شده در روش Down-Up1 نسبت به روش Down-Up2 که در آن‌ها روش Down با روش‌های Up1 و Up2 ترکیب شده است، کمتر است (البته غیر از دبی ۱۲/۱min، این دو مقایسه نشان می‌دهد که به‌طور کلی و عمدتاً زبری سطح روشی که در آن Up1 وجود دارد، نسبت به روشی که در آن Up2 به‌کار رفته کمتر است. همچنین، برای هر سه مقدار دبی پاشش، زبری سطح حاصل از روش Up1 نسبت به روش Down کمتر است و همچنین زبری سطح حاصل از روش Up2 نسبت به روش Down بیشتر است (غیر از دبی ۱۲/۱min).

برای تمام روش‌ها زبری سطح حاصل از دبی ۱۲/۱min نسبت به دبی ۲۴/۱min کمتر است. برای روش‌های Up1 و Down-Up2 زبری سطح حاصل از دبی ۱۲/۱min نسبت به دبی ۱۸/۱min بیشتر است و برای روش‌های Up2، Down، Up1 و Down-Up1 زبری سطح حاصل از دبی ۱۲/۱min نسبت به ۱۸/۱min کمتر است (جدول ۲؛ نمودار ۲).

با بررسی کلی نتایج زبری‌سنجی اشاره‌شده در قبل، ملاحظه می‌شود که مقدار زبری سطح قطعه کار، بسته به روش (تعداد و موقعیت قرارگیری نازل‌های) پاشش سیال و دبی سیال کرایونیک می‌تواند متفاوت باشد. زیرا زبری سطح قطعه کار

ماشینکاری شده تابع نوع، نرخ و وسعت خرابی‌های ابزار برشی است و مشاهده شد که نوع خرابی‌های ابزار بسته به روش پاشش و دبی پاشش سیال کرایونیک، تغییر قابل توجهی می‌کند. با توجه به مراجع و تحقیقات مشابه، سایش بیشتر ابزار [3, 9, 15-17]، لبه انباشته بیشتر [1, 9] و وجود لب‌پشدگی بیشتر در لبه ابزار [1, 5, 18] همگی موجب افزایش زبری سطح قطعه کار ماشینکاری شده می‌شوند. هر کدام از موارد سایش سطح آزاد اصلی، لبه انباشته و لب‌پشدگی می‌توانند تاثیر غالبی بر تغییرات مقدار زبری سطح قطعه کار نسبت به دیگر موارد داشته باشند. به‌عبارت دیگر ممکن است در یک تست طراحی شده ماشینکاری، لبه انباشته نسبت به سایش سطح آزاد اصلی ابزار و لب‌پشدگی در لبه برنده فرعی، تاثیر بیشتری بر تغییرات زبری سطح قطعه کار ماشینکاری شده داشته باشد.

۵- نتایج

نتایج حاصل از آزمایشات تراشکاری کرایونیک فولاد ضدزنگ 304L به کمک سیال CO₂ در تحقیق جاری که در آن پنج روش مختلف از پاشش سیال (Up1, Up2, Down, Up1-Down, Up2-Down) مبتنی بر تعداد و موقعیت قرارگیری نازل‌های پاشش و سه مقدار متفاوت از دبی پاشش (۱۲، ۱۸ و ۲۴ لیتر بر دقیقه) به‌کار گرفته شده‌اند، به شرح زیر هستند:

برای هر سه مقدار دبی، مساحت سایش حاصل از روش Up1 نسبت به روش Up2 کمتر است. همچنین این سایش در روش Down-Up1 نسبت به روش Down-Up2 کمتر است. مساحت سایش حاصل از روش Down نسبت به Up1 بیشتر و نسبت به Up2 کمتر است (غیر از روش Down و روش Up2 در دبی ۱۲/۱min). برای تمام روش‌ها مساحت سایش حاصل از دبی ۱۲/۱min نسبت به دبی ۲۴/۱min، کمتر است. برای روش‌های Up1، Down، Up1 و Down-Up1 مساحت سایش حاصل از دبی ۱۲/۱min نسبت به دبی ۱۸/۱min کمتر است. برای روش‌های Up2 و Down-Up2 مساحت سایش حاصل از ۱۲/۱min نسبت به دبی ۱۸/۱min بیشتر است. در روش Up1 هیچ‌گونه لبه انباشته‌ای ملاحظه نمی‌شود، در حالی که در روش Up2 لبه انباشته تشکیل شده است. همچنین لبه انباشته در روش Down-Up1 نسبت به روش Down-Up2 کمتر است. لبه انباشته حاصل از روش Down نسبت به Up1 بیشتر و نسبت به Up2 کمتر است، البته در روش Down در دبی ۱۲/۱min لبه انباشته‌ای ملاحظه نمی‌شود و در روش‌های Up2 و Down در دبی ۱۲/۱min لبه انباشته تقریباً برابری ملاحظه می‌شود. زبری سطح حاصل از روش Up1 نسبت به روش Up2 کمتر است. همچنین زبری سطح در روش Down-Up1 نسبت به روش Down-Up2 کمتر است (غیر از دبی ۱۲/۱min). زبری سطح حاصل از روش Up1 نسبت به روش Down کمتر است. زبری سطح حاصل از روش Up2 نسبت به روش Down بیشتر است

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری فرستاده نشده است.

تعارض منافع: مقاله حاضر، هیچ گونه تعارض منافعی با سازمانها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: دانیال دیندار (نویسنده اول)، روش شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)، بهزاد جباری پور (نویسنده دوم)، روش شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیل گر داده ها (۵۰٪).

منابع مالی: توسط نویسنده اول مقاله تامین شده است.

منابع

- 1- Kalpakjian S, Schmid SR. Manufacturing engineering and technology. 1st Volume. 4th Edition. Besharati Givi MK, translator. Tehran: Institute of Publications and Printing of Tehran University; 2002. pp. 708-779. [Persian]
- 2- Busch K, Hochmuth C, Pause B, Stoll A, Wertheim R. Investigation of cooling and lubrication strategies for machining high-temperature alloys. *Procedia CIRP*. 2016;41:835-840.
- 3- Yildiz Y, Nalbant M. A review of cryogenic cooling in machining processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008;48(9):947-964.
- 4- Blau P, Busch K, Dix M, Hochmuth C, Stoll A, Wertheim R. Flushing strategies for high performance, efficient and environmentally friendly cutting. *Procedia CIRP*. 2015;26:361-366.
- 5- Jerold BD, Kumar MP. Machining of AISI 316 stainless steel under carbon-di-oxide cooling. *Materials and Manufacturing Processes*. 2012;27(10):1059-1065.
- 6- Hong SH, Markus I, Jeong WC. New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2001;41(15):2245-2260.
- 7- Ali Khan A, Ahmed MI. Improving tool life using cryogenic cooling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;196(1-3):149-154.
- 8- Gupta MK, Singh G, Sood PK. Experimental investigation of machining AISI 1040 Medium carbon steel under cryogenic machining: A comparison with dry machining. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 2015;96:373-379.
- 9- Jerold BD, Kumar MP. Experimental comparison of carbon-dioxide and liquid nitrogen cryogenic coolants in turning of AISI 1045 steel. *Cryogenics*. 2012;52(10):569-574.
- 10- Klocke F, Settineri L, Lung D, Priarone PC, Arft M. High performance cutting of gamma titanium aluminides: Influence of lubricoolant strategy on tool wear and surface integrity. *Wear*. 2013;302(1-2):1136-1144.
- 11- Kalyan Kumar KVBS, Choudhury SK. Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;203(1-3):95-101.
- 12- Magadam S, Arun Kumar S, Yoganath VG, Srinivasa CK. Cryogenic machining of SS304 steel. 5th International & 26th All India Manufacturing

(غیر از دبی ۱۲۱/min). برای تمام روشها زبری سطح حاصل از دبی ۱۲۱/min نسبت به دبی ۲۴۱/min کمتر است. برای روشهای Up1 و Down-Up2 زبری سطح حاصل از دبی ۱۸۱/min نسبت به دبی ۱۲۱/min بیشتر است و برای روشهای Up2, Down و Down-Up1 زبری سطح حاصل از دبی ۱۸۱/min نسبت به دبی ۱۲۱/min کمتر است.

میانگین مساحت سایش هر یک از روشهای پاشش Up1, Down-Up2, Down, Up1, Down-Up1 و Down-Up2 به ترتیب برابر با ۰/۴۱۵، ۰/۲۳، ۰/۵۶۹، ۰/۶۷۵ و ۳/۴۵۳ میلی متر مربع هستند. کمترین میانگین مربوط به روش Up1 است که نسبت به میانگین سایش روشهای مذکور به ترتیب به مقادیر ۵۹/۴، ۲۷/۱، ۳۸/۵ و ۸۷/۹٪ کمتر است. میانگین زبری هر یک از روشهای پاشش Up1, Down-Up2, Down, Up1 و Down-Up2 به ترتیب برابر با ۰/۰۷، ۰/۳۷، ۰/۳۹، ۱/۹۳ و ۳/۲۳ میکرومتر است. کمترین میانگین مربوط به روش Up1 است که نسبت به میانگین زبری روشهای مذکور به ترتیب به مقادیر ۲۲/۶، ۴۴/۵ و ۶۶/۸٪ کمتر است. میانگین مساحت سایش هر یک از دبیهای پاشش ۱۲، ۱۸ و ۲۴ لیتر بر دقیقه به ترتیب برابر با ۰/۷۷۴، ۰/۸۰۵ و ۲/۱۳۲ میلی متر مربع است. کمترین میانگین مربوط به دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه است که نسبت به میانگین سایش دبیهای مذکور به ترتیب ۳/۹ و ۶۳/۷٪ کمتر است. میانگین زبری هر یک از دبیهای پاشش ۱۲، ۱۸ و ۲۴ لیتر بر دقیقه، به ترتیب برابر با ۱/۴۶، ۱/۶۶ و ۲/۸۷ میکرومتر است. کمترین میانگین مربوط به دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه است که نسبت به میانگین زبری دبیهای مذکور به ترتیب به مقادیر ۱۲/۳ و ۴۹/۲٪ کمتر است.

روش Up1 در هر سه دبی با توجه به اینکه کمترین سایش ابزار، لبه انباشته و زبری سطح را نسبت به روشهای دیگر در همان مقدار دبی برابر ایجاد می کند، موثرترین روش بر ابزار و قطعه کار است.

در یک جمع بندی کلی می توان بیان کرد که کمترین سایش سطح آزاد اصلی ابزار در روش خنک کاری Up1 و مقدار دبی دبی ۱۸۱/min و کمترین زبری سطح قطعه کار در روش Up1 و دبی ۱۲۱/min به دست آمد. با توجه همزمان به ملاحظات اقتصادی برای کاهش مقدار مصرف دبی پاشش سیال CO₂ و رسیدن به حداقل مقدار سایش سطح آزاد اصلی ابزار، لبه انباشته ابزار و زبری سطح قطعه کار، نحوه پاشش و دبی بهینه به ترتیب به صورت Up1 و ۱۲۱/min به دست آمدند. لازم به ذکر است که این حالت بهینه کرایونیک، در مقایسه با روش خشک و تحت پارامترهای برشی مختلف تحت یک سری آزمایشاتی دیگر مورد بررسی قرار گرفت که در آن، نتایج حاصل از کرایونیک بهتر از خشک بوده است و همچنین با افزایش مقادیر پارامترهای برشی تاثیر مفید روش کرایونیک در مقایسه با خشک مشهودتر است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

requirements of cryogenic cooling process using liquid nitrogen in turning. The second National Conference on Manufacturing Engineering, Islamic Azad University of Najafabad Branch, Iran, October 28, 2009. Tehran: civilica; 2009. [Persian]

16- Sharma VS, Dogra M, Suri NM. Cooling techniques for improved productivity in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2009;49(6):435-453.

17- Kaynak Y, Karaca HE, Jawahir IS. Surface integrity characteristics of NiTi shape memory alloys resulting from dry and cryogenic machining. *Procedia CIRP*. 2014;13:393-398.

18- Gupta MK, Sood PK. 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*. 2016;97(1):63-69.

Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12th-14th, 2014, IIT

Guwahati, Assam, India. Guwahati: Indian Institute of Technology; 2014?.

13- Mayer P, Skorupski R, Smaga M, Eifler D, Aurich JC. Deformation induced surface hardening when turning metastable austenitic steel AISI 347 with different cryogenic cooling strategies. *Procedia CIRP*. 2014;14:101-106.

14- Zurecki Z, Ghosh R, Frey JH. Investigation of white layers formed in conventional and cryogenic hard turning of steels. ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 15-21, 2003, Washington, DC, USA. New York: ASME; 2008.

15- Tajdari M, Zare Chavoshi S, Shahbazi E. Design and