



تاثیرات خنک کاری برودتی و روانکاری با نانوسیال بر زبری سطح و سایش ابزار در تراشکاری سوپرآلیاژ A286

سید حسن موسوی^۱ و بهنام داودی^{۲*}

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

^۲ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۸/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۵

چکیده

سوپرآلیاژها فلزاتی با چقرمگی بالا و هدایت حرارتی ضعیف هستند که قابلیت ماشینکاری پایینی دارند. سایش شدید ابزار و زبری سطح نامناسب در ماشینکاری اینگونه مواد، از چالش‌های اصلی در ماشینکاری است. در پژوهش حاضر، تاثیر نوع سیال برش به همراه روش اعمال آن تحت عنوان حداقل مقدار روانکار-خنک‌کار بر زبری سطح قطعه‌کار و سایش ابزار در تراشکاری سوپرآلیاژ A286، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن با دو روش مرطوب و خشک مقایسه شده است. بدین منظور از روانکار پایه گیاهی و نانو ذرات در روانکاری با حداقل مقدار به همراه خنک کاری برودتی استفاده شده است. نتایج زبری سنجی تحت معیار R_a نشان داد که استفاده از روانکار پایه گیاهی به همراه نانو اکسید سیلیسیوم تحت روش حداقل مقدار روانکار و همچنین خنک کاری با استفاده از نیتروژن مایع، موجب کاهش ۳۰-۷۵٪ زبری سطح نسبت به روش خشک و کاهش ۱۵-۶۴٪ آن نسبت به روش مرطوب گردیده است. همچنین با توجه به تغییرات بسیار کم زبری سطح نسبت به تغییر پارامترهای برش، این روش حساسیت کمی به پارامترهای برش دارد. وجود نانو اکسید سیلیسیوم در سیال برش، موجب کاهش سطح تماس ابزار-براده شده و اصطکاک کاهش می‌یابد؛ در نتیجه موجب کاهش سایش ابزار و بهبود کیفیت سطح در روش حداقل مقدار روانکار-خنک‌کار می‌شود.

کلمات کلیدی: سوپرآلیاژ A286؛ حداقل مقدار روانکار-خنک‌کار؛ نانوسیال؛ زبری سطح؛ سایش ابزار.

On the Effects of Cryogenic Cooling and Lubrication with Nanofluid on Surface Roughness and Tool Wear in A286 Superalloys Turning

S. H. Musavi¹, B. Davoodi^{2,*}

¹ M.Sc., School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology., Tehran., Iran.

² Assoc. Prof., School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran., Iran.

Abstract

Super alloys, are metal with high toughness and low thermal conductivity that they have low machinability. Sever tool wear and unsuitable surface roughness in machining of these materials are the main challenges for machining process. In this study, the effect of the cutting fluid types under minimum quantity cooling-lubrication method on work piece surface roughness and tool wear in machining of A286 super alloy were studied and their results were compared with wet and dry methods. For this purpose, vegetable based lubricant and nanoparticles in minimum quantity lubrication along with cryogenic cooling were used. The results of surface roughness survey under R_a criterion showed that using of vegetable-based lubricant with nano silicon oxide under minimum quantity lubrication and cooling with liquid nitrogen are caused the surface roughness decreased 30-75% compare to dry condition and 15-64% decreased compare to wet lubrication. Also due to very low surface roughness variations compare to cutting parameter variations; this method has low sensitivity to cutting parameter variations. Nano silicon oxide in cutting fluids caused to decrease metal-metal contact surface and friction and thus it reason to decrease the tool wear and improve the surface quality in minimum quantity cooling-lubrication method.

Keywords: A286 Superalloy; Minimum Quantity Lubrication-Cryogenic; Nano Fluid; Surface Roughness; Tool Wear.

۱- مقدمه

امروزه محققان طرح‌های مختلفی به منظور کاهش هزینه‌های ماشینکاری در شیوه‌ای سازگار با محیط زیست ارائه داده‌اند. در طول ماشینکاری فلزات، مکانیسم روانکاری-خنک‌کاری با داشتن اثراتی مانند، افزایش عمر ابزار، بهبود کیفیت سطح قطعه‌کار، کاهش درجه حرارت منطقه ماشین‌کاری و نیروهای برش، مهم‌ترین نقش را ایفا می‌کند؛ اما این امر برای سوپرآلیاژها و دیگر مواد سخت ماشینکاری شونده، تأثیر چندانی بر بهبود فرآیند ندارد [۱]. تحقیقات نشان می‌دهد که ۷ تا ۱۷ درصد از کل هزینه‌های تولید یک محصول در فرآیندهای مرتبط با ماشینکاری، شامل هزینه‌های مربوط به سیال برش مانند، خرید، حمل و نقل، نگهداری و پاکسازی بعد از مصرف آن است. از این رو، مهم است که از سیستم روانکار-خنک‌کار مناسب به همراه سیال برش کارآمد استفاده شود [۲]. برای حل این مشکلات، پیشرفت‌هایی در نحوه اعمال سیال برش به منطقه ماشینکاری از قبیل، ماشینکاری خشک و ماشینکاری با حداقل مقدار روانکار^۱ (MQL) و همچنین پیشرفت‌هایی خوبی در زمینه نوع روانکارهای مصرفی از نقطه نظر سازگاری با محیط زیست از قبیل، روغن‌های گیاهی، مایعات یونی، نانوروانکارها مختلف و مایعات بی‌خطر (مانند نیتروژن مایع) صورت گرفته است [۳]. در روش ماشینکاری خشک، از هیچ نوع سیال برشی برای خنک‌کاری یا روانکاری استفاده نمی‌شود. به عبارت دیگر، ماشینکاری تحت شرایط بدون سیال برش صورت می‌پذیرد. روش حداقل مقدار روانکار، یک روش روانکاری است که به تازگی توسعه یافته است. این روش با هدف کاهش مشکلات زیست محیطی، بیماری‌های اپراتوری، کاهش هزینه‌های ماشینکاری و افزایش کیفیت محصول ابداع شده است. در این روش مقدار بسیار اندک از سیال برش (عموماً سیال برش زیستی)، به صورت آئروسول^۲ به منطقه برش اسپری می‌شود. استفاده از روش MQL در فرآیندهایی که حجم بسیار زیادی از سیالات برش پایه معدنی استفاده می‌شود، بهترین گزینه برای کاهش مصرف آن و کاستن از هزینه‌ها است [۲].

به منظور افزایش بازده در فرآیندهای ماشینکاری، استفاده از پودر نانو در روانکارهای زیستی ترویج پیدا کرده است. نانوروانکارها با درصد وزنی بسیار کم در مقابل سیال پایه و همچنین با ابعاد بسیار کوچک در محدوده نانومتر (زیر ۱۰۰ نانومتر)، به صورت همگن به روانکار پایه اضافه می‌شوند. اضافه شدن یک فاز جامد که در بیشتر موارد فلزی نیز می‌باشد، موجب می‌شود که خاصیت انتقال حرارت سیال برش مورد نظر افزایش یافته، پایداری حرارتی آن در محدوده وسیعی از دما امکان‌پذیر شود [۴].

تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از روش ماشینکاری معمولی (روانکاری مرطوب) برای مواد سخت ماشینکاری شونده^۳ نمی‌تواند فشارهای بالا در منطقه برش را تحمل کند [۵] و حتی تحت چنین شرایطی استفاده از روانکاری مرطوب هیچ تأثیری بر روند ماشینکاری ندارد و عملاً در حضور سیال برش، ماشینکاری خشک صورت می‌پذیرد [۳]. زمانیکه از پودر نانو برای افزایش توانایی روانکاری سیال برش استفاده می‌شود، سیال روانکار، نانو ذرات را به همراه خود به منطقه برش حمل می‌کند. این ذرات، از فاز جامد هستند و برخلاف مایعات توانایی تحمل دما و فشار بسیار بالا در سطح تماس ابزار-قطعه‌کار را دارند و می‌توانند وظیفه روانکاری خود را به نحو کامل انجام دهند. وجود انبوه ذرات در ابعاد نانو با هندسه کروی شکل در سطح ابزار-براده باعث می‌شود که میزان سطح تماس براده و سطح براده ابزار کاهش یافته، این براده‌ها به صورت پیوسته روی این گوی‌های کوچک بغلند و از منطقه برش با اصطکاک بسیار کم دور شود [۴]. تحت چنین شرایطی، ضریب اصطکاک به مقدار چشم‌گیری کاهش یافته و حرارت تولید شده در این منطقه نیز، کاهش می‌یابد و از آنجایی که عامل اصلی کاهش عمر ابزار در ماشینکاری مواد سخت ماشینکاری شونده مانند سوپرآلیاژها تولید حرارت زیاد در این منطقه است [۳]، پس می‌توان با اضافه کردن پودر نانو به سیال برش، سایش ابزار را کاهش و با کنترل این پارامتر نیروهای ماشینکاری، زبری سطح و همچنین توان مصرفی و هزینه‌های ماشینکاری را کاهش داد [۴]. از طرفی به علت توانایی روانکاری بهتر نانو روانکارها

^۱ Minimum Quantity Lubrication (MQL)^۲ Aerosol^۳ Difficult-to Machine

سطح ماشین کاری شده قطعه کار فراهم نشود و کیفیت سطح بهتری ارائه شود [۱۰].

نیترژن یک گاز بی اثر است که ۷۸٪ از جو را تشکیل می دهد و سبک تر از هوا است و استفاده آن از نقطه نظر مباحث زیست محیطی، مشکلی در پی ندارد. نیترژن مایع با دمای جوش 196°C - و با شدت خنک کنندگی بسیار بالا در حین برخورد با منطقه ماشین کاری که دمای بالایی دارد، حرارت آن ناحیه را جذب کرده، به گاز تبدیل می شود [۱۱]. کاهش دمای منطقه برش، موجب کاهش سایش ابزار تحت مکانیسم چسبندگی شده، تحت چنین شرایطی طول عمر ابزار افزایش یافته و ماشین کاری با ابزار سالم موجب بهبود کیفیت سطح قطعه کار می شود. تبدیل شدن نیترژن از حالت مایع به گاز، موجب تشکیل یک لایه یا بالشتکی بین براده و سطح ابزار می شود که میزان سطح تماس آن دور را کاهش می دهد و همچنین به عنوان روانکار نیز عمل می کند. علاوه بر این، براده های تولید شده توسط این روش، هیچ اثری از سیال برش روی آنها باقی نمی ماند و نیاز به شستشوی براده قبل از عملیات ریخته گری نبوده، در نتیجه می توان آن را با هزینه کمتر بازیافت کرد [۱۲].

کریشنامورتی و همکاران [۱۳]، به بررسی بهبود عملکرد ماشین کاری آلیاژ تیتانیوم به کمک خنک کاری برودتی پرداختند. آنها اظهار داشتند که دمای بالا و موضعی منطقه برش در ماشینکاری آلیاژ Ti-6Al-4V، منجر به سایش شدید ابزار بدون روکش می شود. نویسندگان مشاهده کردند که با استفاده از نیترژن مایع، مقادیر نیروهای برش و زبری سطح در مقایسه با ماشین کاری خشک کاهش یافته است که علت این پدیده را کاهش دمای منطقه برش و تولید براده منقطع در حین ماشین کاری بیان کرده اند؛ همچنین آنها شاهد کاهش میزان چسبندگی مواد ریز قطعه کار بر سطح ابزار بوده اند که نشان دهنده کاهش سایش چسبندگی است.

شکرانی و همکاران [۱۴]، به بررسی تاثیر ماشین کاری برودتی با نیترژن مایع بر سلامت سطح آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V در فرآیند فرزکاری با CNC پرداختند. آنها آلیاژ Ti-6Al-4V را به دلیل سلامت سطح بسیار ضعیف در ماشین کاری و عمر کوتاه ابزار برش در گروه مواد سخت ماشین کاری شونده قرار داده اند. از این رو ماشین کاری این فلزات، از اهمیت خاصی برخوردار است. نتایج آزمایشات در

و همچنین بهبود شرایط ماشین کاری، مصرف سیال برش پایه معدنی نیز کاهش یافته و به تولید پاک تر نزدیک تر می شود.

همانطور که گفته شد، حرارت تولید شده از مکانیزم برش در فرآیند براده برداری، یک عامل محدود کننده برای تولید کیفیت سطح خوب برای قطعات تولید شده به روش ماشین کاری است [۶]. ویژگی های خاص سوپرآلیاژها مانند استحکام و چقرمگی بالا به همراه هدایت حرارتی ضعیف آن موجب شده که دمای منطقه برش به سرعت افزایش یافته، دو پدیده زیر در حین براده برداری اتفاق بیفتد:

۱- افزایش دما منطقه برش به همراه استحکام بالا در درجه حرارت های بالا برای سوپرآلیاژها موجب می شود که سایش شدیدی تحت مکانیزم ساییدگی^۱ در ابزار اتفاق بیافتد و تیزی لبه برش آن به سرعت از بین برود که این امر موجب کاهش کیفیت سطح قطعه کار (افزایش زبری سطح) می شود [۷].

۲- با افزایش دما، شرایط جوش خوردن تکه هایی از مواد براده در حین ماشین کاری به سطح ابزار زیاد شده و براده با لبه انباشته^۲ و همچنین براده با لایه انباشته^۳ تشکیل می شود [۸]. این مواد چسبیده شده به سطح براده ابزار که محصول سایش چسبندگی^۴ هستند، در ادامه ماشین کاری به علت نرم شدگی حرارتی^۵ از سطح ابزار جدا شده، به سطح ماشین کاری شده قطعه کار می چسبند که موجب افزایش شدید زبری سطح قطعه کار بعد از ماشین کاری می شود [۹].

یکی از کاربردی ترین راه های کنترل کیفیت سطح در رابطه با ماشین کاری سوپرآلیاژها، کاهش حجم تشکیل براده با لبه انباشته روی سطح ابزار برش و به دنبال آن بر سطح ماشین کاری شده قطعه کار است. برای این منظور، کنترل دمای منطقه برش با استفاده از یک سیال خنک کار با شدت خنک کنندگی بالا می تواند بهترین گزینه باشد. استفاده از سیال برودتی^۶ با دمای جوش بسیار پایین تر از دمای محیط موجب می شود که شرایط جوش خوردن مواد قطعه کار، به سطح ابزار و در گام بعدی، چسبیدن مواد از سطح ابزار به

¹ Abrasion Wear

² Built-up Edge

³ Built-up Layer

⁴ Adhesive Wear

⁵ Heat Softening Phenomenon

⁶ Cryogenic Cooling

سوپرآلیاژها به دلیل دارا بودن خواصی از قبیل: مقاومت بسیار خوب در برابر حرارت، حفظ خواص مکانیکی و شیمیایی خود در دماهای بالا، مقاومت بالا در برابر خوردگی و همچنین مقاومت بسیار خوب در برابر خزش و سایش، کاربرد خاصی در صنایع نیروگاهی و هوایی پیدا کرده‌اند [۱۷].

ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی این سوپرآلیاژ، به ترتیب در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است. طول تمام نمونه‌های مورد آزمایش برابر بوده، مقدار آن ۱۳۰ mm است. سطح مقطع آن دایروی با قطر ۶۰ mm است. ۸۰ mm از قطعه کار تحت فرآیند روتراشی با عمق برش ۱ mm قرار گرفته است.

۲-۲- مواد ابزار

ابزار با جنس‌های مختلفی برای تراشکاری فلزات سخت ماشین کاری شونده مانند سوپرآلیاژها، مورد استفاده قرار می‌گیرد که در میان آن‌ها ابزارهای کاربیدی پوشش‌دار و بدون پوشش، بیشترین کاربرد را در این زمینه دارند. شکل ابزار به همراه زاویه‌های ایجاد شده روی آن در نتایج خروجی این فرآیند، بسیار اثرگذار است. از این رو یک ابزار اصلاح شده، موجب کاهش دما در سطح براده ابزار می‌شود که کاهش لایه‌های مضر (براده با لبه انباشته) روی سطح ماشین کاری شده قطعه کار را به دنبال دارد و همچنین کیفیت سطح بهتری را حاصل می‌کند [۱].

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ A286

عنصر	درصد وزنی (%)
کربن	۰/۰۵
منگنز	۲
سولفور	۰/۰۲۵
فسفر	۰/۰۲۵
کروم	۱۴
سیلیسیم	۱
مولیبدن	۱/۲
نیکل	۲۵
آلومینیم	۰/۳۵
تیتانیوم	۲/۱
وانادیوم	۰/۲
برن	۰/۰۰۲
آهن	پایه

روش برودتی با نتایج دو روش فرزکاری خشک و مرطوب تحت پارامترهای برشی مختلف، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که میزان زبری سطح در روش ماشین کاری برودتی به مقدار ۳۱٪ و ۳۹٪ نسبت به دو روش مرطوب و خشک بهبود یافته است. آنچه که بیشتر از همه توجه نویسندگان را به خود جلب کرده بود، کاهش چشمگیر نقایص میکروسکوپی در روش برودتی نسبت به دو روش دیگر بوده است.

تازه‌کندی و همکاران [۱۵]، به بررسی بهبود عملکرد تراشکاری روی اینکونل ۷۴۰ پرداختند. آنها از روش Cryo-MQL^۱ برای اعمال سیال برش به منطقه ماشین کاری استفاده کرده‌اند و نتایج را با روش مرطوب مقایسه کرده‌اند. نتایج نشان داد که علاوه بر کاهش مصرف سیال برش در روش Cryo-MQL نسبت به حالت مرطوب، نیروهای برش و دمای نوک ابزار نیز کاهش یافته است.

مارودا^۲ و همکاران [۱۶]، به تجزیه و تحلیل فرم تشکیل براده طی تراشکاری فولاد ضدزنگ آستنیتی ۳۱۶L به روش Cryo-MQL پرداختند. آنها از یک نازل MQL برای روانکاری و از یک نازل هوا برای خنک کاری استفاده کردند. مشاهده شد که ضخامت براده تغییر شکل یافته در روش فوق نسبت به روش ماشین کاری خشک، کاهش یافته و شرایط تشکیل براده نیز بهبود یافته است. با شکل گیری آسان تر براده، شاهد بهبود کیفیت سطح قطعه کار بوده‌اند.

با توجه به پیشینه پژوهش، مطالعه‌ای در زمینه ماشین کاری Cryo-MQL پایه نانو صورت پذیرفته است. در پژوهش حاضر، به بررسی تاثیر روش Cryo-MQL پایه نانو بر کیفیت سطح قطعه کاری از گروه سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل A286 پرداخته شده است.

۲- تجهیزات

۲-۱- مواد قطعه کار

آلیاژ مورد استفاده در این پژوهش، سوپرآلیاژ A286 از خانواده سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل بوده، در گروه مواد سخت ماشین کاری شونده قرار می‌گیرد. این آلیاژ مانند دیگر

^۱ Cryogenic-MQL

^۲ Maruda

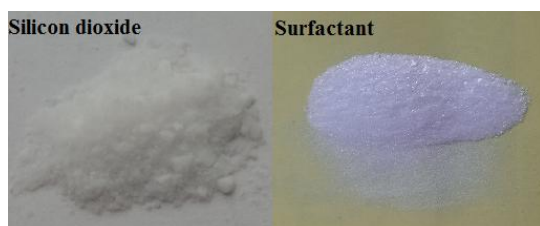
تامین هوا با فشار قابل تنظیم استفاده شد. هوا با فشار بالا از کمپرسور به دو مسیر تقسیم می‌شود. یک مسیر، هوایی فشرده با فشار ۶ bar مستقیماً به پشت نازل هدایت می‌شود. هوای هدایت شده بسمت نازل، از یک گیج فشار و یک شیر کنترل جریان عبور کرده تا کنترل دبی و فشار تزریق اسپری صورت گیرد. در مسیر دیگر، هوا با فشار ۲ بار وارد محفظه سیال (تانک سیال) می‌شود. محفظه سیال برش به وسیله یک لوله باریک به پشت نازل وصل می‌شود. در مسیر این لوله به پشت نازل، دو شیر کنترل جریان با مکانیزم متفاوت قرار دارد تا دبی جریان خروجی از تانک سیال به صورت دقیق کنترل شود. هوای فشرده و سیال خارج شده از محفظه سیال برش، وارد یک اتصال شده تا اختلاط اولیه آنها صورت گرفته و تشکیل یک اسپری اولیه را بدهند.

جدول ۲- خواص مکانیکی سوپراآلیاز A286

پارامتر	مقدار
استحکام کششی (MPa)	۱۰۰۰
استحکام تسلیم (MPa)	۶۵۵
درصد کاهش سطح مقطع (%)	۴۰

جدول ۳- خواص مکانیکی نانوذرات

خواص	اکسید سیلیسیوم
چگالی (g/cm ³)	۲.۲
نقطه ذوب (°C)	۱۶۰۰
شکل ظاهری	کروی
خلوص (%)	۹۸



شکل ۱- تصویر نانو اکسید سیلیسیوم و سورفکتانت

اسپری ناقص تولید شده، وارد یک نازل با قطر ورودی ۶ میلی‌متر می‌شود. مسیر انتقال ذرات روانکار داخل این نازل، یک مسیر غیر مستقیم و به همراه شکستگی است که تحت چنین شرایط، ذرات روانکار با عبور از این مسیر شکسته شده و ابعاد آن ریزتر شود و با خروج از نازل سرعت گرفته و به

ابزار مورد استفاده در این پژوهش، از نوع کاربید بدون پوشش با هندسه چهارگوش بوده که انتخاب شده از شرکت سندویک است. کد تجاری این اینسرت، SNMG 120404 با شعاع لبه 0.4mm به همراه براده‌شکن بوده، بنا بر توصیه شرکت سندویک برای ماشین‌کاری سوپراآلیازها با گرید 1105 گزینش شده است. ابزارگیر با کد PSBNR 2525 M12، مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۳- نانوروانکار

نانو ذرات موادی هستند که ابعادشان کمتر از ۱۰۰ نانومتر بوده، توسط روش‌های مختلف سنتز می‌شوند. مهمترین ویژگی نانو ذرات، زیاد بودن سطح نسبت به حجم آنها است که سبب کاربردهای وسیع آنها شده است. یکی از کاربردهای مهم نانو ذرات، روانکاری و خنک‌کاری است، بطوریکه افزودن آنها به روغن پایه، باعث ایجاد خواص تریبولوژی عالی، بهبود خواص سطحی و افزایش قابل ملاحظه ضریب انتقال حرارت نسبت به سیال برش معمولی می‌شود [۴].

در این پژوهش، از نانو ذرات اکسید سیلیسیوم بصورت سوپانسیون در سیال برش پایه گیاهی استفاده شده است. خواص مکانیکی نانو ذره مورد نظر، در جدول ۳ نشان داده شده است. شکل ۱ تصویر نانو اکسید سیلیسیوم و سورفکتانت بکار گرفته شده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

درصد نانوذرات اضافه شده به سیال برش پایه، یک فاکتور مهم بر عملکرد فرآیند است. اگر حجم نانو ذرات زیاد باشد این ذرات به سرعت بهم چسبیده و تشکیل کلوخه داده و ته نشین می‌شوند و اگر حجم ذرات خیلی کم باشد، نمی‌تواند تاثیری مثبت بر افزایش خاصیت روانکاری و خنک‌کاری سیال برش داشته باشد. با توجه به پیشینه پژوهش، نانو ذرات اکسید سیلیسیوم با کسر حجمی ۰/۴٪ به سیال برش پایه اضافه گردید. همچنین معادل ۱۰٪ نانوذره بکار گرفته شده، سورفکتانت به آن اضافه گردید و سیال تهیه شده به منظور عملیات همگن سازی در حمام التراسونیک قرار گرفت.

۲-۴- سیستم حداقل مقدار روانکار

شماتیک دستگاه MQL بکار رفته در این پژوهش، در شکل ۲ نشان داده شده است. در این سیستم از یک کمپرسور برای



شکل ۳- چیدمان آزمایش

راحتی به منطقه برش نفوذ می‌کند. از یک طرف اختلاف فشار هوا و سیال وارد شده به اتصال و از طرف دیگر، مسیر غیرمستقیم داخل نازل موجب شده که ذرات روانکار بسیار ریز شوند و قدرت نفوذ آنها افزایش یابد. جدول ۴ مشخصات سیستم MQL مورد استفاده را نشان می‌دهد. شکل ۳ چیدمان آزمایش شامل، سر نازل دستگاه MQL، مسیر انتقال نیتروژن مایع، قطعه‌کار و ابزار را نشان می‌دهد. به علت سرما شدید نیتروژن، سیال برش روی سطح ابزار تبدیل به یخ شده است که در شکل ۳ به وضوح مشخص است.

در روش روانکاری مرطوب سیال برش با دبی ۱۰ L/min و بدون فشار به منطقه برش تزریق شده است.

۲-۵- زبری سنج

دستگاه زبری‌سنج مورد استفاده در این پژوهش، مدل TR-200 بوده و از معیار R_a برای گزارش نتایج استفاده شده است. محدوده اندازه‌گیری این دستگاه برای معیار R_a ، از ۰/۰۲۵ تا ۱۲/۵ میکرون است. به منظور کاهش خطاهای احتمالی در اندازه‌گیری میزان زبری سطح قطعه‌کار، پنج نقطه مختلف از آن مورد آزمایش قرار گرفته، میانگین مقادیر به عنوان نتیجه نهایی گزارش شده است.

۳- طراحی آزمایش

هدف اصلی از طراحی آزمایش، مطالعه ارتباط بین پاسخ به عنوان یک متغیر وابسته و پارامترهای ورودی است. در این روش، علاوه بر بررسی تاثیر هر پارامتر، اثرات متقابل بین هر پارامتر نیز در نظر گرفته می‌شود. طراحی آزمایش، روشی برای حداقل‌سازی تعداد آزمایش‌ها برای رسیدن به شرایط بهینه است. برای استخراج روابط مربوط به پاسخ سطح داده‌های ورودی، از نتایج آزمایش تجربی استفاده می‌شود. برای مدل‌سازی، سعی بر انجام حداقل تعداد آزمایش تجربی است تا در زمان و هزینه صرفه‌جویی شود [۱].

در این پژوهش از روش سطح پاسخ^۱ برای طرح‌ریزی آزمایش‌ها استفاده شده است. روش سطح پاسخ، از جمله روش‌های بهینه‌سازی است که با استفاده از مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری، مسائل را مدل می‌کند و نه تنها باعث می‌شود اجزای پرهزینه شیشه‌سازی کاهش یابد، بلکه روند طبیعی بهینگی فرایند را که غالباً غیرخطی است، پیش‌بینی می‌کند [۳].



شکل ۲- تصویر سیستم حداقل مقدار روانکار

جدول ۴- مشخصات سیستم MQL

مقدار	پارامتر
۱۵۰ Cc/hr	دبی خروجی
۶ Bar	فشار هوا قبل از ورود به نازل
۲ Bar	فشار سیال برش قبل از ورود به نازل
۶ Bar	فشار خروجی اسپری از نازل
۶۰	زاویه نازل نسبت به محور ابزار

^۱ Response Surface Method (RSM)

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^k B_i x_i + \sum_{i,j=1}^k B_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k B_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

که در معادله (۱)، پارامتر B_0 مقدار ثابت معادله است و مقادیر $B_1, B_2, B_k, B_k, B_{11}, B_{22}, B_{kk}$ ضرایب عبارت خطی و $B_{12}, B_{13}, B_{k-1,k}$ ضرایب عبارت درجه دوم و B_{11}, B_{22}, B_{kk} ضرایب عبارت درجه دوم و $B_{12}, B_{13}, B_{k-1,k}$ ضرایب عبارت برهم‌کنشی هستند [۳].

با استفاده از داده‌های موجود در جدول ۵ برای حالت Cryo-MQL، مقادیر ضرایب معادله غیرخطی فوق به کمک روش رگرسیون و به کمک نرم‌افزار آماری مینی‌تب^۲ محاسبه شدند.

جدول ۵- پارامترهای مورد آزمایش و سطوح آن

فاکتورها	سطوح		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
سرعت برش (v_c) (m/min)	۴۵	۷۰	۹۵
سرعت پیشروی (f) (mm/rev)	۰/۱۲	۰/۲۲	۰/۳۲
عمق برش (d) (mm)	۱	---	---

جدول ۶- ماتریس طراحی آزمایش رویه پاسخ سطح به

همراه نتایج R_a

شماره آزمایش	v_c	f	R_a (μm)		
			Cryo-MQL	Wet	Dry
۱	۴۵	۰/۳۲	۰/۹۹۶	۲/۷۶۳	۲/۷۷۹
۲	۷۰	۰/۲۲	۰/۸۷۶	۱/۵۴۰	۱/۵۷۱
۳	۷۰	۰/۲۲	۰/۸۶۴	۱/۶۰۰	۱/۵۷۹
۴	۹۵	۰/۲۲	۰/۹۱۲	۱/۶۷۱	۱/۷۴۱
۵	۴۵	۰/۲۲	۰/۸۳۶	۱/۴۷۹	۱/۷۵۲
۶	۷۰	۰/۲۲	۰/۸۹۲	۱/۵۴۷	۱/۵۶۷
۷	۷۰	۰/۲۲	۰/۸۷۹	۱/۵۳۴	۱/۵۶۵
۸	۷۰	۰/۳۲	۱/۱۰۸	۲/۵۸۶	۲/۶۳۰
۹	۹۵	۰/۳۲	۱/۳۱۲	۲/۷۶۶	۲/۷۸۱
۱۰	۴۵	۰/۱۲	۰/۷۲۴	۰/۸۵۱	۲/۸۶۴
۱۱	۷۰	۰/۱۲	۰/۷۶۳	۰/۹۶۱	۱/۰۹۷
۱۲	۹۵	۰/۱۲	۰/۸۴۶	۱/۲۴۷	۱/۳۹۰
۱۳	۷۰	۰/۲۲	۰/۸۹۳	۱/۵۳۶	۱/۵۷۱

^۲ Minitab

البته مدل‌هایی که ساخته می‌شوند، از نوع درجه دوم، درجه سوم و کمتر درجه چهارم می‌باشند، اما همه نرم افزارهای بهینه‌سازی، توانایی ساخت مدل‌های درجه سوم و بالاتر را ندارند و یا اینکه هنگام بهینه‌سازی پاسخ، قدرت کمتری برای یافتن جواب بهینه نهایی را دارند [۱].

۴- نتایج و بحث

به منظور بررسی تاثیر استفاده از روش روانکاری-خنک‌کاری تحت مکانیسم Cryo-MQL بر سلامت سطح نهایی قطعه‌کار در فرآیند ماشینکاری سوپرآلیاژ A۲۸۶، از طرح مرکب مرکزی^۱ با دو متغیر مستقل؛ شامل سرعت برش (v_c) و سرعت پیشروی (f) در سه سطح، سه بلوک و شش تکرار در نقطه مرکزی طرح (برای محاسبه تکرار پذیری فرایند)، به منظور بررسی تأثیر زبری سطح در عمق برش ثابت استفاده شد.

پارامتر سلامت سطح قطعه‌کار، به عنوان عامل مهم در ماشینکاری مورد توجه قرار گرفت. به منظور بررسی سلامت سطح قطعه‌کار بعد از فرآیند ماشینکاری، زبری سطح آن تحت معیار R_a گزارش گردید.

پارامترهای ماشینکاری، تعداد سطوح و مقادیر آن در جدول ۵ نشان داده شده است. جدول ۶ مقادیر پارامترهای برش (سرعت برش و پیشروی) در هر آزمایش به همراه تمامی مقادیر اندازه‌گیری شده زبری سطح، در سه حالت خشک، مرطوب و Cryo-MQL را نشان می‌دهد. از مقایسه نتایج زبری سطح در سه روش، خشک، مرطوب و Cryo-MQL مشاهده می‌شود که مقدار عددی این پارامتر برای روش Cryo-MQL نسبت به دو روش دیگر، افت شدیدی پیدا کرده است که دلیل آن در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۴-۱- برازش مدل ریاضی برای زبری سطح

در روش سطح پاسخ، رابطه بین ورودی و پاسخ خروجی (Y) را می‌توان به صورت رابطه (۱) بیان کرد که در رابطه فوق برای پیش‌بینی مقادیر پاسخ، از مدل چند جمله‌ای درجه دوم استفاده شده است:

^۱ Central Composite

$$Ra = 0.73259 - 0.00455V - 0.92385F + 0.000122V^2 + 27.50345F^2 - 0.0393VF \quad (۴)$$

از تجزیه و تحلیل واریانس برای بررسی مناسب بودن مدل رگرسیونی برازش شده و پارامترهای آن استفاده می‌شود. برای بررسی مناسب بودن مدل، مقدار عدد فیشر و برای کیفیت مدل مورد نظر مقدار $prob>F$ مدنظر قرار گرفته است. نتایج آنالیز واریانس برای زبری سطح در روش Cryo-MQL، مرطوب و خشک به ترتیب در جداول ۷، ۸ و ۹ ارائه شده است.

مدل نهایی زبری سطح برای روش Cryo-MQL و پارامترهای واقعی به صورت رابطه (۲) است:

$$Ra = 0.96397 - 0.003035V + 2.6899F + 0.000015V^2 + 7.12931F^2 - 0.0194VF \quad (۲)$$

که در رابطه (۲)، V و F به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر سرعت پیشروی و سرعت برش هستند.

مدل نهایی زبری سطح نیز، برای روش خشک و مرطوب به همراه پارامترهای واقعی به صورت رابطه‌های (۳) و (۴) است:

$$Ra = 8.76918 - 0.12654V - 27.28399F + 0.0006013V^2 + 49.28103F^2 + 0.14760VF \quad (۳)$$

جدول ۷- نتایج تحلیل واریانس برای زبری سطح در روش Cryo-MQL

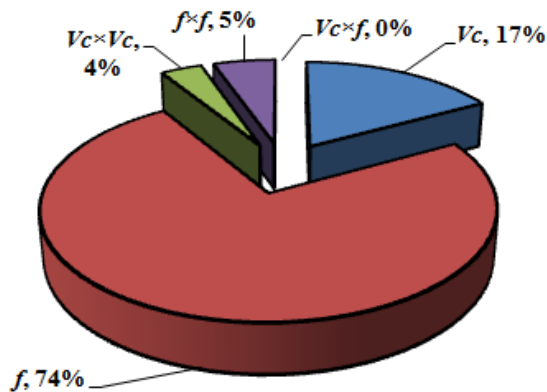
منبع	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (SS)	میانگین مربعات (MS)	عدد فیشر (F)	prob>F
مدل رگرسیونی	۰/۲۷	۵	۰/۰۵۳	۴۲/۵	<۰/۰۰۰۱
سرعت برش	۰/۰۴۴	۱	۰/۰۴۴	۳۴/۹	۰/۰۰۰۶
سرعت پیشروی	۰/۲	۱	۰/۲	۱۵۵	<۰/۰۰۰۱
سرعت×سرعت	۰/۰۰۲	۱	۰/۰۰۲	۰/۲۱	۰/۶۶۰۴
پیشروی×پیشروی	۰/۰۱۴	۱	۰/۰۱۴	۱۱/۱	۰/۰۱۲۴
سرعت×پیشروی	۰/۰۰۹	۱	۰/۰۰۹	۷/۴۷	۰/۰۲۹۲
خطا	۰/۰۰۸	۷	۰/۰۰۱		
مجموع	۰/۲۸	۱۲			

جدول ۸- نتایج تحلیل واریانس برای زبری سطح در روش مرطوب

منبع	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (SS)	میانگین مربعات (MS)	عدد فیشر (F)	prob>F
مدل رگرسیونی	۴/۶۷	۵	۰/۹۳	۴۶۴	<۰/۰۰۰۱
سرعت برش	۰/۰۵۸	۱	۰/۰۵۸	۲۸/۹	۰/۰۰۱۰
سرعت پیشروی	۴/۲۶	۱	۴/۲۶	۲۱۱۶	<۰/۰۰۰۱
سرعت×سرعت	۰/۰۱۶	۱	۰/۰۱۶	۸/۰۴	۰/۰۲۵۲
پیشروی×پیشروی	۰/۲۱	۱	۰/۲۱	۱۰۳	<۰/۰۰۰۱
سرعت×پیشروی	۰/۰۳۹	۱	۰/۰۳۹	۱۹/۱	۰/۰۰۳۲
خطا	۰/۰۱۴	۷	۰/۰۰۲		
مجموع	۴/۶۹	۱۲			

جدول ۹- نتایج تحلیل واریانس برای زبری سطح در روش خشک

منبع	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (SS)	میانگین مربعات (MS)	عدد فیشر (F)	prob>F
مدل رگرسیونی	۳/۹۵	۵	۰/۷۹	۱۰/۰۳	۰/۰۰۴۳
سرعت برش	۰/۳۷	۱	۰/۳۷	۴/۶۵	۰/۰۶۸۰
سرعت پیشروی	۱/۳۴	۱	۱/۳۴	۱۷/۰۴	۰/۰۰۴۴
سرعت×سرعت	۰/۳۹	۱	۰/۳۹	۴/۹۵	۰/۰۶۱۵
پیشروی×پیشروی	۰/۶۷	۱	۰/۶۷	۸/۵۱	۰/۰۲۲۴
سرعت×پیشروی	۰/۵۴	۱	۰/۵۴	۶/۹۱	۰/۰۳۴
خطا	۰/۵۵	۷	۰/۰۷۹		
مجموع	۴/۵۰	۱۲			



شکل ۴- میزان تاثیر پارامترهای برش بر زبری سطح در روش Cryo-MQL

۴-۲- بررسی تاثیر سرعت برش بر زبری سطح

وجود نیتروژن مایع با دمای بسیار پایین موجب می‌شود که دمای منطقه ماشینکاری کنترل شود و این امر موجب شده که در روش Cryo-MQL زبری سطح به دست آمده تحت پارامترهای برشی مختلف بسیار بهم نزدیک شوند.

با توجه به شکل‌های ۵، ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که مقدار زبری سطح در نمونه‌هایی که با استفاده از نانوسیال به همراه نیتروژن مایع تحت روش Cryo-MQL ماشین‌کاری شده‌اند، بسیار کمتر از روش‌های دیگر است. علت این امر را می‌توان به دو عامل نسبت داد:

- ۱- وجود ذرات نانو در سیال برش تحت تزریق به روش MQL که موجب بهبود شرایط روانکاری شده است
- ۲- استفاده از نیتروژن مایع با هدف خنک‌کاری با شدت بالا. بهبود زبری سطح از نقطه نظر وجود ذرات نانو را می‌توان به واسطه هدایت حرارتی بالا و خاصیت ضد اصطکاکی و ضد سایشی آن در سیال برش توجیه کرد. نانوذرات موجود در سیال برش، باعث کاهش ضریب اصطکاک بین سطح ابزار و براده (با جلوگیری از تماس مستقیم سطح فلز با فلز) می‌شود [۱۸]. بنابراین احتمال بروز پدیده براده با لبه انباشته را کاهش می‌دهد که یکی از علل مهم در افزایش زبری سطح طبیعی در ماشینکاری آلیاژ A۲۸۶ است [۱۰]. همچنین کاهش اصطکاک در فصل مشترک ابزار و براده، باعث بهبود جریان براده شده و سبب کاهش ارتعاش قطعه‌کار و ابزار می‌گردد و در نتیجه زبری سطح بهبود می‌یابد. کاهش دمای منطقه ماشینکاری در روش Cryo-MQL

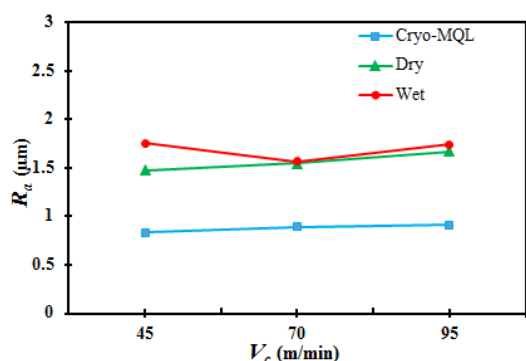
مقدار عدد فیشر (F)، مربوط به مدل استفاده شده در این تحلیل برای روش Cryo-MQL، مرطوب و خشک به ترتیب ۴۲/۵، ۴۶۴ و ۱۰/۰۳ است که نشان‌دهنده مناسب بودن مدل رگرسیونی درجه دوم برای پیش‌بینی زبری سطح قطعه‌کار در روش‌های ذکر شده در بالا است؛ همچنین مقدار $prob>F$ برای مدل‌های مورد نظر بسیار کوچک است که این امر گویای معنادار بودن مدل برازش شده است.

با توجه به مقادیر عدد فیشر، سرعت پیشروی بیشترین تاثیر را بر زبری سطح برای سه روش روانکاری-خنک‌کاری Cryo-MQL، مرطوب و خشک داشته است که به ترتیب مقادیر آن، ۱۵۵، ۲۱۱۶ و ۱۷/۰۴ است. علت این پدیده هم‌درگیری لحظه‌ای کم لبه برش ابزار با سطح قطعه‌کار در سرعت‌های پیشروی بالاست. به عبارت دیگر، با افزایش سرعت پیشروی، خط اثر ابزار برش روی سطح قطعه‌کار به صورت پیچ با گام‌های طولانی‌تر ظاهر شده و به این دلیل حساسیت زبری سطح به افزایش سرعت پیشروی، به مراتب بیشتر از پارامتر سرعت برش است.

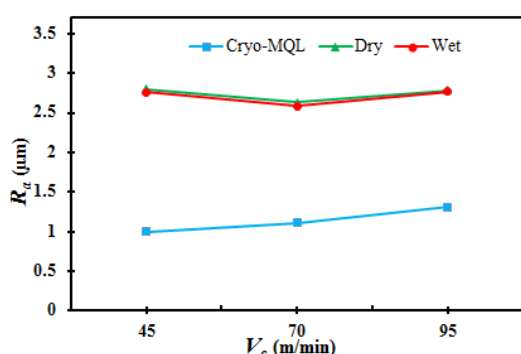
همچنین مقدار R-Sq(Adj) برای مدل نهایی توسعه داده شده برای تخمین زبری سطح در روش‌های Cryo-MQL، مرطوب و خشک به ترتیب ۹۴/۵۳٪، ۹۹/۴۸٪ و ۸۰٪ به دست آمده است که این امر حاکی از دقت بالای مدل برازش شده در پوشش نتایج آزمایش‌ها است.

شکل ۴ میزان تاثیر پارامترهای برش بر زبری سطح با توجه به خروجی نرم افزار مینی‌تب را برای روش Cryo-MQL به صورت نمودار دایره‌ای نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل فوق مشاهده می‌شود، تاثیر سرعت پیشروی با مقدار ۷۴٪ بسیار بیشتر از پارامترهای دیگر بر زبری سطح در معادله (۲) را نشان می‌دهد. همچنین مقدار عدد فیشر برای سرعت پیشروی ۱۵۵ بوده که بیشترین مقدار است. این مقدار نیز، نشان دهنده تاثیر بیشتر سرعت پیشروی بر زبری سطح نسبت به دیگر پارامترها است. بعد از سرعت پیشروی، سرعت برش به مقدار ۱۷٪ و بعد از آن به ترتیب پارامتر متقابل سرعت پیشروی در سرعت پیشروی و سرعت برش در سرعت برش با مقادیر ۵٪ و ۴٪ بر زبری سطح تاثیرگذار بوده‌اند.

همانطوری که در شکل‌های فوق نشان داده شده است و با توجه به خواص مکانیکی سوپرآلیاژ ماشینکاری شده، روش روانکاری مرطوب و خشک، تأثیر بسیار کمتری در کاهش زبری سطح نسبت به حالت Cryo-MQL داشته است. زبری سطح حاصل از روش ماشینکاری مرطوب و خشک، بسیار بهم نزدیک است، به نحوی که در روش مرطوب و در حضور سیال برش ماشینکاری خشک اتفاق می‌افتد و سیال برش تأثیر چندانی بر بهبود روند ماشینکاری ندارد. این امر نشان دهنده عدم توانایی سیال برش معمولی برای روانکاری و خنک‌کاری است؛ ولی در روش Cryo-MQL، اختلاف زبری سطح با دو روش دیگر چشمگیر است و با افزایش سرعت برش نیز، این اختلاف کاهش نمی‌یابد. این امر وابستگی بسیار کم روش Cryo-MQL به تغییرات سرعت برش را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، روش فوق پایداری بالایی نسبت به تغییر سرعت برش از نقطه نظر کیفیت سطح دارد.



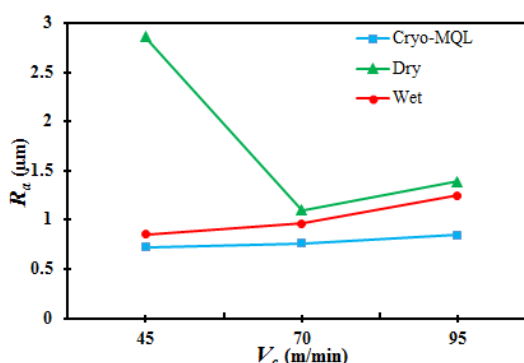
شکل ۶- تاثیر تغییرات سرعت برش بر زبری سطح قطعه کار تحت روش‌های مختلف در سرعت پیشروی ۰/۲۲ mm/rev



شکل ۷- تاثیر تغییرات سرعت برش بر زبری سطح قطعه کار تحت روش‌های مختلف در سرعت پیشروی ۰/۲۲ mm/rev

پایه نانو به علت ضریب انتقال حرارت بیشتر نانوسیال نیز، دلیل دیگری بر کاهش زبری سطح در حین ماشینکاری است. این امر موجب کاهش نرخ سایش ابزار و بهبود کیفیت سطح قطعه کار می‌شود [۱۹]. کاهش مقدار سایش ابزار تحت مکانیزم ساییدگی، موجب شده که تغییر زوایای برش ابزار و همچنین تغییر شعاع نوک آن کاهش یابد و با حفظ هندسه لبه ابزار، شرایط براده‌برداری بهبود یافته و از افزایش زبری سطح ایده‌آل جلوگیری شود [۵]. وجود ذرات نانو با ابعاد بسیار ریز در سیال برش مانند گوی‌های کروی عمل کرده، شرایط انتقال براده به خارج از منطقه برش را سهل نموده است [۲۰]. عامل دیگری که شرایط روانکاری را بهبود می‌بخشد، تزریق نانوسیال به روش MQL است. در این روش سیال برش با سرعت بالا به منطقه ماشینکاری هدایت می‌شود. تزریق سیال برش با ابعاد میکرونی و به همراه فشار و سرعت بالا، موجب می‌شود که شرایط نفوذ آن به منطقه برش به شدت افزایش یافته و شرایط روانکاری بهبود یابد [۳].

از طرفی خنک‌کاری با شدت بالا از طریق پاشش نیتروژن مایع به منطقه برش موجب شده که دمای این محیط کنترل شود و به مقادیر بسیار کمی کاهش یابد. کاهش دمای ابزار در حین ماشینکاری، ارتباط مستقیم با کاهش سایش ابزار تحت مکانیزم چسبندگی دارد. کاهش سایش ابزار، موجب حفظ تیزی لبه برش شده و به دنبال آن نیروهای ماشینکاری و ارتعاشات میان ابزار و قطعه کار کاهش می‌یابد و به این ترتیب ابزار با هندسه بهتر می‌تواند کیفیت سطح بهتری را ارائه دهد [۱۲].



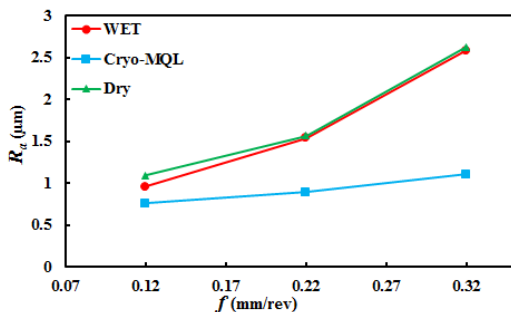
شکل ۸- تاثیر تغییرات سرعت برش بر زبری سطح قطعه کار تحت روش‌های مختلف در سرعت پیشروی ۰/۱۲ mm/rev

کاهش چشمگیر عمر ابزار، کیفیت نامطلوب سطح قطعه کار حاصل خواهد شد [۱۰].

شکل ۹ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح براده ابزار در دو روش روانکاری-خنک کاری Cryo-MQL و مرطوب را نشان می‌دهد. سایش تحت مکانیزم چسبندگی و یا همان براده با لبه انباشته در لبه برش اصلی ابزار در روش روانکاری مرطوب مشاهده می‌شود. جوش خوردن مواد قطعه-کار روی سطح ابزار، موجب افزایش میزان نیروی ماشینکاری شده و با افزایش این مقدار نیرو و همچنین با توجه به استحکام بالای موضع جوش خورده، مواد ابزار از سطح آن جدا شده و زوایای برش را تغییر می‌دهد که این امر موجب فرسودگی زود هنگام ابزار می‌شود. از طرفی، در شکل فوق قسمتی شکسته شده روی سطح ابزاری که با روش مرطوب ماشینکاری شده مشاهده می‌شود؛ ولی ابزاری که با روش Cryo-MQL ماشینکاری شد، سطح کاملاً بی عیب و نقصی دارد که این سطح برتری روش Cryo-MQL پایه نانو را نسبت به روش روانکاری مرطوب را نشان می‌دهد.

۴-۵- تعیین پارامترهای بهینه

در شکل ۱۰ خروجی نرم‌افزار مینی‌تب به منظور انتخاب زبری سطح کمینه تحت شرایط حداقل مقدار روانکار-خنک-کار به صورت سه بعدی نمایش داده شده است. شکل مورد نظر، نمودار سه بعدی تاثیر همزمان دو پارامتر سرعت برش و سرعت پیشروی بر زبری سطح را برای حالت روانکاری Cryo-MQL نشان می‌دهد. با توجه به نکات بیان شده زبری بهینه در سرعت برش ۴۵ m/min و سرعت پیشروی ۰/۱۲ mm/rev حاصل می‌شود و مقدار آن برابر ۰/۷۲۴ میکرون در معیار R_a است.



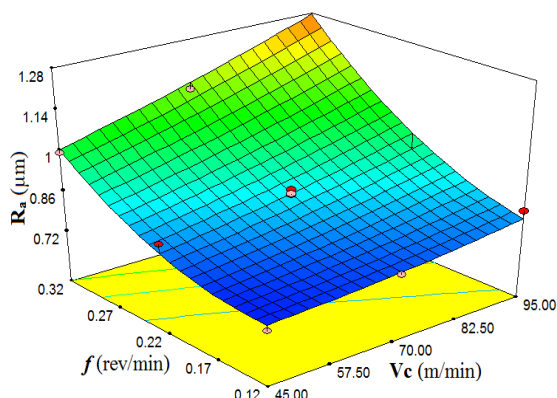
۸- تاثیر تغییر سرعت پیشروی بر زبری سطح در روش Cryo-MQL، خشک و مرطوب در سرعت ۷۰ m/min

۴-۳- بررسی تاثیر سرعت پیشروی بر زبری سطح

شکل ۸ تاثیر روش Cryo-MQL بر زبری سطح قطعه کار در سرعت‌های پیشروی مختلف و همچنین مقایسه آن با روش روانکاری مرطوب و خشک را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، هنگام استفاده از روش Cryo-MQL، افزایش سرعت پیشروی کمترین تاثیر را روی مقدار زبری سطح قطعه کار دارد؛ به طوری که روند صعودی شدن نمودار با افزایش سرعت‌های پیشروی، ثابت است. بدیهی است این امر به واسطه کاهش دمای منطقه برش و ضریب اصطکاک در فصل مشترک ابزار-براده است. با کاهش ضریب اصطکاک، سایش ابزار (سایش تحت مکانیزم‌های ساییدگی، چسبندگی و حتی شکستگی) و ارتعاشات سیستم کاهش می‌یابد و بهبود شرایط برش در روش Cryo-MQL به راحتی توجیه می‌شود. با توجه به نمودارهای فوق، با افزایش سرعت پیشروی در سرعت برش ثابت، مقادیر زبری سطح دو روش خشک و مرطوب به هم نزدیک می‌شود، ولی مقادیر عددی زبری سطح حاصل از روش Cryo-MQL، از دو روش دیگر فاصله می‌گیرد. بهبود کیفیت سطح با افزایش سرعت پیشروی نسبت به دو روش دیگر، نشان دهنده کارایی بسیار خوب این روش روانکاری-خنک کاری است که توانسته بهبود ۱۵-۶۴٪ زبری سطح نسبت به روش مرطوب و کاهش ۳۰-۷۵٪ آن نسبت به روش خشک را حاصل نماید. باید این نکته را هم خاطر نشان کرد که شیب کم نمودار زبری سطح نسبت به سرعت پیشروی در حالت Cryo-MQL، حاکی از پایداری این روش نسبت به پارامتر ماشینکاری است.

۴-۴- سایش ابزار

سایش ابزار یکی از مهمترین معیارها برای تخمین عمر ابزار در فرآیندهای ماشینکاری به حساب می‌آیند. در ماشینکاری مواد سخت ماشینکاری شونده، سایش تحت مکانیزم‌های ساییدگی، خراشیدگی و چسبندگی نسبت به مکانیزم‌های دیگر سایش از اهمیت بیشتری برخوردارند [۹]. سوپراآلیاژها نیز، در گروه مواد سخت ماشینکاری شونده قرار دارند و بررسی سایش ابزار، پارامتری مهم برای بهینه کردن شرایط ماشینکاری این نوع از آلیاژها است. انتخاب نادرست روش روانکاری-خنک کاری در فرآیندهای ماشینکاری این مواد می‌تواند آسیب‌های شدیدی در ابزار بوجود آورد و به دنبال



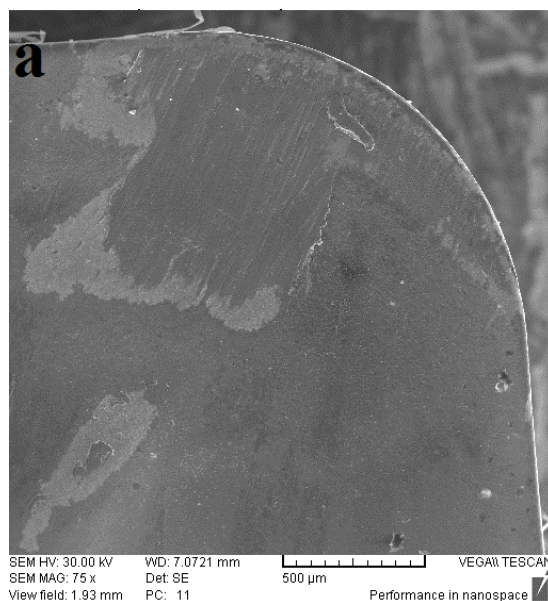
شکل ۱۰- تصویر سه بعدی سطح مربوط به تاثیر همزمان سرعت برشی و نرخ پیشروی بر کیفیت سطح پایانی قطعه کار تحت شرایط Cryo-MQL

تاثیر روش روانکاری-خنک کاری با تغییر پارامترهای برش بر سلامت سطح قطعه کار و سایش ابزار نیز، مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از روش MQL با سیال پایه نانو (نانو اکسید سیلیسیوم)، با هدف روانکاری و نیتروژن مایع به منظور خنک کاری تحت عنوان خنک کاری برودتی استفاده شده است. برای مقایسه نتایج، از دو روش ماشینکاری خشک و مرطوب کمک گرفته شد. تمام مقادیر به دست آمده از زبری سطح تحت معیار R_a ، برای حالت Cryo-MQL کوچکتر از دو روش مرطوب و خشک بوده است. مقادیر عددی زبری سنجی نشان داد که استفاده از روش Cryo-MQL، موجب کاهش ۱۵-۶۴٪ زبری سطح نسبت به روش مرطوب و کاهش ۳۰-۷۵٪ آن نسبت به روش خشک گردیده است.

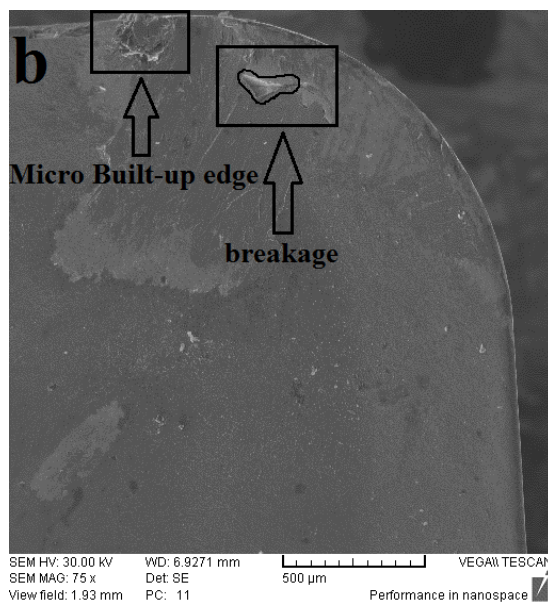
علاوه بر وجود نیتروژن مایع که موجب خنک کاری بسیار مناسب در روش Cryo-MQL می شود، وجود نانو اکسید سیلیسیوم در سیال برش پایه، موجب شد که نانوذرات شبیه گوی‌های کروی عمل کرده، براده با غلتش روی آن، منطقه برش را ترک کنند و سطح تماس ابزار با براده کاهش یابد و به دنبال آن اصطکاک سطح فلز با فلز کاهش می یابد. با کاهش ضریب اصطکاک، سایش تحت مکانیزم‌های ساییدگی و چسبندگی به نحو چشم‌گیری کاهش می یابد.

۶- مراجع

- [1] Davoodi B, Eskandari B (2015) Investigation of tool life and wear mechanisms in turning of N-155 iron-nickel-base superalloy using response surface



(الف)



(ب)

شکل ۹- تصویر SEM از سطح براده ابزار تحت شرایط (الف) Cryo-MQL و (ب) مرطوب

۵- نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف بهبود شرایط ماشینکاری فلزات سخت ماشینکاری شونده (سوپرآلیاژها) و کاهش حجم سیال برش مصرفی در فرآیند ماشینکاری سوپرآلیاژ پایه آهن-نیکل A286 اختصاص یافته است. همچنین در این پژوهش، میزان

- [11] Dhananchezian M, Kumar MP (2011) Cryogenic turning of the Ti-6Al-4V alloy with modified cutting tool inserts. *Cryogenics* 51(1): 34-40.
- [12] Dhar NR, Kamruzzaman M (2007) Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition. *Int J Mach Tools Manuf* 47(5): 754-759.
- [13] Krishnamurthy G, Bhowmick S, Altenhof W, Alpas AT (2016) Increasing efficiency of Ti-alloy machining by cryogenic cooling and using ethanol in MRF. *CIRP J Manuf Sci Technol* 408-422.
- [14] Shokrani A, Dhokia V, Newman ST (2016) Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *J Manuf Processes* 21: 172-179.
- [15] Tazehkandi AH, Shabgard M, Pilehvarian F (2015) Application of liquid nitrogen and spray mode of biodegradable vegetable cutting fluid with compressed air in order to reduce cutting fluid consumption in turning Inconel 740. *J Clean Prod* 108(1): 90-103.
- [16] Maruda RW, Krolczyk GM, Nieslony P, Krolczyk JB, Legutk S (2016) Chip formation zone analysis during the turning of austenitic stainless steel 316L under MQCL cooling condition. *International Conference on Manufacturing Engineering and Materials, ICMEM 2016, Procedia Engineering* 149: 297-304.
- [17] Ulutan D, Ozel T (2011) Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *Int J Mach Tools Manuf* 51(3): 250-280.
- [18] Padmini R, Vamsi Krishna P, Krishna Mohana Rao G (2016) Effectiveness of vegetable oil based nanofluids as potential cutting fluids in turning AISI1040 steel. *Tribol Int* 94: 490-501.
- [19] Sharma P, Singh Sidhu B, Sharma J (2015) Investigation of effects of nanofluids on turning of AISI D2 steel using minimum quantity lubrication. *J Clean Prod* 108: 72-79.
- [20] Sayuti M, Ming Erh O, Sarhan AD, Hamdi M (2014) Investigation on the morphology of the machined surface in end milling of aerospace AL6061-T6 for novel uses of SiO₂ nanolubrication system. *J Clean Prod* 66: 655-663.
- methodology. *Modares Mechanical Engineering* 14(15): 51-58. (In Persian)
- [2] Debnath S, Reddy MM, Sok Yi Q (2014) Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: A review. *J Clean Prod* 83: 33-47.
- [3] Davoodi B, Musavi SH (2016) An experimental investigation of the effect of lubrication method on surface roughness and cutting fluid consumption in machining of super alloys. *Modares Mechanical Engineering* 16(10): 343-352. (in Persian)
- [4] Shabgard MR, Jafarian Zenjanab M, Azarafza R (2014) Experimental study on the influence of CuO nanofluid on surface roughness and machining force in turning of AISI 4340 steel. *Modares Mechanical Engineering* 14(2): 27-33. (in Persian)
- [5] Chetan Ghosh S, Rao PV (2015) Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: A review. *J Clean Prod* 100(1): 17-34.
- [6] Cui X, Guo J (2017) Effects of cutting parameters on tool temperatures in intermittent turning with the formation of serrated chip considered. *Appl Therm Eng* 110: 1220-1229.
- [7] Dogu Y, Aslan E, Camuscu N (2005) A numerical model to determine temperature distribution in orthogonal metal cutting. *J Mater Process Technol* 171(1): 1-9.
- [8] Atlati S, Haddag B, Nouari M, Moufki A (2015) Effect of the local friction and contact nature on the Built-Up Edge formation process in machining ductile metals. *Tribol Int* 90: 217-227.
- [9] Gomez-Parra A, Alvarez-Alco M, Salguero J, Batista M, Marcos M (2013) Analysis of the evolution of the built-up edge and built-up layer formation mechanisms in the dry turning of aeronautical aluminum alloys. *Wear* 302: 1209-1218.
- [10] Kaynak Y, Karaca HE, Noebe RD, Jawahir IS (2013) Tool-wear analysis in cryogenic machining of NiTi shape memory alloys: A comparison of tool-wear performance with dry and MQL machining. *Wear* 306: 51-63.