مقاله

آثار خنک‌کاری تبریدی بر فرایندهای ماشینکاری

محمدمهدی ابوترابی*
استادیار گروه مهندسی مکانیک
دانشگاه یزد
abootorabi@yazd.ac.ir

عارف سلیمی نیا
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه یزد
e.arefsalimi@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۱۰

چکیده

یکی از معضلات اساسی در فرایندهای ماشینکاری، دمای تولیدشده در عملیات براده‌برداری است. این مشکل هنگام براده‌برداری مواد با استحکام بالا شدت می‌یابد. دمای زیاد در ماشینکاری سبب کاهش عمر ابزار می‌شود و دقت ابعادی و صافی سطح قطعه‌کار را پایین می‌آورد. یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش دما در ماشینکاری، استفاده از خنک‌کاری تبریدی است که در آن از نیتروژن مایع به‌عنوان خنک‌کننده استفاده می‌شود. در این مقاله، ابتدا خنک‌کاری تبریدی و روش‌های انجام آن معرفی و سپس با توجه به تحقیقات منتشرشده در این زمینه، تأثیر این خنک‌کاری بر دمای برش، سایش و عمر ابزار، انحراف ابعادی و اصطکاک ارائه می‌شود. در خنک‌کاری تبریدی، به‌علت تغییر خواص مواد در دمای پایین، چسبندگی بین سطوح و اصطکاک کم می‌شود و به‌علت حفظ سختی ابزار در دمای پایین، ارتفاع آستانهٔ فرسایش کاهش می‌یابد. علاوه بر این، کاهش دما و اصطکاک سبب افزایش عمر ابزار می‌گردد. در مجموع می‌توان گفت روش خنک‌کاری تبریدی باعث کاهش حرارت و اصطکاک و افزایش عمر ابزار و کیفیت سطح قطعه‌کار می‌گردد.

واژگان کلیدی: خنک‌کاری تبریدی، نیتروژن مایع، اصطکاک، عمر ابزار، زبری سطح

۱. مقدمه

مواد پیشرفتهٔ مهندسی از جمله آلیاژهای تیتانیوم، آلیاژهای نیکل و تانتالیوم ترکیبی منحصر به‌فرد از خواص مانند استحکام بالا و مقاومت در برابر سایش را ارائه می‌دهند. بالابودن نرخ حرارت تولیدشده هنگام براده‌برداری مواد پیشرفته موجب بالارفتن دما در ناحیهٔ برش و افزایش دمای ابزار قطعه‌کار می‌گردد. حرارت ایجادشده در ناحیهٔ برش ناشی از تغییر شکل پلاستیک مواد هنگام تشکیل براده، اصطکاک بین ابزار و براده و اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار است [۱]. این حرارت توسط قطعه‌کار، ابزار، براده و مایع برش دفع می‌شود. هدف اصلی در عملیات ماشینکاری، تولید قطعه‌های با دقت لازم، صافی سطح مناسب و شرایط به‌صرفهٔ اقتصادی است که روانکارها در رسیدن به این اهداف تأثیرگذارند. یک روانکار مناسب می‌تواند سبب افزایش عمر ابزار، بهبود کیفیت سطح قطعه‌کار، کاهش

نیروهای برش، کاهش تغییر شکل قطعه‌کار، راحت‌تر جداشدن براده، کاهش تشکیل لبهٔ انباشته و دفع براده از ناحیهٔ برش شود [۲]. سیالات برش را می‌توان به سه دستهٔ روغن‌های محلول در آب، روغن‌های برش ساده و گازها تقسیم‌بندی کرد [۳].

اگر در عملیات ماشینکاری، انتخاب سیال برش مناسب به‌طور صحیح صورت نگیرد، از خواص مطلوب روانکار به‌نحو احسن استفاده نمی‌شود. استفاده از نیتروژن مایع به‌عنوان خنک‌کننده، یکی از راه‌های کاهش دما در ناحیهٔ برش و بهبود قابلیت ماشینکاری سوپرآلیاژها، کامپوزیت‌های شبکه فلزی و مواد با استحکام بالاست. نیتروژن مایع به‌عنوان خنک‌کننده، به‌دلیل کاهش مؤثر دمای برش (در کامپوزیت‌های شبکه فلزی)، عدم آلودگی (در صنعت پزشکی) و تبدیل براده نرم به برادهٔ ترد و شکننده (در مواد پلیمری) مورد استفاده قرار می‌گیرد. وانگ و همکاران در سال ۲۰۰۲ م، در تراشکاری آلیاژهای تانتالیوم نتیجه گرفتند که خنک‌کاری تبریدی[1] به‌طور چشم‌گیری کیفیت سطح و عمر ابزار را افزایش می‌دهد. آنها افزایش عمر ابزار را تا ۳۰۰ درصد و بهبود کیفیت سطح را تا ۲۰۰ درصد گزارش کردند [۴].

چودهاری و کالیان در سال ۲۰۰۸ م از نیتروژن مایع به‌عنوان خنک‌کننده، به‌منظور بررسی میزان تأثیر آن بر نیروهای برش و سایش ابزار در تراشکاری فولاد ضدزنگ اس. اس. ۲۰۲ استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که خنک‌کاری تبریدی باعث کاهش ۳۷ تا۳۹ درصد عمق گودال فرسایش و کاهش ۱۴ درصد نیروهای برش می‌شود [۵]. کومار و مانیماران در سال ۲۰۱۳ م در سنگ‌زنی فولاد ضدزنگ ۳۱۶ با چرخ سنباده از جنس اکسید آلومینیم نشان دادند که خنک‌کاری تبریدی باعث کاهش ۳۲ درصد نیروهای برش، بهبود ۳۰ تا ۴۹ درصد کیفیت سطح و افزایش ۴۵ تا ۴۹ درصد نرخ براده‌برداری می‌شود [۶]. ناندام و همکاران در سال ۲۰۱۴ م به بررسی تأثیر خنک‌کاری تبریدی بر نرخ براده‌برداری در تراشکاری آلیاژهای مختلف تنگستن با ابزار کاربایدی پرداختند. آنها بیان کردند که خنک‌کاری تبریدی باعث افزایش نرخ براده برداری از تنگستن تا ۳۰۰ درصد می‌شود [۷]. گوپتا و همکاران در سال ۲۰۱۵ در تراشکاری فولاد AISI 1040 با ابزار تنگستن کارباید، عمق برش ۱ میلی‌متر، سرعت برش ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و نرخ‌های پیشروی مختلف به‌صورت تجربی نشان دادند که خنک‌کاری تبریدی باعث بهبود ۵۵ تا ۶۵ درصدی سایش ابزار و کاهش ۶۱ تا ۹۶ درصدی نیروهای برش می‌شود [۸]. البته معایبی هم برای خنک‌کاری تبریدی ذکر شده است که می‌توان به هزینه‌بر بودن تجهیزات، ایجاد سوختگی سرد در صورت تماس قسمتی از بدن با نیتروژن مایع و نیاز به پوشش مناسب برای اپراتور اشاره کرد.

۲. خنک‌کاری تبریدی

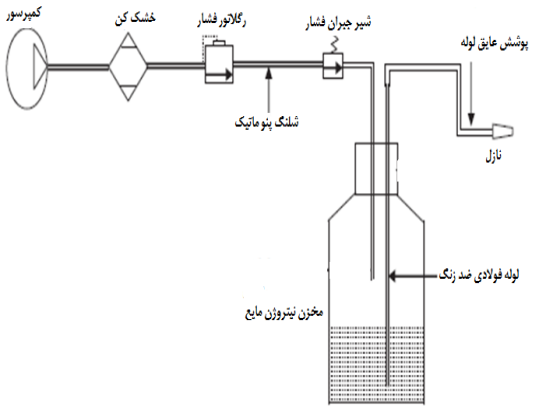
از گازهای پایدار مثل هلیوم، نئون، نیتروژن و اکسیژن به‌دلیل داشتن نقطه جوش بسیار پایین در صنایع پزشکی، الکترونیک، خودروسازی و هوافضا به‌طور گسترده استفاده می‌شود. در بین این گازها، نیتروژن مایع بیشترین کاربرد را در خنک‌کاری دارد [۱].

نیتروژن گازی بی‌بو، بی‌رنگ، بی‌مزه و غیرسمی با نقطهٔ جوش ۱۹۸- درجهٔ سانتی‌گراد است. هنگام براده برداری مواد با استحکام بالا استفاده از نیتروژن مایع به‌عنوان خنک‌کننده، روش مناسبی جهت کاهش حرارت تولیدی می‌باشد. خنک‌کاری تبریدی فرایندی است که در آن از نیتروژن مایع به‌عنوان خنک‌کننده به‌علت قدرت خنک‌کنندگی بالا در عملیات براده‌برداری استفاده می‌شود. عملکرد اصلی خنک‌کاری تبریدی، کاهش مؤثر دما در ناحیهٔ برش است [۹].

در شکل ۱ تجهیزات مورد نیاز فرایند خنک‌کاری تبریدی نمایش داده شده است. کمپرسور با دمش هوا به داخل مخزن نیتروژن مایع، فشار مورد نیاز جهت خروج نیتروژن از نازل را تأمین می‌کند [۱۰].

۳. انواع روش‌های خنک‌کاری تبریدی

روش‌های خنک‌کاری تبریدی را می‌توان به سه دستهٔ اصلی تقسیم‌بندی نمود. این روش‌ها در ادامه توضیح داده شده است.



شکل ۱. تجهیزات مورد نیاز در فرایند خنک‌کاری تبریدی [۱۰]

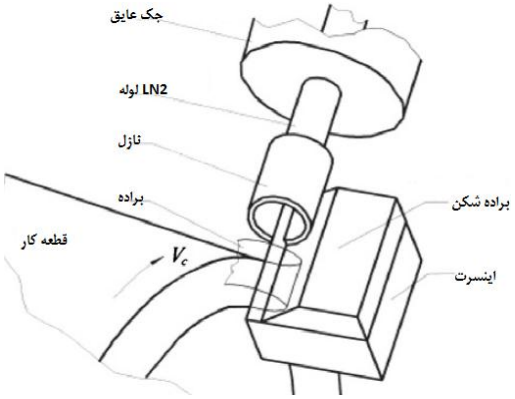
۳-۱. پیش‌سردکردن قطعه‌کار

در روش پیش‌سردکردن قطعه‌کار یا براده، هدف تبدیل برادهٔ نرم و انعطاف‌پذیر به برادهٔ ترد و شکننده است. دمای پایین، برادهٔ نرم و انعطاف‌پذیر را به برادهٔ شکننده تبدیل می‌کند. بهاتاچاریا وآلن نمونه را به دو روش الف) غوطه‌ور کردن در نیتروژن مایع، ب) ریختن مداوم نیتروژن مایع روی نمونه، جهت تبدیل برادهٔ نرم و انعطاف‌پذیر به برادهٔ ترد و شکننده پیش سرد کردند [۱۱]. روش دیگری که توسط هنگ و همکاران جهت پیش‌سردکردن قطعه‌کار اجرا شد در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۲].

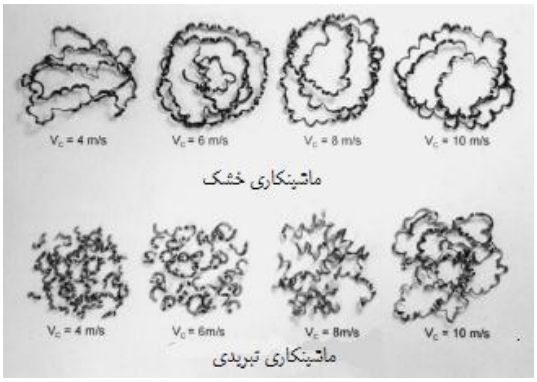
در شکل ۳ تأثیر پیش‌سردکردن قطعه‌کار بر خاصیت شکنندگی براده در ماشینکاری تبریدی در سرعت‌های برش مختلف با ماشینکاری خشک مقایسه شده است [۱۲].

۳-۲. خنک‌کاری تبریدی غیرمستقیم

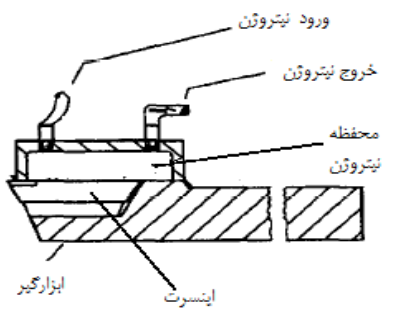
یکی از روش‌های خنک‌کاری تبریدی، روش غیرمستقیم است. هدف از این روش، خنک‌کاری ناحیهٔ برش با انتقال گرما از طریق محفظهٔ نیتروژن مایع است که در سطح ابزار یا ابزار گیر تعبیه شده است. روش خنک‌کاری ابزار با حوضچهٔ تعبیه‌شده در سطح ابزار در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۳].



شکل ۲. یک روش برای پیش‌سردکردن قطعه‌کار [۱۲]



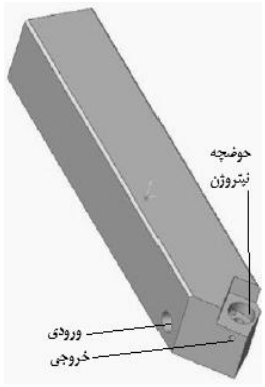
شکل ۳. تأثیر پیش‌سردکردن قطعه‌کار بر خاصیت شکنندگی براده در سرعت‌های برش مختلف [۱۲]



شکل ۴. خنک‌کاری ابزار به روش غیرمستقیم [۱۳]

روش دیگر که توسط احمد و همکاران اجرا شد، استفاده از گردش نیتروژن مایع در حوضچه‌ای است که روی بدنه ابزار گیر و زیر اینسرت ایجاد شده است. در این روش، نیتروژن مایع از طریق سوراخ تعبیه‌شده روی بدنهٔ ابزار گیر

وارد حوضچه نیتروژن شده و پس از جذب حرارت تولیدشده در ناحیه برش، بخار گردیده و به بیرون از ابزار هدایت می‌گردد [۱۴]. این روش در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. گردش نیتروژن مایع در حوضچهٔ
تعبیه‌شده روی بدنه ابزارگیر و زیر اینسرت [۱۴]

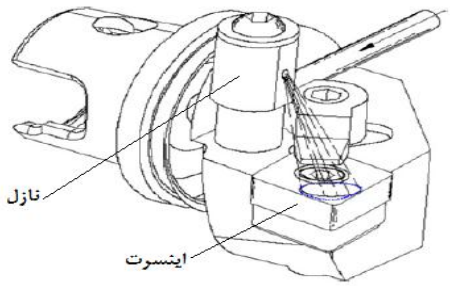
۳-۳. خنک‌کاری تبریدی پاششی

یکی دیگر از روش‌های خنک‌کاری تبریدی، روش پاششی است. هدف از این روش، خنک‌کاری ناحیهٔ برش مخصوصاً سطح تماس ابزار و براده با پاشش نیتروژن مایع به‌وسیلهٔ نازل است. چنین کاربردی می‌تواند باعث سردشدن ناخواستهٔ مناطق دیگر و افزایش نیروهای برش گردد [۱]. روش خنک‌کاری سطح برادهٔ ابزار با پاشش نیتروژن مایع به‌وسیلهٔ نازل، در شکل ۶ نشان داده شده است. در حالتی که نازل درون برادهشکن تعبیه شود، برادهشکن باعث کاهش طول براده، کاهش سطح تماس بین براده و ابزار و تسهیل در رسیدن نیتروژن مایع به ناحیهٔ تماس ابزار و براده می‌شود [۱۵]. تأثیر استفاده از برادهشکن روی کاهش طول تماس بین ابزار و براده در شکل ۷ نشان داده شده است.

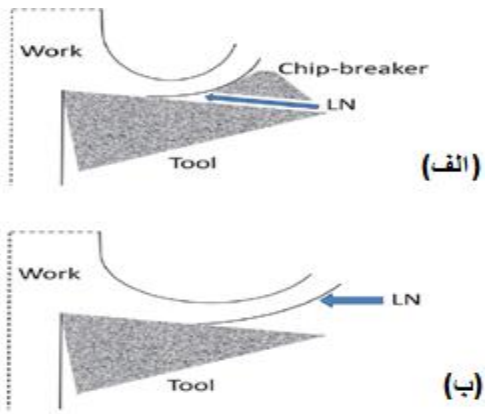
۴. آثار خنک‌کاری تبریدی

۴-۱. اثر خنک‌کاری تبریدی بر اصطکاک

نیتروژن مایع با جذب حرارت تولیدشده در ناحیهٔ برش به‌سرعت بخار شده و لایه‌ای از روانکار در ناحیه تماس ابزار و براده شکل می‌گیرد [۱]. دمای پایین، مواد را سخت‌تر و چسبندگی بین آنها را کاهش می‌دهد. با تشکیل لایهٔ روانکار و کاهش چسبندگی بین سطوح در فرایند خنک‌کاری تبریدی، اصطکاک کاهش پیدا می‌کند [۱۰]. جان در سال ۲۰۰۵ م در تحقیقات خود بر روی تراشکاری فولاد AISI 1018 و آلیاژ Ti6Al4V نشان داد که خنک‌کاری تبریدی باعث کاهش اصطکاک به اندازهٔ ۲۰ تا ۳۰ درصد می‌شود [۱۶].



شکل ۶. روش خنک‌کاری سطح برادهٔ ابزار
با پاشش نیتروژن مایع به‌وسیله نازل [۱]



شکل ۷. الف) نازل پاشش نیتروژن مایع درون برادهشکن ابزار
تعبیه شده است، ب) حالت بدون براده شکن [۱۵]

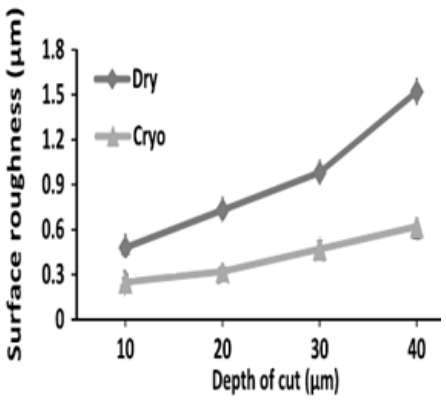
۴-۲. اثر خنک‌کاری تبریدی بر زبری سطح و دقت ابعادی

استفاده از سیالات برش، علاوه بر خنک‌کاری و ازدیاد طول عمر ابزار، کیفیت سطح بهتری را به‌وجود می‌آورد. به‌علت کاهش دمای ابزار و حفظ سختی آن، ارتفاع آستانهٔ فرسایش ابزار در سطح آزاد آن کاهش می‌یابد و در نتیجه

زبری سطح و انحراف ابعادی قطعه‌کار کم می‌شود [۱۷]. مانیماران و همکاران در سال ۲۰۱۴ م در سنگ‌زنی فولاد ضدزنگ ۳۱۶ با عمق‌های برش مختلف نتیجه گرفتند که خنک‌کاری تبریدی باعث بهبود صافی سطح تا ۹۵ درصد می‌شود.

۴-۳. اثر خنک‌کاری تبریدی بر حرارت تولیدشده در برش

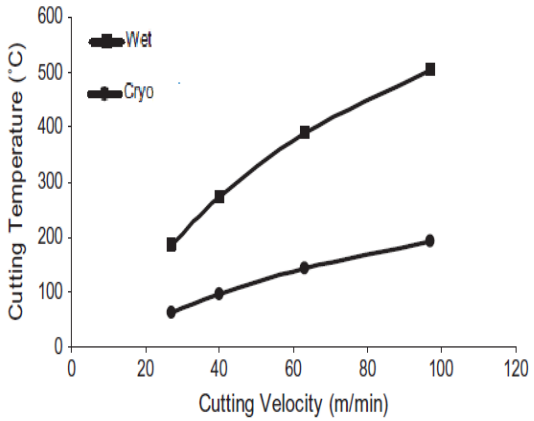
در حین ماشینکاری، حرارت در ناحیهٔ اولیه و ثانویهٔ تغییر شکل به‌وجود می‌آید. ماکزیمم دما معمولاً در سطح تماس ابزار و براده ایجاد می‌شود. حرارت ایجادشده در ناحیهٔ برش ناشی از تغییر شکل پلاستیک مواد هنگام تشکیل براده و



شکل ۸ مقایسهٔ زبری سطح در ماشینکاری تبریدی و خشک در عمق‌های برش مختلف [۱۸]

۴-۴. اثر خنک‌کاری تبریدی بر سایش و عمر ابزار

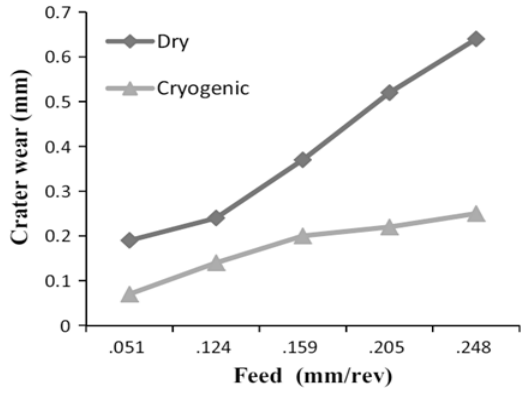
سائیدگی در ابزار باعث کندشدن ابزار و کاهش کیفیت براده‌برداری می‌شود. از معیارهای عمر ابزار می‌توان به ارتفاع آستانهٔ فرسایش و عمق گودال فرسایش اشاره کرد. نیتروژن مایع به‌طور مؤثر به سطح آزاد و سطح براده ابزار اعمال می‌شود و باعث کاهش اصطکاک و دمای برش در سطح تماس بین براده و ابزار و بین قطعه‌کار و ابزار می‌گردد. ارتفاع آستانهٔ فرسایش و عمق گودال فرسایش از طریق کنترل سازوکار سایش وابسته به دما کاهش پیدا اصطکاک است. میزان حرارت تولیدشده به خواص فیزیکی و شیمیایی جنس ابزار و قطعه‌کار، سرعت و عمق برش، نرخ پیشروی، مایع خنک‌کننده و هندسهٔ ابزار بستگی دارد. نیتروژن مایع به‌علت قدرت خنک‌کنندگی بسیار زیاد، به‌طور مؤثر بر مناطق تولید حرارت اثر گذاشته و باعث کاهش میزان حرارت می‌شود. دهانانچزین و کومار به بررسی تغییرات دمای برش با ابزاری از جنس تنگستن کارباید، در تراشکاری Ti6Al4V تحت تأثیر خنک‌کاری معمولی و تبریدی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که خنک‌کاری تبریدی باعث کاهش دمای برش تا ۶۰ درصد نسبت به خنک‌کاری معمولی می‌شود. این موضوع در شکل ۹ نشان داده شده است [۱۰].



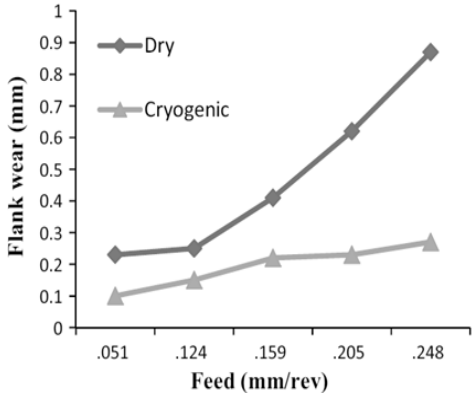
شکل ۹. مقایسه دمای برش در خنک‌کاری تبریدی و خنک‌کاری معمولی [۱۰]

می‌کنند. در فرایند خنک‌کاری تبریدی به‌علت دمای پایین، سایش ابزار کاهش و عمر ابزار افزایش می‌یابد. لی و همکاران در سال ۲۰۱۵ م از نیتروژن مایع به‌عنوان خنک‌کننده، به‌منظور بررسی میزان تأثیر آن بر سایش ابزار در فرزکاری Ti6Al4V استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که خنک‌کاری تبریدی باعث افزایش عمر ابزار به اندازهٔ ۵۰ تا ۹۰ درصد می‌شود [۱۹]. گوپتا و همکاران در سال ۲۰۱۵ م در تراشکاری فولاد AISI 1040 نتیجه گرفتند که خنک‌کاری تبریدی باعث کاهش ۵۵ درصد

سایش ابزار می‌شود. در شکل ۱۰ عمق گودال فرسایش و در شکل ۱۱ ارتفاع آستانهٔ فرسایش به‌دست آمده از آزمایش‌های گوپتا و همکاران در ماشینکاری تبریدی و خشک با یکدیگر مقایسه شده است [۸].



شکل ۱۰. مقایسهٔ عمق گودال فرسایش در ماشینکاری تبریدی و خشک [۸]



شکل ۱۱. مقایسهٔ ارتفاع آستانه فرسایش در ماشینکاری تبریدی و خشک [۸]

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، خنک‌کاری تبریدی معرفی و روش‌های رایج استفاده از آن در فرایند برادەبرداری و همچنین تأثیر آن بر بعضی از خروجی‌های مهم ماشینکاری ذکر شده است. خنک‌کاری تبریدی فرایندی است که در آن از نیتروژن مایع به‌عنوان خنک‌کننده استفاده می‌شود. نیتروژن مایع علاوه بر نداشتن عیوب روانکارهای رایج مثل ایجاد مشکلات پوستی، آلودگی محیط زیست و تولید بخارهای سمی، دارای قدرت خنک‌کنندگی بسیار بالایی است. در خنک‌کاری تبریدی، به‌علت تغییر خواص مواد در دمای پایین، چسبندگی بین سطوح کاهش یافته و اصطکاک کم می‌شود و به‌علت حفظ سختی ابزار در دمای پایین، ارتفاع آستانهٔ فرسایش کاهش می‌یابد. کاهش دما و اصطکاک باعث پایین‌آمدن سایش ابزار و افزایش عمر آن می‌گردد. خنک‌کاری تبریدی یکی از روش‌های مناسب خنک‌کاری با توجه به توانایی قابل ملاحظهٔ آن در افزایش عمر ابزار و بهبود کیفیت سطح قطعه‌کار از طریق کاهش سایش ابزار است. از معایب این روش می‌توان به هزینه‌بر بودن تجهیزات، ایجاد سوختگی سرد در صورت تماس قسمتی از بدن با نیتروژن مایع و نیاز به پوشش مناسب برای اپراتور اشاره کرد.

٦. مآخذ

[1] Yildiz, Y., M. Nalbant. "A review of cryogenic cooling in machining processes." *Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 2008, pp. 947-964.

[۲] راز فر، محمدرضا. *اصول ماشینکاری و ابزارشناسی*، امیرکبیر، ۱۳۸۹.

[3] Debnath, S., M. Reddy, Q. Yi. "Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining a review." *Journal of Cleaner Production*, 83, 2014, pp. 33-47.

[4] Wang, Y., P. Rajurkar, G. Rajurkar. "Cryogenic Machining of Tantalum." *Journal of Manufacturing Processes*, 4(2), 2002, pp.122-127.

[5] Choudhury, S. K., K. V. B. S. Kalyan. "Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments." *Journal of materials processing technology*, 203, 2008, pp. 98-101.

[6] Kumar, M. P., G. Manimaran. "Effect of cryogenic cooling on grinding performance of AISI 316 stainless steel." *archives of civil and mechanical engineering*, 13, 2013, pp. 304-312.

[7] Nandam, R., A. Ravikiran, R. Anand. "Machining of Tungsten Heavy Alloy under Cryogenic Environment." *Procedia Materials Science*, 6, 2014, pp. 296–303.

[8] Gupta, M. K., G. Singh, P. K. Sood. "Experimental Investigation of Machining AISI 1040 Medium Carbon Steel Under Cryogenic Machining: A Comparison with Dry Machining*." J. Inst. Eng.*, 96, 2015, pp. 373–379.

[9] Rahman, M., A. S. Kumar, M. U. Salam. "Evaluation of minimal quantities of lubricant in end milling." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18, 2001, pp. 235–240.

[10] Dhananchezian, M., M. P. Kumar. "Cryogenic turning of the Ti–6Al–4V alloy with modified cutting tool inserts." *Cryogenic*, 51, 2011, pp. 34-40.

[11] Bhattacharyya, D., M. N. Allen, S. J. Mander. "Cryogenic machining of Kevlar composites." *Materials and Manufacturing Processes*, 8, 1993, pp. 631–651.

[12] Hong, S. Y., Y. Ding, R. G. Ekkens. "Improving low carbon steel chip breakability by cryogenic chip cooling." *International Journal of Machine Tools and Manufactur*, 3, 1999, pp. 1065–1085.

[13] Wang, Z. Y., K. P. Rajurkar, M. Murugappan. "Cryogenic PCBN turning of ceramic." *Wear*, 195, 1996, pp. 1– 6.

[14] Ahmed, M. I., A. F. Ismail, Y. A. Abakr, A. K. M. N. Amin. "Effectiveness of cryogenic machining with modified tool holder." *Journal of Materials Processing Technology*, 185, 2007, pp. 91–96.

[15] Bermingham, M. J., J. Kirsch, S. Sun. "New observations on tool life, cutting forces and chip morphology in cryogenic machining Ti-6Al-4V." *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 51, 2011, pp. 500–511.

[16] Jun, C. "Lubrication effect of liquid nitrogen in cryogenic machining friction on the tool-chip interface." *Journal of Machanical science and Technology*, 4, 2005, pp. 936-946.

[17] Silva, M. B., J. Wallbank. "Cutting temperature: prediction and measurement methods-a review." *Journal of Materials Processing Technology*, 88, 1999, pp. 195-202.

[18] Manimaran, G., M. P. kumar, R.Venkatasamy. "Influence of cryogenic cooling on surface grinding stainless steel 316." *cryogenic*, 59, 2014, pp. 76-83.

[19] Lee, I., B. Vivek, M. Sudong. "Tool life improvement in cryogenic cooled milling of the preheated Ti–6Al–4V." *Int J Adv Manuf Technol*, 79, 2015, pp. 665–673.