نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۳، سال ۱۳۹۹، صفحات ۶۰۵ تا ۶۱۸
DOI: 10.22060/mej.2017.12859.5451

مقایسه‌ای بر نقش خنک‌کاری و روانکاری انواع سیالات برشی در فرایند میکروفرزکاری

حامد رضایی[۱]، محمد حسین صادقی[۱*]، حسن خسروآبادی[۲]

[۱] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[۲] مهندسی مکانیک، شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی، عسلویه، ایران

خلاصه: میکروفرزکاری یکی از مهمترین فرایندهای ساخت قطعات مینیاتوری است که امروزه کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. به مانند سایر فرایندهای ماشینکاری، از سیال‌های برشی برای خنک‌کاری و روانکاری در میکروفرزکاری استفاده می‌شود با این تفاوت که به علت کوچکی ناحیه برش در مقیاس میکرو، استفاده از آنها با مشکلاتی همراه است. در این تحقیق، اثر سیستم‌های روانکاری/خنک‌کاری مختلفی همچون شرایط خشک، تر و روانکاری کمینه بر مشخصه‌هایی از فرایند نظیر سایش میکرو ابزار و کیفیت سطح مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مورد روانکاری کمینه، از دو روش پاشش تک نازله و دو نازله استفاده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. آزمایش‌ها با استفاده از میکرو ابزارهای دو پره به قطر ۰/۸ میلی‌متر بر روی آلیاژ تیتانیومی Ti6Al4V انجام گرفت. نتایج نشان از نقش برجسته سیستم روانکاری کمینه در هر دو عمل روانکاری و خنک‌کاری داشته است. همچنین، شرایط تر نقش مؤثری در خنک‌کاری ایفا نکرد. در نهایت، بکارگیری روانکاری کمینه در مقایسه با دو نوع دیگر خشک و تر، موجب سایش کمتر میکرو ابزار و بهبود کیفیت سطح شده و در این میان استفاده از سیستم پاشش دو نازله عملکرد مؤثرتری در میکروفرزکاری این آلیاژ داشته است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳-۰۲-۱۳۹۶
بازنگری: ۲۷-۰۳-۱۳۹۶
پذیرش: ۲۵-۰۴-۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۰۲-۰۵-۱۳۹۶

کلمات کلیدی:
میکروفرزکاری
آلیاژ تیتانیوم
روانکاری
خنک‌کاری
کیفیت سطح

۱- مقدمه

میکروفرزکاری یکی از مهمترین فرایندهای ساخت قطعات مینیاتوری است که در آن از ابزارهای برشی با قطر کمتر از یک میلی‌متر استفاده می‌شود. با کوچک شدن مقیاس براده‌برداری، پدیده اثر اندازه[1] بر شرایط فرآیند تأثیرگذار شده و آن را متمایز از فرزکاری معمولی می‌کند [۱]. در این شرایط به دلیل نزدیکی شعاع لبه برنده ابزار به ضخامت براده نتراشیده، براده‌برداری با سازوکارهای مختلف شخم‌زنی و برش انجام می‌گیرد. بسیاری از فاکتورهایی نظیر ارتعاشات، لنگی، انحراف ابزار، میکروساختار قطعه و ... را که می‌توان در مقیاس ماکرو نادیده گرفت، در مقیاس میکرو بسیار حائز اهمیت بوده و در اکثر مواقع باعث تشکیل پلیسه زیاد، سایش سریع ابزار و در مواقعی شکست ناگهانی و غیر قابل پیش‌بینی آن و بروز عیوب در سطوح قطعات ساخته شده می‌شوند. این مشکلات بخصوص در هنگام ماشینکاری مواد سخت ماشینکاری شونده نظیر آلیاژهای تیتانیومی بسیار جدی‌تر خواهند بود. آلیاژهای تیتانیوم به علت خواص بسیار خوبی نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، پایداری حرارتی بالا و همچنین مقاومت به خوردگی خوبی که دارند، کاربرد گسترده‌ای در بخش‌های مختلف پزشکی، صنایع هوایی و نیروگاهی نظیر ساخت ایمپلنت‌ها، میکرو توربین گازی و غیره پیدا کرده‌اند. در عین حال خصوصیاتی مانند هدایت حرارتی پایین و ظرفیت حرارتی بالا، واکنش‌پذیری شیمیایی بالا با ابزار، کارسختی بالا به علت زمینه آستنیتی آنها، تمایل به چسبندگی و تشکیل لبه انباشته، و مقاومت برشی بالای این آلیاژ معمولاً منجر به تشکیل نیروها و دمای برش بالاتر، سایش شدیدتر ابزار و کیفیت سطح ضعیف‌تر می‌شود. بکارگیری سیال برشی مناسب و انتخاب پارامترهای برشی بهینه می‌توانند به حل این مشکلات کمک زیادی کنند [۲].

انتخاب درست سیال برشی با کاهش اصطکاک، خنک‌کاری بهتر و جلوگیری از ایجاد گرمای بیش از حد در محیط ماشینکاری [۳]، منجر به طول عمر بیشتر ابزار، کاهش نیروی برشی و بهبود کیفیت

1 Size effect

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sadeghim@modares.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

سطح می‌گردد [۴]. سیال برشی معمولاً به عنوان خنک‌کار[1] یا روانکار[2] استفاده می‌شود. اثر خنک‌کاری نقش مهمی در کاهش دمای ابزار برشی و قطعه کار ماشینکاری شده ایفا می‌کند. روانکار نیز با کاهش ضریب اصطکاک کمک می‌کند تا براده راحت‌تر از سطح براده ابزار[3] جدا شود که این کار باعث کاهش تمایل به تشکیل لبه انباشته و چسبندگی به ابزار برش می‌شود. در نهایت هر دو باعث شستن و دور کردن براده از موضع برش می‌شوند [۵ و۶]. انواع تکنیک‌های روانکاری/خنک‌کاری که امروزه برای ماشینکاری مواد مختلف بکار گرفته می‌شوند شامل سیستم‌های خشک[4] ، تر[5]، روانکاری کمینه[6] و روش‌های برودتی[7] هستند. میزان اثرگذاری هر یک از این‌ها در عملیات ماشینکاری، به شدت وابسته به انتخاب نوع سیال و سیستم پاشش آن بر موضع برش است. مقاله‌های مروری خوبی در زمینه کاربرد سیال‌های برش در فرایندهای ماشینکاری ارائه شده است [۹-۷].

در ماشینکاری خشک، فرایند برش بدون حضور سیال برشی انجام می‌گیرد که در بسیاری از موارد استفاده از آن به علت حذف معایب بکارگیری سیال برشی ترجیح داده می‌شود [۱۰]. در عین حال، ماشینکاری خشک موجب تشکیل دماها و نیروهای برش بالا می‌شود که با افزایش سایش و تشکیل لبه انباشته منجر به کوتاه شدن عمر ابزار و خراب شدن کیفیت سطح می‌گردد [۱۱].

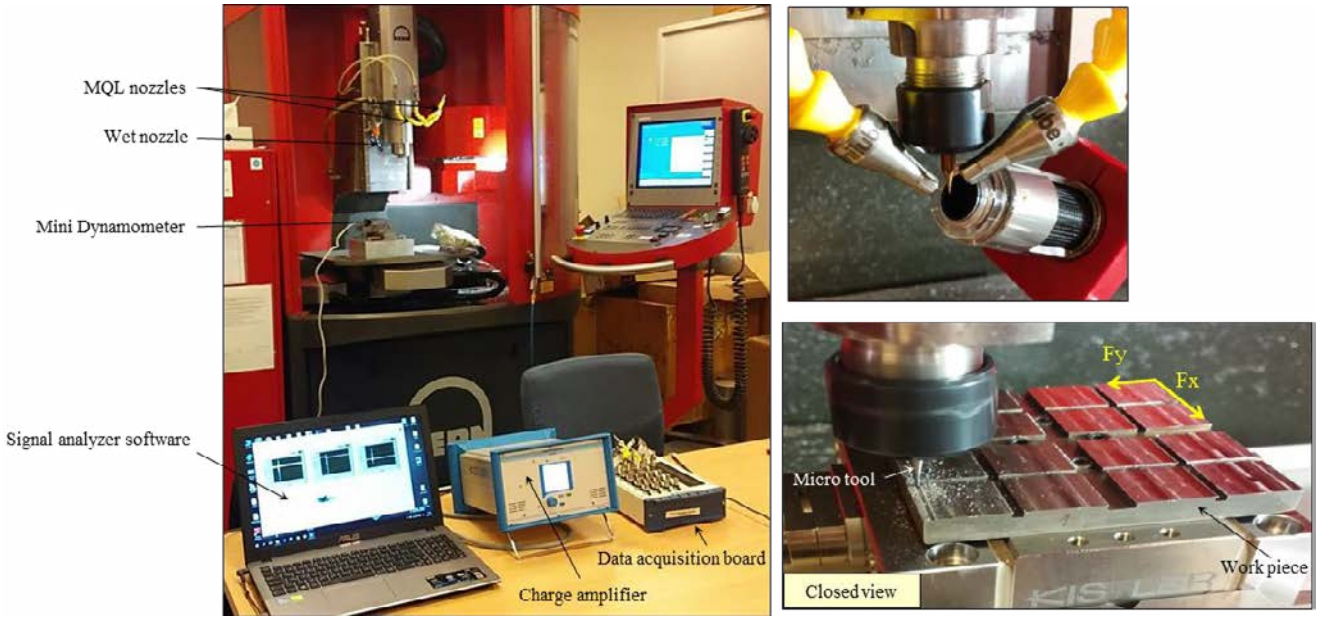
راهکار متعارف برای کاهش دماهای برش و مشکلات مربوطه استفاده از سیالات برشی است [۱۲]. روش تر، روش متداول پاشش سیال به موضع ماشینکاری است که عموماً با نرخ جریان بیشتر از ۱۰۰ لیتر بر ساعت بکار می‌رود و بیشتر از انواع امولسیون پایه آبی به علت قابلیت انتقال حرارت بالا و اقتصادی بودن آنها استفاده می‌شود [۱۲]. در عین حال استفاده از سیال برشی، نگرانی‌های زیست محیطی را بدنبال خواهد داشت که در کنار مسائل اقتصادی و سلامت اپراتور، بکارگیری آنها را کمی مشکل‌ساز می‌نماید [۱۳].

بنابراین برای بهبود قابلیت ماشینکاری در جهت افزایش بازده ماشینکاری و دستیابی به کیفیت سطح مطلوب، و همچنین کاهش اثرات نامطلوب ماشینکاری‌های خشک و تر، می‌توان از نفوذ حداقل مایع روانکار به ناحیه برش، تحت عنوان روش روانکاری کمینه استفاده کرد [۱۴]. در این روش، مخلوط هوا و روغن به صورت اسپری با فشار بالا به ناحیه برشی پاشیده می‌شود. در این حالت، خنک‌کاری به علت سرعت بالای هوا و در نتیجه ضریب انتقال حرارت بهتر مخلوط هوا/روغن، تقویت می‌شود. در مقایسه با سیستم‌های تر و خشک، استفاده از روانکاری کمینه در فرایندهای ماشینکاری می‌تواند منجر به بهبود عمر ابزار و کیفیت سطح، و همچنین کاهش نیروها و دمای برش شود [۱۸-۱۵]. پارامترهای مختلفی مانند زاویه پاشش سیال، نرخ جریان روغن، نرخ جریان هوا و تعداد نازل پاششی بر عملکرد فرایند تأثیرگذار هستند و انتخاب مناسب آنها نقش مهمی در بهبود عملکرد ماشینکاری خواهد داشت [۱۷ و۱۹].

در مقایسه با فرزکاری معمولی، انتخاب تکنیک روانکاری/خنک‌کاری مناسب در میکروفرزکاری از اهمیت بیشتری برخوردار است. با کوچک شدن سایز ابزار و بدنبال آن کاهش مدول خمشی، احتمال انحراف میکرو ابزار در اثر عواملِ فشار پاشش سیال و نیروهای ماشینکاری، بیشتر می‌شود. از طرفی دیگر کوچک شدن موضع برش، هدایت براده به بیرون از ناحیه کوچک برش را دشوارتر می‌کند. افزایش شعاع لبه برنده و تشکیل زاویه براده مؤثر منفی که در اثر عواملی همچون سایش ابزار و تشکیل لبه انباشته حین فرایندهای میکروفرزکاری شکل می‌گیرند، نیز باعث تغییر سازوکار باربرداری از برش به شخم‌زنی می‌شوند. این عوامل می‌توانند روی عملکرد سیال‌های برشی در مقیاس میکرو تأثیرگذار باشند. برخلاف فرزکاری معمولی که استفاده از سیستم روانکاری تر به دلیل خنک‌کاری بهتر آن کیفیت سطح بهتری را نتیجه می‌دهد [۲۰]، در فرایندهای میکروفرزکاری به علت کوچکی قطر ابزار و کم بودن حجم براده برداری، کاهش گرمای تولیدی حین فرایند ممکن است باعث کمرنگ‌تر شدن اثر خنک کنندگی سیال برشی شود [۲۱ و۲۲] و نقش روانکاری برجسته‌تر گردد که پی بردن به این حقیقت بعنوان یکی از اهداف تحقیق حاضر، نیازمند تحقیق بیشتر در این زمینه است.

از این رو به دلیل کوچکی شرایط برش در فرایندهای مقیاس میکرو اهمیت بکارگیری شرایط مختلف ماشینکاری در ایفای نقش دوگانه روانکاری و یا خنک‌کاری بسیار مهم خواهد بود که بعنوان یکی از اهداف این تحقیق با اندازه‌گیری دماها و نیروهای برشی برای نخستین بار در میکروماشینکاری آلیاژ تیتانیومی Ti6Al4V به آن

1 Coolant
2 Lubricant
3 Rake face
4 Dry
5 Wet
6 Minimum Quantity Lubrication (MQL)
7 Cryogenic



شکل ۱: چیدمان انجام آزمایش‌ها

جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلیاژ Ti6Al4V (درصد وزنی ٪)

Titanium	Al	V	Fe	Mo	Ni	Sn	Mo
89/1	5/91	4/21	0/069	0/060	0/043	0/54	0/060

پرداخته خواهد شد. همچنین با توجه به اهمیت زاویه پاشش سیال، در این تحقیق برای اولین بار اقدام به مقایسه تأثیر حالت‌های تک-نازله و دو-نازله شده است. برای این کار از روانکاری کمینه با دو نازل پاششی برای هدایت مستقیم ذرات روغن به موضع ماشینکاری همزمان در جهت‌های پیشروی و خلاف آن استفاده شد و نتایج حاصله با حالت تک- نازله در جهت پیشروی مقایسه گردید. آزمایش‌های میکروفرزکاری با استفاده از میکرو ابزار به قطر ۰/۸ میلی‌متر و در سه حالت خشک، تر و روانکاری کمینه انجام گرفت. مشخصه‌های کیفیت سطح نظیر زبری، سایز میکرو پلیسه و توپوگرافی سطح به همراه دقت ابعادی میکرو شیار، نیروی برش و سایش ابزار به عنوان پارامترهای خروجی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

۲- مواد و تجهیزات آزمایش

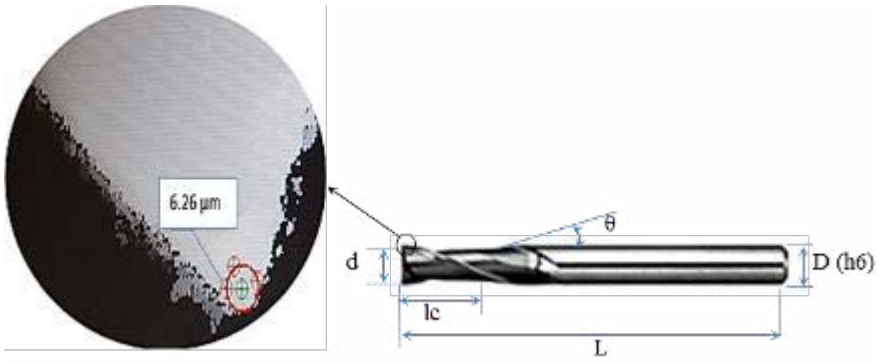
هدف از این تحقیق مقایسه اثرهای خنک‌کاری/روانکاری سیستم‌های مختلف پاشش سیال در فرایند میکروفرزکاری است. ماده به کار رفته در این تحقیق آلیاژ تیتانیومی Ti6Al4V با سختی ۴۰۰ ویکرز بوده است. قطعه‌کار به صورت بلوک مستطیلی شکل به ابعاد ۶۵×۶۵× ۴ میلی‌متر با ترکیب شیمیایی داده شده در جدول ۱ بوده است. در انجام آزمایش‌ها از ماشین فرز فوق دقیق کرن اوو[1] با بیشینه دور ۵۰۰۰۰ دور بر دقیقه، مجهز به سیستم روانکاری کمینه با دو نازل پاششی استفاده شد. شکل ۱، چیدمان آزمایش بکار رفته در این تحقیق را نشان می‌دهد.

آزمایش‌ها به صورت ایجاد شیارهایی موازی با یکدیگر به عرض ۸۰۰ میکرون با فواصل یکسان ۲ میلی‌متر موازی با هم روی نواحی تست به ابعاد ۱۴×۱۴ میلی‌متر انجام گرفت. برای ایجاد شیارها، از میکرو ابزار دو پره از جنس تنگستن کارباید به قطر ۰/۸ میلی‌متر ساخت شرکت ژاپنی ان اس تول[2] استفاده شد. مشخصات تکمیلی ابزار در شکل ۲ آورده شده است. برای جلوگیری از تأثیرگذاری سایش ابزار روی نتایج اندازه‌گیری، ابزاری جدا برای انجام آزمایش‌های مربوط به هر حالت روانکاری استفاده شد.

فرایند ماشینکاری بعد از گام‌های موفق زیر انجام می‌گرفت:

بعد از راه‌اندازی ۳۰ دقیقه‌ای دستگاه برای کاهش خطاهای

1 Kern evo
2 NS Tool (Type: NSE320)



پارامترهای هندسی	مقادیر
قطر ابزار، d، میلی‌متر	0/8
قطر دنباله، D، میلی‌متر	4
زاویه مخروطی، θ	12
طول کل ابزار، L، میلی‌متر	45
طول برش، lc، میلی‌متر	1/6
تعداد لبه برنده	2
پوشش ابزار	MUGEN

شکل ۲: مشخصه‌های هندسی میکرو ابزار بکار رفته در آزمایش‌ها

حرارتی احتمالی، ابتدا سطح قطعه‌کار به منظور دستیابی به کیفیت سطح بالا (به عنوان رفرنس برای عمق برش) با استفاده از ابزاری کاربایدی چهار پره به قطر ۱۰ میلی‌متر با جاروب کردن در راستای Y ماشین ابزار، کف تراشی شد. فرزکاری در شرایط تنظیمی با سرعت دورانی ۵۵۰۰ دور بر دقیقه، پیشروی ۲۸۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق برش ۰/۲ میلی‌متر انجام گرفت.

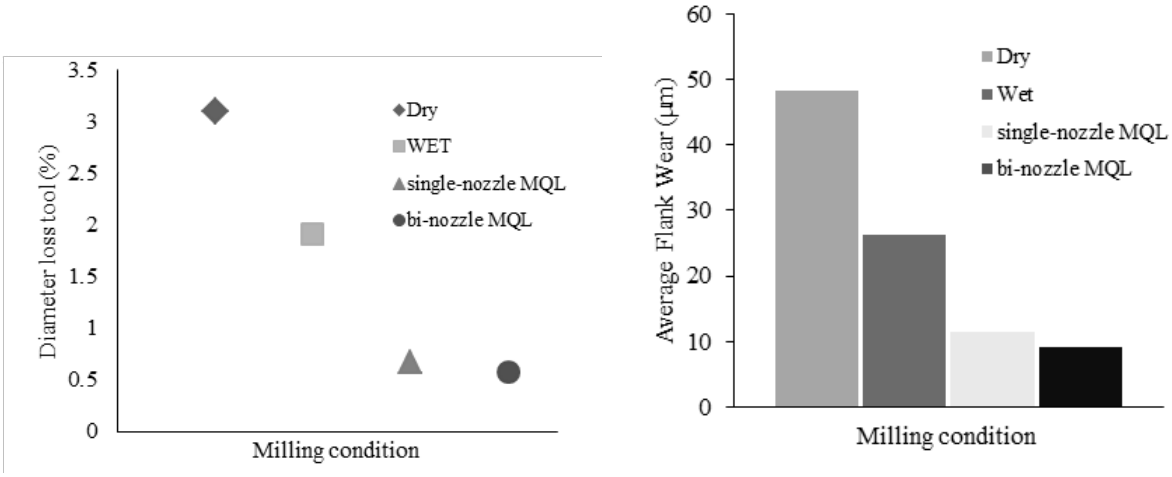
پیش از شروع آزمایش‌های میکروفرزکاری، کنترل لنگی استاتیکی میکرو ابزارها با استفاده از ساعت اندازه‌گیری انجام می‌گرفت تا مقدار لنگی بیشتر از ۱ میکرون نباشد. ماشینکاری شیارها در طول محور Y با میکرو ابزار قطر ۰/۸ میلی‌متر بر اساس برنامه آزمایش‌ها انجام گرفت. در هر مرحله از آزمایش که نیاز به افزایش سرعت دورانی بود، دوباره اقدام به راه‌اندازی اسپیندل می‌شد. نحوه راه‌اندازی در مراحل بعدی شامل ۵ دقیقه زمان به ازای هر ۵۰۰۰ افزایش دور اسپیندل بوده است. این کار به منظور کاهش انبساط حرارتی و بنابراین کنترل عمق برش ضروری است.

سه نوع روانکاری مختلف بصورت‌های خشک، تر و روانکاری کمینه در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند که برای نوع روانکاری کمینه از دو روش پاشش متفاوت به صورت تک نازله در جهت پیشروی، و نیز دو نازله یکی در جهت موافق و دیگری در جهت خلاف پیشروی برای بررسی تأثیر بکارگیری همزمان دو نازل پاششی و مقایسه آن با حالت تک نازله در فرایند میکروفرزکاری، استفاده شده است.

روانکار مورد استفاده در نوع امولسیون، شامل روغن نیمه مصنوعی نئولیت اف سی[1] با ویسکوزیته ۹۵ میلی‌متر مربع بر ثانیه و نسبت آمیختگی ۵٪ بود. برای روانکاری کمینه، از سیستم میکرو روانکاری دو نازله یونیلوب[2] در انجام آزمایش‌ها استفاده شد. مخلوط روغن و هوا (از روغن یونیلوب[3] ۲۰۳۲ با ویسکوزیته ۳۵ میلی‌متر مربع بر ثانیه با نرخ جریان ۱۵ میلی‌لیتر بر ساعت) در جریان هوای ۲۰۰ لیتر بر دقیقه در فشار ۰/۶ مگاپاسکال برای اسپری کردن به موضع ماشینکاری استفاده شدند. انتخاب پارامترهای روانکاری کمینه با توجه به نتایج تحقیق‌های قبلی مورد استفاده در ماشینکاری آلیاژهای تیتانیومی انتخاب شدند [۲۳ و ۲۴].

مقایسه اثر روانکاری/خنک‌کاری در شرایط برشی ثابت انجام گرفت.

1 Neolith FC A403
2 Unilube
3 UNILUBE 2032



(الف) (ب)

شکل ۳: (الف) درصد کاهش قطر و (ب) تغییرات طول میانگین سایش سطح آزاد ابزار

سرعت برشی، v_c، ۶۰ متر بر دقیقه، عمق برشی، a_p، ۱۵۰ میکرومتر و پیشروی بر واحد دندانه، f_z، ۶ میکرومتر بر دندانه انتخاب شدند. عرض برش نیز برابر با قطر میکرو ابزار ۸۰۰ میکرومتر بوده است. انتخاب این پارامترها با توجه به آزمایش‌های تجربی اولیه بوده است.

مشخصه‌های خروجی مورد ارزیابی در این تحقیق شامل زبری سطح و عرض پلیسه به عنوان دو مشخصه مهم کیفیت سطح، به همراه توپوگرافی سطح و دقت ابعادی شیارها هستند که برای تحلیل بهتر و دقیقتر نتایج، نیروهای برشی، دما و سایش ابزار نیز اندازه‌گیری شدند. از مینی دینامومتر کیستلر[1] به همراه شارژ امپلی‌فایر نوع ۵۰۷۰ برای اندازه‌گیری نیروهای برشی حین فرایند استفاده شد که از طریق کارت اکتساب داده جهت پردازش و ثبت داده‌های اندازه‌گیری شده با فرکانس نمونه برداری ۴۳ کیلوهرتز، به کامپیوتر منتقل شد. اندازه‌گیری سایش ابزار با میکروسکوپ پرتابل دینولایت[2] انجام گرفت. از هر میکرو ابزار برای میکروفرکاری سه شیار به طول ۱۴ میلی‌متر مربوط به هر شرایط ماشینکاری استفاده شد. از پروفایلر سه‌بعدی بدون تماس نانوفاکوس[3] برای ارزیابی زبری سطح، توپوگرافی و همچنین عرض میکرو پلیسه استفاده شد. برای کنترل دقت ابعادی و شکل هندسی شیارها از پروفایلر سه‌بعدی به همراه میکروسکوپ نوری الیمپیوس[4] با حداکثر بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر استفاده شد.

1 Kistler mini-dynamometer (type 9256C1)
2 Dino-Lite (type AM7915)
3 Nano focus µSurf
4 Olympus (type bx51m)

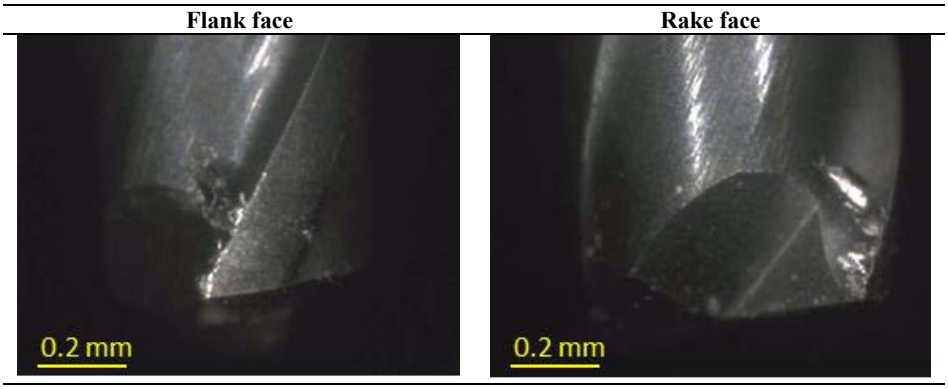
۳- نتایج و بحث

تأثیر شرایط خنک‌کاری و/یا روانکاری در شرایط مختلف برشی حین میکروفرزکاری آلیاژ تیتانیوم بر روی مشخصه‌های مختلفی نظیر زبری سطح، سایز میکرو پلیسه، دقت ابعادی، سایش میکرو ابزار و نیروهای برشی در ادامه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

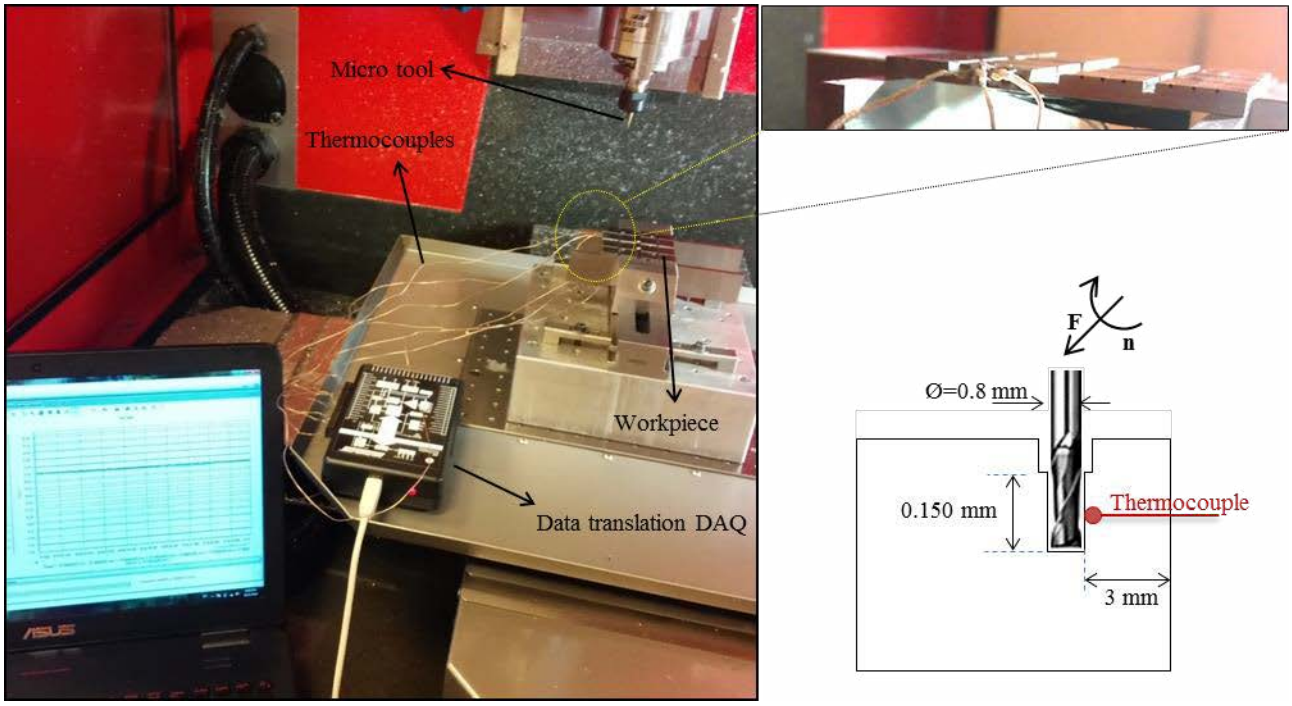
۳-۱- سایش میکرو ابزار

اندازه‌گیری سایش ابزار در میکرو فرز، به علت کوچک بودن سایز ابزارها چالش برانگیز بوده و از این رو معیار قابل اعتماد و معتبری در ارتباط با وضعیت لبه برنده‌ی میکرو ابزارها تاکنون ارائه نشده است. یکی از روش‌های تعیین میزان سایش میکرو ابزار، اندازه‌گیری مقدار کاهش قطر مؤثر است [۲۵]، که به علت سایش و گرد شدن لبه برنده کاهش می‌یابد. در این مطالعه، درصد کاهش قطر ابزار و طول میانگین سایش سطح آزاد ابزار بعنوان دو معیار مختلف سایش ابزار اندازه‌گیری، و نتایج بدست آمده در شکل‌های ۳ (الف) و ۳ (ب) نمایش داده شده است.

بیشترین سایش ابزار مربوط به میکروفرزکاری در شرایط خشک و سپس شرایط تر بوده و این در حالی است که استفاده از روانکاری کمینه، کمترین میزان سایش ابزار را نتیجه داده و در این بین روانکاری با استفاده از دو نازل پاششی بهترین عملکرد را روی عمر ابزار داشته است. تشکیل لبه انباشته و چسبیدن آن به لبه ابزار در شرایط خشک و به مقدار کمتری در شرایط تر به چشم می‌خورد



شکل ۴: تشکیل لبه انباشته در شرایط خشک

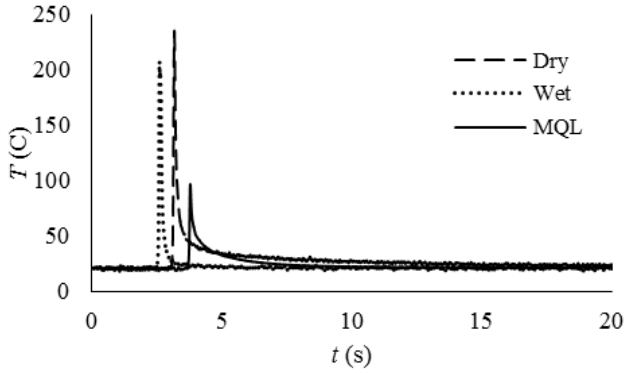


شکل ۵: چیدمان آزمایش اندازه‌گیری دمای برش

درحالیکه در شرایط روانکاری کمینه لبه های ابزار کماکان تیز بوده و عاری از هرگونه تشکیل لبه انباشته یا چسبیدن مواد به ابزار بوده‌اند. شکل ۴، تشکیل لبه انباشته در میکرو ابزار را در شرایط خشک نشان می‌دهد.

سایش زیاد ابزار در وضعیت خشک، ناشی از دمای بالا و اصطکاک زیاد بین ابزار برشی و قطعه‌کار است که این موضوع در مورد آلیاژ تیتانیوم به علت هدایت حرارتی پایین و ظرفیت حرارتی بالا چشمگیرتر است. ماشینکاری این آلیاژ معمولاً در شرایط خشک، به علت دما و فشار بالا باعث تشکیل لبه انباشته و در نهایت سایش بیشتر ابزار برشی می‌شود. شرایط تقریباً مشابهی در شرایط تر روی داده است. بکارگیری روش تر، نقش چندان مؤثری در کاهش دمای برش و در نتیجه سایش ابزار نداشته است. هر دو نوع روانکاری کمینه با یک و دو نازل پاششی، کمترین میزان سایش ابزار را نتیجه دادند که این امر ناشی از پاشش مؤثر روانکار به موضع کوچک برش به علت فشار بالای آن بوده و باعث نفوذ ذرات روغن در عمق برش و لمس کردن لبه برنده میکرو ابزار گردیده است.

جهت پاشش نازل با هدایت جریان روغن به روی هر یک از سطوح آزاد و براده میکرو ابزار برشی، می‌تواند بر میزان سایش ابزار در آن



شکل۶ : پروفیل تاریخچه دمایی اندازه‌گیری شده برای سیستم‌های خنک‌کاری مختلف

نواحی تأثیرگذار گردد. اگرچه پاشش روغن در جهت پیشروی در مقایسه با جهت مخالف آن، با توجه به چرخش ساعتگرد ابزار منجر به نگهداری بیشتر روغن درون ناحیه برش و در نتیجه سایش کمتر سطح آزاد میکرو ابزار می‌گردد، اما پاشش همزمان نازل از دو طرف، باعث هدایت روغن به هر دو سطح آزاد و براده از ابزار برشی شده و ضمن نگهداری روغن در موضع برش منجر به کاهش سایش در هر دو سطح آزاد و براده از میکرو ابزار می‌گردد. از این رو استفاده از روانکاری با دو نازل پاششی موجب کاهش بیشتر سایش ابزار در هر دو سطح آزاده و براده بخصوص در سرعت‌های برشی بالاتر می‌گردد.

برای مقایسه نقش خنک‌کاری سیستم‌های مختلف روانکاری، دمای برش به روش تجربی اندازه‌گیری شده است. از ترموکوپل نوع K به قطر ۰/۱۲۵ میلی‌متر مطابق شکل ۵، برای اندازه‌گیری دمای برش در سه حالت خشک، تر، و روانکاری کمینه دو-نازله استفاده شد.

پروفیل تاریخچه دمایی حاصل از میکروفرزکاری در شرایط برشی با سرعت ۶۰ متر بر دقیقه، پیشروی ۷۱۶/۵۲ میلی‌متر بر دقیقه و عمق برش ۱۵۰ میکرومتر، در شکل ۶ نشان داده شده است. قله نمودار معرف دمای بیشینه برش در هر شرایط روانکاری است. واضح مشاهده می‌شود که شرایط تر، نقش چندانی در کاهش دمای برشی در مقایسه با شرایط خشک نداشته (حدوداً ۱۱٪)، و این در حالی است که استفاده از روانکاری کمینه کاهش زیاد دمای بیشینه برش (حدوداً ۵۸٪) را بدنبال داشته است.

در توضیح علل کاهش دمای بدست آمده در شرایط روانکاری کمینه می‌توان به نقش مؤثر روانکاری و خنک‌کاری در آن اشاره کرد. در میکروفرزکاری بدلیل کوچکی ناحیه برش امکان نفوذ سیال به درون آن ناحیه در شرایط تر به راحتی امکان‌پذیر نبوده و لذا عملکرد مؤثری در خصوص خنک‌کاری نخواهد داشت. حال آنکه در روانکاری کمینه به علت فشار پاشش و اسپری شدن مخلوط روغن و هوا به سمت ناحیه برش، امکان نفوذ سیال و برقراری تماس با سطوح ابزار راحت‌تر انجام می‌گیرد و روانکاری مؤثر سطح برخورد بین لبه برنده ابزار و براده با کاهش اصطکاک در این سطح برخورد، موجب کاهش حرارت تولیدی می‌شود و از جوش‌خوردن براده به ابزار که در برش‌های بعدی می‌بایست با آن مواجه شود جلوگیری می‌کند. از سویی دیگر، افزایش نرخ جریان و سرعت پاشش نیز با افزایش ضریب انتقال حرارت و پخش سریعتر حرارت، مستقیماً کاهش دما را به همراه خواهند آورد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که نقش خنک‌کنندگیِ شرایط کمینه در میکروفرزکاری این آلیاژ بهتر از سایر شرایط بوده است.

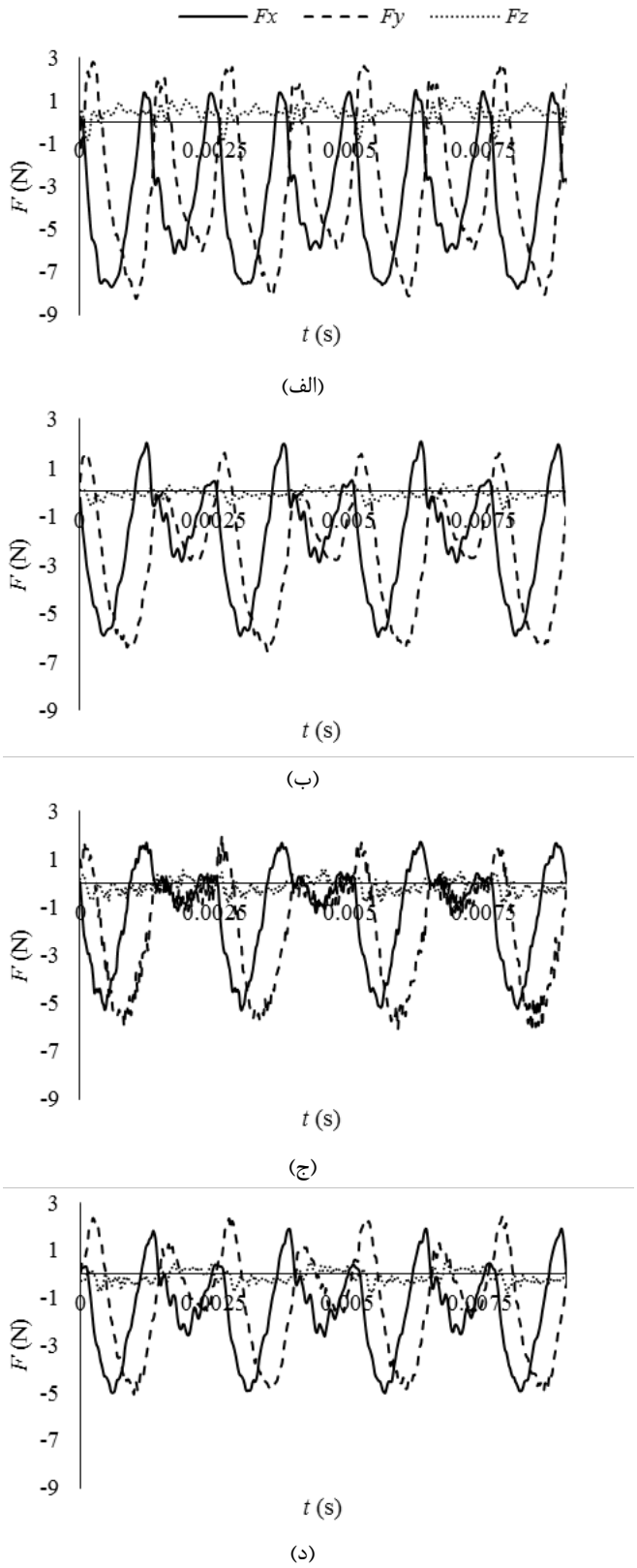
۳-۲- نیروی برش

به منظور مقایسه نقش روانکاری و تحلیل بهتر نتایج، مقادیر نیروهای برشی در تمامی آزمایش‌ها، اندازه‌گیری و ثبت شده‌اند. شکل ۷، گراف مربوط به نیروهای برشی اندازه‌گیری شده در شرایط مختلف روانکاری را نشان می‌دهد که در آن، F_x مؤلفه نیروی برش در راستای پیشروی، F_y مؤلفه شعاعی ، و F_z نیز مؤلفه نیروی برش در راستای محور ابزار هستند. برای مقایسه کمی برآیند نیروهای برشی در شرایط مختلف آزمایش، مقدار میانگین برآیند سه مولفه نیرویی F_x، F_y و F_z محاسبه و در جدول ۲ خلاصه شدند.

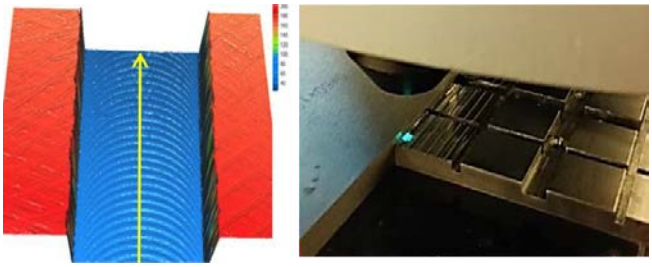
در بین تمامی شرایط آزمایش، بیشترین نیروی برشی در شرایط ماشینکاری خشک بدست آمده است. شرایط تر (به دلیل استفاده از روغن نیمه مصنوعی و وجود ٪۳۰-۲ روغن در آنها) و به خصوص روانکاری کمینه موجب کاهش نیروهای برشی شده‌اند که در این بین روانکاری کمینه با دو نازل پاششی بهترین عملکرد را با کمترین مقدار نیروی برشی دارا بود. سایش کمتر ابزار و تیز ماندن لبه برنده (شکل ۳)، در کنار عملکرد مؤثرتر روانکاری در حالت کمینه در کاهش

جدول ۲: مقادیر نیروی برش میانگین در شرایط مختلف روانکاری

خشک	تر	روانکاری کمینه تک-نازله	روانکاری کمینه دو-نازله
6/077 N	4/028 N	3/002 N	2/736 N



شکل ۷: گراف نیرویی در شرایط (الف) خشک، (ب) تر، (ج) روانکاری کمینه تک نازله، و (د) روانکاری کمینه دو نازله



شکل ۸: چیدمان اندازه‌گیری زبری سطح

جدول ۳: مقادیر زبری میانگین سطح بر حسب میکرومتر

خشک	تر	نیمه‌خشک تک-نازله	نیمه‌خشک دو-نازله
0/361	0/350	0/326	0/311

ضریب اصطکاک (شکل ۷)، را می‌توان از علل اصلی کاهش بیشتر نیروهای برش در استفاده از روانکاری کمینه در مقایسه با شرایط تر و خشک حین میکروفرزکاری این آلیاژ دانست.

۳-۳- زبری سطح

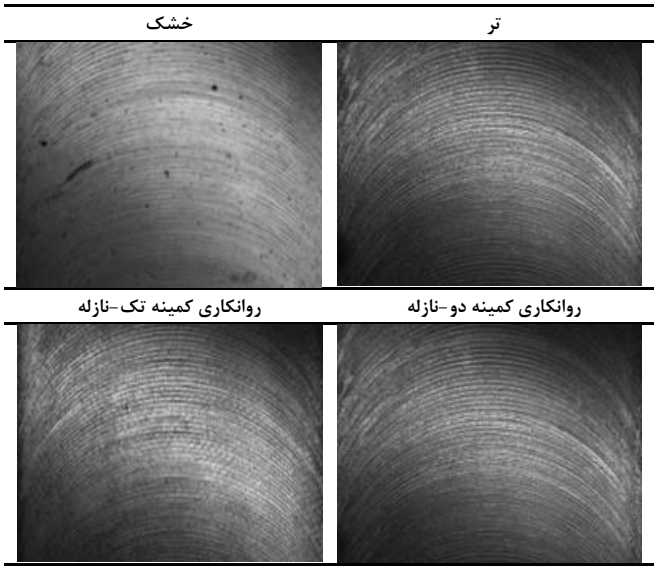
زبری سطح یکی از مهمترین مشخصه‌های ارزیابی کیفیت سطح شناخته می‌شود. عوامل مختلفی نظیر پارامترهای برشی، نوع روانکاری، انحراف ابزار، اثر اندازه، لنگی و ارتعاشات ماشینکاری می‌توانند بر مقدار زبری سطح تأثیرگذار باشند [۲۶ و۲۷]. در این تحقیق، اندازه‌گیری زبری سطح با استفاده از پروفایلر سه‌بعدی به روش غیرتماسی در جهت پیشروی و در خط مرکز شیارها به صورتی که در شکل ۸ نشان داده شده است، انجام گرفت. با توجه به محدوده مقادیر زبری از طول کات آف[1] برابر ۸۰۰ میکرون طبق استاندارد DIN EN ISO 4288 برای اندازه‌گیری استفاده شد. زبری‌سنجی با ۳ بار تکرار و در ۵ محل مختلف مربوط به هر تست، انجام و میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده به عنوان زبری سطح متوسط، Ra، در جدول ۳ خلاصه گردید.

نتایج حاکی از آن است که سیستم روانکاری کمینه و شرایط خشک، به ترتیب دارای بهترین و بدترین صافی سطح هستند. زبری سطح بدست آمده در شرایط تر اختلاف چندانی با شرایط خشک نداشته و در این بین روانکاری کمینه با دو نازل پاششی کمترین زبری

1 Cut off

سطح را نتیجه داده است. اختلاف موجود در مقادیر زبری سطح ناشی از عوامل سایش و انحراف ابزار می‌تواند باشد. سایش کمتر ابزار و حفظ شرایط تیزی ابزار در شرایط روانکاری کمینه، موجب دستیابی به کیفیت سطح بهتر شده است و این در حالی است که افزایش نیروهای برشی در شرایط خشک و تر، با انحراف بیشتر ابزار موجب خراب شدن سطح ماشینکاری‌شده می‌شوند. این برتری حتی در سرعت‌های برشی و عمق برشی بالاتر می‌تواند چشمگیرتر باشد.

تصاویر مربوط به توپوگرافی سطوح میکروفرزکاری‌شده در شرایط مختلف روانکاری در شکل ۹ آورده شده است. در مقایسه میان روانکاری‌های مختلف مشاهده شده است که روانکاری کمینه در مقایسه با روانکاری تر و بخصوص خشک، به علت سایش کمتر ابزار و تیز بودن لبه برنده و همچنین عدم تشکیل لبه انباشته، سطحی یکنواخت‌تر و منظم‌تر تولید کرده است.



شکل ۹: بافت سطحی بدست آمده میکروشیارها در شرایط مختلف روانکاری

۳-۴- میکرو پلیسه

تشکیل پلیسه در شرایط مختلف روانکاری به صورت کیفی و کمی مورد ارزیابی قرار گرفت. سه پارامتر مهم تعیین کننده هندسه پلیسه عبارتند از: عرض پلیسه (w_b)، ارتفاع پلیسه (h_b) و ضخامت پلیسه (t_b) (شکل ۱۰). در این تحقیق عرض پلیسه عمود بر راستای پیشروی اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه عرض میکرو پلیسه در طول شیار یکسان نیست، لذا برای اطمینان از اندازه‌گیری درست آن، سطح بالای شیار با استفاده از پروفایلر سه‌بعدی اسکن شده و عرض پلیسه در ۱۰ محل مختلف در طول شیارها، اندازه‌گیری و میانگین آنها برای تحلیل استفاده شد. از آنجاکه تشکیل پلیسه در دو سمت دیواره با توجه به دو نوع باربرداری مختلف موافق[1] و مخالف[2] در آنها متفاوت خواهد بود، لذا در این تحقیق به مقایسه مشخصه‌های پلیسه در هر دو سمت پرداخته شده است.

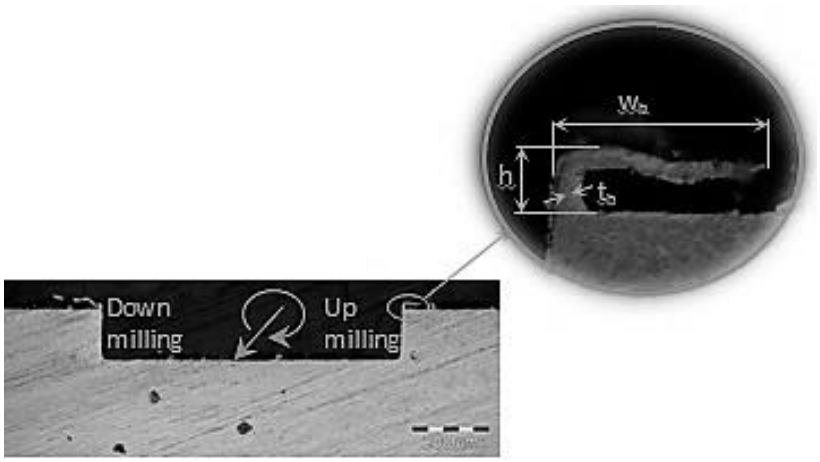
تصاویر گرفته شده از نمونه‌ها جهت مقایسه کیفی عرض پلیسه در شکل ۱۱ آورده شده است. بیشترین عرض پلیسه در شرایط خشک و بدنبال آن در شرایط تر، روانکاری کمینه تک-نازله و دو-نازله ایجاد شد. با توجه به اینکه شرایط آزمایش در پیشروی ۶ میکرومتر بر دندانه (تقریباً در اندازه‌های شعاع لبه برنده ابزار که ۶/۲۶ میکرون است) انجام گرفت، لذا در تمامی شرایط روانکاری مورد استفاده به علت وجود شرایط شخم‌زنی و اثرات اندازه، تشکیل پلیسه مشاهده می‌شود [۲۸].

جهت مقایسه کمی اثر تکنیک‌های مختلف روانکاری بر اندازه‌های عرض پلیسه، مقادیر اندازه‌گیری شده در شرایط مختلف آزمایش در شکل ۱۲ به تفکیک در نواحی مخالف و موافق نشان داده شده است.

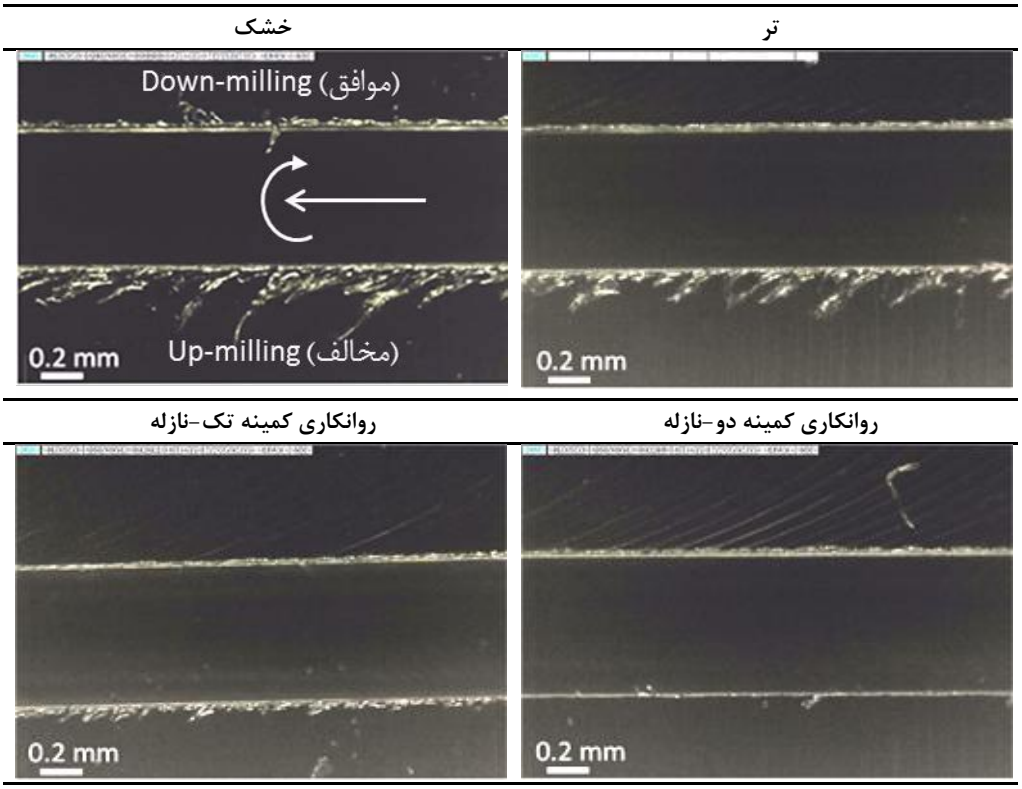
روانکاری‌های مختلف نقش پررنگی بر اندازه عرض پلیسه‌های تشکیل یافته دارند بطوری که روانکاری‌های خشک و تر، با سایش شدیدتر ابزار و تشکیل لبه انباشته که افزایش شعاع لبه برنده را بدنبال دارند، منجر به تشکیل پلیسه‌هایی عریض‌تر در مقایسه با روانکارهای کمینه می‌شوند. از روابط بین سایش ابزار، زبری و تشکیل پلیسه می‌توان نتیجه گرفت که کاهش اندازه پلیسه تشکیل یافته در شرایط روانکاری کمینه تا بخش زیادی ناشی از سایش کمتر ابزار و تیز ماندن آن در غیاب لبه انباشته بوده است.

در مورد روانکاری‌های کمینه نیز نوع تک-نازله در مقایسه با حالت دو-نازله منجر به تشکیل پلیسه‌های تقریباً کوچکتری به ویژه در سمت مخالف (حدود ۳۳ میکرون) شده است. این اختلاف اندازه پلیسه ناشی از ارتعاشات میکرو ابزار می‌تواند باشد. زاویه پاشش سیال بر میزان ارتعاشات میکرو ابزار تأثیرگذار بوده که این خود عاملی بر افزایش اندازه پلیسه است [۲۹]. از این رو، در مقایسه با حالت تک-نازله، تشکیل پلیسه‌های بزرگتر در حالت دو-نازله می‌تواند ناشی از ارتعاشات بیشتر میکرو ابزار به علت استفاده از نازل‌های پاششی در

1 Down-milling
2 Up-milling



شکل ۱۰: مشخصه‌های هندسی پلیسه

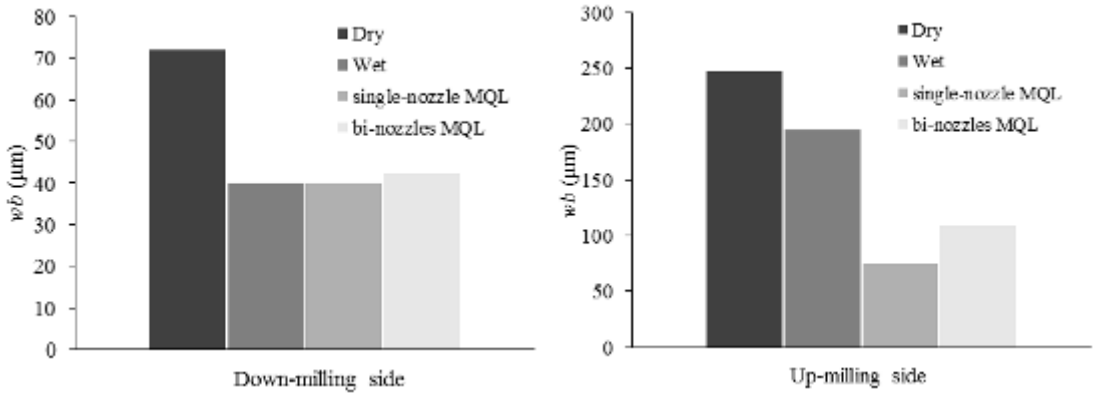


شکل ۱۱: تأثیر شرایط مختلف روانکاری بر اندازه میکرو پلیسه

دو طرف ابزار باشد.

در مورد حالت فرزکاری نیز، مستقل از نوع روانکار بکار رفته، پلیسه‌های بسیار بزرگتری در سمت مخالف تشکیل شد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲) که مشابه نتایجی است که دودزینسکی [۳۰] و اوزیل [۳۱] در میکروفرزکاری آلیاژ تیتانیوم گزارش کردند. اختلاف اندازه پلیسه در دو حالت فرزکاری ناشی از سازوکارهای تشکیل پلیسه و ارتعاشات می‌تواند باشد [۳۲ و ۳۳]. در نیم دور چرخش ابزار که به صورت باربرداری مخالف انجام می‌گیرد، براده برداشته به قدری نازک است که ابزار تمایل به سر خوردن روی ماده دارد و تا زمان رسیدن به مقدار کمینه ضخامت براده[1] مورد نیاز برای شروع برش، سازوکار شخم‌زنی و ساییدن ماده انجام می‌گیرد که این امر در نهایت با تغییرشکل بیشتر

1 Minimum chip thickness



(ب) (الف)

شکل ۱۲: اندازه عرض پلیسه (الف) سمت مخالف (ب) سمت موافق

ماده موجب افزایش اندازه پلیسه‌های تشکیل یافته می‌شود.

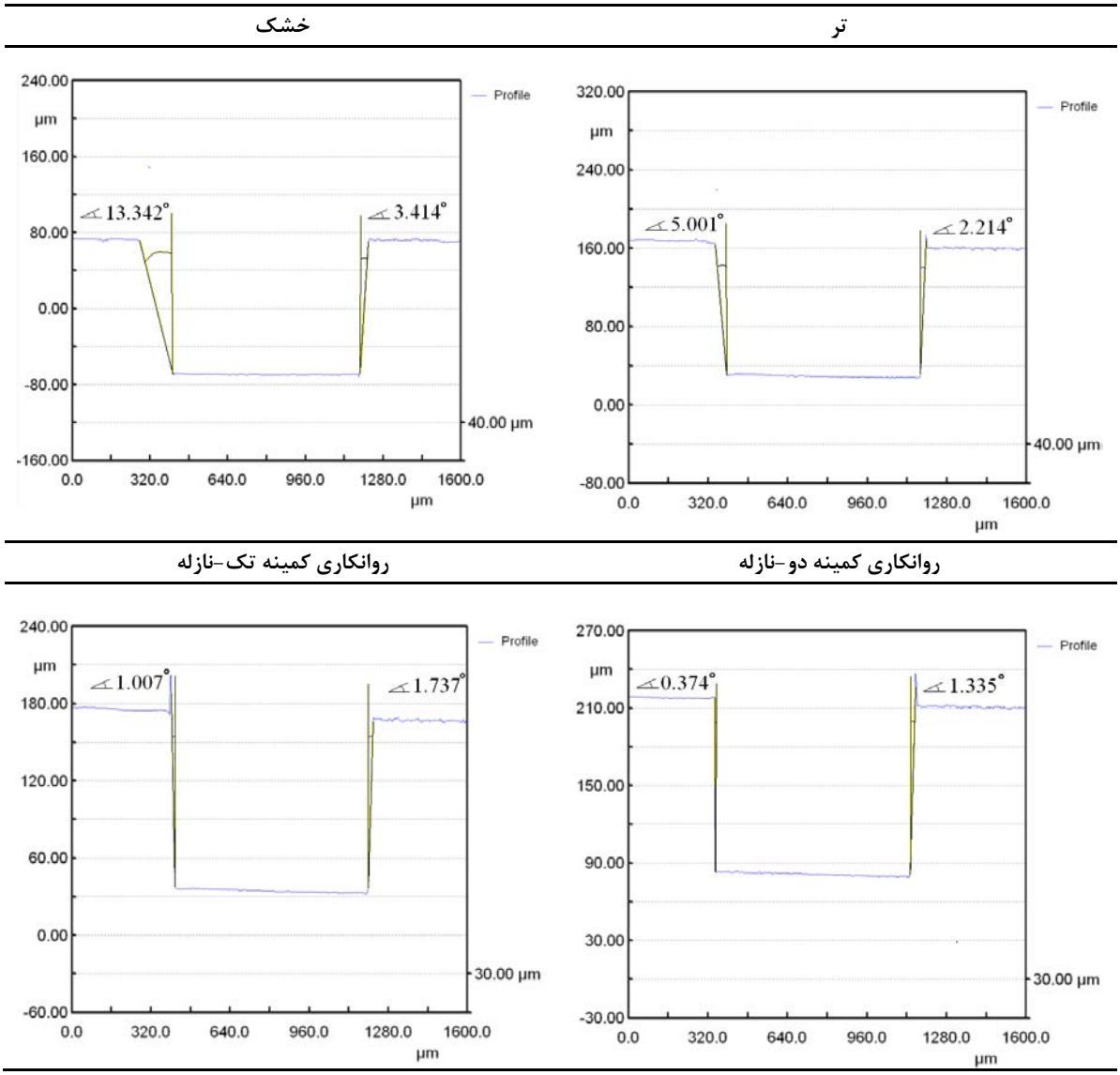
۵-۳- دقت ابعادی

تأثیر شرایط مختلف روانکاری بر دقت ابعادی شیارها و شکل هندسی آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۱۳، مقطع عرضی شیارهای ایجاد شده را در قسمت میانی در شرایط مختلف روانکاری نشان می‌دهد. به منظور مقایسه کمی دقت ابعادی شیارها، زاویه دیواره در دو طرف شیارها با استفاده از پروفایلر سه بعدی اندازه‌گیری و آورده شده است. بهترین دقت ابعادی در استفاده از روانکاری‌های کمینه بدست آمده است و این در حالی است که میکرو شیارهای زده شده در حالت خشک از دقت ابعادی چندانی برخوردار نبوده و بجای مقطع مربعی، تقریباً ذوزنقه‌ای شکل شدند. از مهمترین علل کاهش دقت ابعادی شیارهای زده شده، افزایش انحراف ابزار ناشی از نیروهای اعمالی بیشتر، سایش شدیدتر ابزار برشی و همچنین تشکیل لبه انباشته را می‌توان برشمرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر شرایط مختلف روانکاری و خنک‌کاری بر مشخصه‌های مختلف زبری، میکرو پلیسه، سایش ابزار، نیروی برشی و دقت ابعادی میکروشیارها در میکروفرزکاری آلیاژ تیتانیومی Ti6Al4V مورد ارزیابی قرار گرفت. شرایط خشک، تر و روانکاری کمینه به صورت‌های تک نازله و دونازله بکار گرفته شدند و نتایج زیر حاصل گردید:

- روانکاری کمینه عملکرد مؤثری در خنک‌کاری و روانکاری حین میکروفرزکاری این آلیاژ داشت، این در حالی است که شرایط تر برخلاف روش‌های فرزکاری معمولی نقش چندان مؤثری بر خنک‌کاری نداشته است. دلیل این امر، عدم توانایی سیال برشی در نفوذ مؤثر به درون ناحیه کوچک برش در میکروفرزکاری بوده است.
- بیشترین اندازه نیروهای برشی در شرایط خشک و سپس تر بوده است، درحالیکه هر دو حالت روانکاری کمینه تک-نازله و دو-نازله کمترین نیروهای برشی را نتیجه دادند.
- بیشترین سایش ابزار در شرایط خشک و سپس تر بوجود آمد که شامل چسبیدن براده به ابزار و تشکیل لبه انباشته بود. در حالیکه در استفاده از روانکاری کمینه، بخصوص در هنگام استفاده از دو نازل پاششی، کمترین سایش ابزار بدست آمد.
- در مورد زبری سطح، بهترین و بدترین صافی سطح به ترتیب در میکروفرزکاری در شرایط روانکاری کمینه و خشک بدست آمد و استفاده از روانکاری کمینه با دو نازل پاششی بهترین عملکرد را در بهبود کیفیت سطح داشته است.
- در تمامی شرایط روانکاری بکار رفته در این تحقیق، میکرو پلیسه‌هایی مشاهده شد که در این بین روانکاری کمینه بهترین عملکرد را در کاهش اندازه پلیسه‌های تشکیل شده داشته است. اختلاف چشمگیری در اندازه میکرو پلیسه‌های تشکیل شده در استفاده از پاشش تک-نازله و دو-نازله مشاهده نشد.
- میکرو شیارهای دقیق‌تری در استفاده از روانکاری کمینه بدست آمد بطوری‌که استفاده از شرایط خشک و تاحدی نیز شرایط



شکل ۱۳: تصاویر شکل هندسی میکروشیارها در شرایط مختلف روانکاری

تر، منجر به تشکیل میکرو شیارهای ذوزنقه‌ای شکل شدند.

- در نهایت، بهترین عملکرد در استفاده از روانکاری کمینه با دو نازل پاششی بدست آمد که سایش کمتر ابزار و کیفیت بهتر سطح میکروفرزکاری شده را نتیجه داده است.

تقدیر و تشکر

از شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی با توجه به پشتیبانی و حمایت مالی صورت گرفته، تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از پرسنل محترم آزمایشگاه ماشینکاری دانشگاه سابانجی استانبول و مسئول آزمایشگاه نمونه‌سازی مواد در دانشگاه تربیت مدرس که در انجام آزمایش‌ها و تحلیل نتایج نهایت همکاری را با نویسندگان این مقاله داشتند، سپاسگزاری می‌گردد.

مراجع

[1] Ding, Hongtao, Ninggang Shen, and Yung C. Shin. “Thermal and mechanical modeling analysis of laser-assisted micro-milling of difficult-to-machine alloys.” *Journal of Materials Processing Technology* 212.3 (2012): 601-613.

[2] Shokrani, Alborz, Vimal Dhokia, and Stephen T. Newman. “Environmentally conscious machining of

[13] Jun, Martin B., et al. "An experimental evaluation of an atomization-based cutting fluid application system for micromachining." *Journal of manufacturing science and engineering* 130.3 (2008): 031118.

[14] Heisel, Uwe, et al. "Application of minimum quantity cooling lubrication technology in cutting processes." (1994).

[15] Sadeghi, M. H., et al. "An investigation on surface grinding of AISI 4140 hardened steel using minimum quantity lubrication-MQL technique." *International Journal of Material Forming* 3.4 (2010): 241-251.

[16] Frăţilă, Domniţa Florina, and Cristian Caizar. "Assessment of cooling effect and surface quality to face milling of AlMg3 using several cooling lubrication methods." *Materials and Manufacturing Processes* 27.3 (2012): 291-296.

[17] Cai, Xiao Jiang, et al. "An experimental investigation on effects of minimum quantity lubrication oil supply rate in high-speed end milling of Ti–6Al–4V." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 226.11 (2012): 1784-1792.

[18] Sun, J., et al. "Effects of coolant supply methods and cutting conditions on tool life in end milling titanium alloy." *Machining Science and Technology* 10.3 (2006): 355-370.

[19] Liu, Z. Q., et al. "Investigation of cutting force and temperature of end-milling Ti–6Al–4V with different minimum quantity lubrication (MQL) parameters." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 225.8 (2011): 1273-1279.

[20] Su, Y., et al. "Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47.6 (2007): 927-933.

[21] Karpat, Yiğit. "Temperature dependent flow softening of titanium alloy Ti6Al4V: An investigation using finite element simulation of machining." *Journal of Materials Processing Technology* 211.4 (2011): 737-749.

difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 57 (2012): 83-101.

[3] Kundrák, J., et al. "Environmentally friendly precision machining." *Materials and manufacturing processes* 21.1 (2006): 29-37.

[4] Oberg, Erik, and Erik Oberg. *Machinery's Handbook & Guide to Machinery's Handbook*. Industrial Press, 2008.

[5] Adler, D. P., et al. "Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns." *Machining Science and technology* 10.1 (2006): 23-58.

[6] Çakır, O., et al. "Selection of cutting fluids in machining processes." *Journal of Achievements in materials and Manufacturing engineering* 25.2 (2007): 99-102.

[7] Singh, Talwinder, et al. "A review of near dry machining/minimum quantity lubrication machining of difficult to machine alloys." *International Journal of Machining and Machinability of Materials* 18.3 (2016): 213-251.

[8] Sharma, Vishal S., GurRaj Singh, and Knut Sørby. "A review on minimum quantity lubrication for machining processes." *Materials and manufacturing processes* 30.8 (2015): 935-953.

[9] Revuru, Rukmini Srikant, et al. "Application of cutting fluids in machining of titanium alloys—a review." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 1-22.

[10] Klocke, F. A. E. G., and G. Eisenblätter. "Dry cutting." *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 46.2 (1997): 519-526.

[11] Dawood, Abdulhameed, Gregory K. Arbuckle, and Muhammad P. Jahan. "A comparative study on the machinability of Ti-6Al-4V using conventional flood coolant and sustainable dry machining." *International Journal of Machining and Machinability of Materials* 17.6 (2015): 507-528.

[12] Byers, Jerry P., ed. *Metalworking fluids*. Crc Press, 2016.

[22] Basturk, S., et al. “Titanium machining with new plasma boronized cutting tools.” *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 59.1 (2010): 101-104.

[23] Zhao, Wei, Ning He, and Liang Li. “High speed milling of Ti6Al4V alloy with minimal quantity lubrication.” *Key engineering materials*. Vol. 329. Trans Tech Publications, 2007.

[24] Li, Kuan-Ming, and Shih-Yen Chou. “Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling.” *Journal of materials processing technology* 210.15 (2010): 2163-2170.

[25] Jun, M., et al. “Experimental investigation of machinability and tool wear in micro-end milling.” *Trans of NAMRI/SME* 36 (2008): 201-208.

[26] Arizmendi, M., et al. “Model for surface topography prediction in peripheral milling considering tool vibration.” *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 58.1 (2009): 93-96.

[27] Arizmendi, M., et al. “Model development for the prediction of surface topography generated by ball-end mills taking into account the tool parallel axis offset. Experimental validation.” *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 57.1 (2008): 101-104.

[28] Denkena, Berend, Jens Koehler, and Michael Rehe. “Influence of the honed cutting edge on tool wear and surface integrity in slot milling of 42CrMo4 steel.” *Procedia CIRP* 1 (2012): 190-195.

[29] Zheng, Xiaohu, et al. “Experimental study on micro-milling of Ti6Al4V with minimum quantity lubrication.” *International Journal of Nanomanufacturing* 9.5-6 (2013): 570-582.

[30] Piquard, Romain, et al. “Micro-end milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation.” *Precision Engineering* 38.2 (2014): 356-364.

[31] Thepsonthi, Thanongsak, and Tuğrul Özel. “Multi-objective process optimization for micro-end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy.” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 63.9-12 (2012): 903-914.

[32] Aramcharoen, A., and P. T. Mativenga. “Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel.” *Precision Engineering* 33.4 (2009): 402-407.

[33] Mian, Aamer J., Nicholas Driver, and Paul T. Mativenga. “A comparative study of material phase effects on micro-machinability of multiphase materials.” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 50.1 (2010): 163-174.