ویژگی‌ها و چالش‌های ماشینکاری مواد سخت

محمدمهدی ابوترابی[1]، داریوش بهارلویی[2]

۱ استادیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، abootorabi@yazd.ac.ir

۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۱۷

چکیده

اصطلاحاً به کلیهٔ فرایندهای ماشینکاری که روی موادی با سختی بیشتر از HRC ۴۵ انجام می‌شود، ماشینکاری مواد سخت یا سخت‌تراشی گفته می‌شود. با پیشرفت صنعت خودروسازی و صنایع هوافضا، نیاز به استفاده از قطعات پیچیده با ویژگی‌های خاص نیز ایجاد شد؛ این امر مستلزم پیشرفت فرایندهای شکل‌دهی مواد برای تولید اقتصادی این قطعات است. در گذشته برای ماشینکاری مواد سخت مانند سوپرآلیاژها از فرایندهایی چون ماشینکاری تخلیهٔ الکتریکی[1]، که در آن ابزار با قطعه‌کار به‌طور مستقیم در تماس نیست، استفاده می‌شد، اما با پیشرفت ماشین‌ابزارها و ابزارهای برش ماشینکاری مستقیم این مواد ممکن شد. به‌دلیل وجود نیروهای برشی و دمای بالا، در این نوع ماشینکاری ابزار برشی باید دارای مقاومت سایشی، استحکام، چقرمگی و پایداری حرارتی بالا در دماهای زیاد باشد. به‌دلیل وجود نیرو و دمای بسیار زیاد، انتخاب پارامترهای ماشینکاری یکی از فاکتورهای بسیار مهم در سخت‌تراشی است و هرگونه خطا در انتخاب این پارامترها سبب بروز آسیب‌های جدی در ابزار برش و حتی ماشین‌ابزار می‌شود. فرزکاری، تراشکاری، رزوه‌تراشی، برقوزنی و سایر فرایندهای ماشینکاری بر روی مواد سخت، زیرمجموعهٔ عملیات سخت‌تراشی هستند.

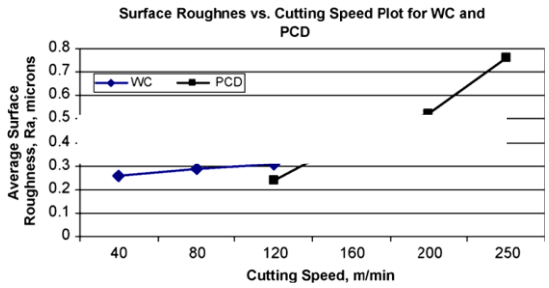
واژگان کلیدی: سخت‌تراشی، ابزار برشی، ابزار وایپر، پوشش ابزار

۱. مقدمه

ماشینکاری سخت به فرایند جداسازی براده از قطعات با سختی بالای HRC ۴۵ توسط ابزارهای برشی گفته می‌شود که معمولاً محدودهٔ سختی این مواد بین ۵۸ تا HRC ۶۸ است [۱]. در حال حاضر، از عملیات سخت تراشی برای پیش‌پرداخت یا پرداخت نهایی با دقتی مشابه عملیات سنگ‌زنی استفاده می‌شود. در بین فرایندهای ماشینکاری مواد سخت، عملیات تراشکاری این‌گونه مواد بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته و جایگزین مناسبی برای سنگ‌زنی قطعات شده است. این قطعات سخت معمولاً از جنس سوپرآلیاژها، فولادها (فولادهای یاتاقان، فولادهایی که روی آنها کار سرد یا گرم انجام شده، فولادهای تندبر و جز این‌ها)، چدن‌های سخت‌کاری شده، کاربایدها و کامپوزیت‌های فلزی و سرامیکی هستند [۱]. مواد سخت دارای استحکام خوب در دمای بالا، مقاومت بالا در برابر خستگی، خزش و سایش هستند و به‌همین دلیل جایگاه ویژه‌ای در صنایع

پیدا کرده‌اند. امروزه از این مواد در ساخت تجهیزاتی چون قطعات موتور موشک، هواپیما و انواع توربین‌ها، تجهیزات ماشین‌های شکل‌دهی مواد مانند انواع قالب‌ها و تجهیزات صنایع پتروشیمی استفاده می‌شود [۲]. از خواص ویژهٔ سوپرآلیاژها می‌توان به حفظ استحکام در دماهای بالا، کارسختی سریع در حین ماشینکاری، وجود ذرات ساینده کاربیدی در ریزساختار، هدایت حرارتی پایین و تمایل براده به جوش خوردن روی لبهٔ ابزار و تشکیل لبهٔ انباشته اشاره کرد [۳]. خواص ویژهٔ این مواد، عملیات ماشینکاری آنها را با چالش‌های جدیدی روبرو کرده و پیشرفت هرچه بیشتر در زمینهٔ ماشین‌های ابزار و ابزارهای برشی را به‌دنبال داشته است. یکی از اهداف ماشینکاری، رسیدن به سلامت و صافی سطح بالاست؛ در این زمینه تحقیقات بسیاری نیز انجام شده است. اگر مایع روانکار به‌طور مناسب استفاده شود، سبب بهبود صافی سطح، افزایش عمر ابزار و دقت ابعادی می‌شود [۴]. در دو دههٔ گذشته استفاده از روش روانکاری کمینه[۲] برای بهبود شرایط ماشینکاری مطالعه شده است [۵]. در این روش، روغن طبیعی گیاهی یا ترکیب شیمیایی تجزیه‌پذیر به‌وسیلهٔ هوای فشرده به لبهٔ برندهٔ ابزار پاشیده می‌شود. مقدار روانکار استفاده‌شده در این روش بین ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌لیتر بر ساعت است که بسیار کمتر از مقدار روانکار استفاده‌شده در روش‌های معمول است. یزید و همکاران (۲۰۱۱) سلامت سطح آلیاژ اینکونل ۷۱۸ سخت‌تراشی شده، توسط ابزار کاربایدی با روکش PVD [۳] را بررسی کرده‌اند [۶]. در این پژوهش، سخت‌تراشی به دو روش خشک و روانکاری کمینه انجام و تأثیر مثبت استفاده از روش روانکاری کمینه بر صافی سطح قطعه کار اثبات شد.

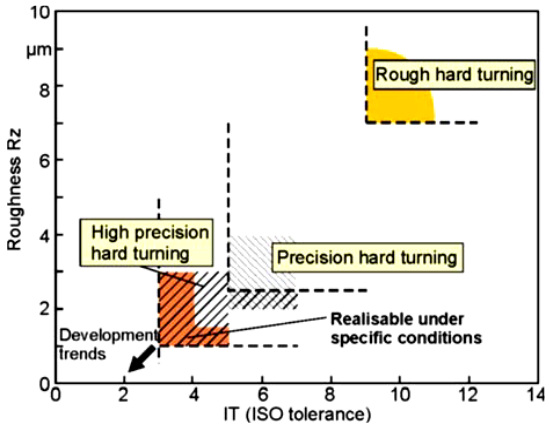
از دیگر پارامترهای مهم در ماشینکاری مواد سخت، انتخاب ابزار مناسب است. انتخاب درست ابزار سبب بالارفتن کیفیت قطعه و عمر ابزار می‌شود. نورالامین و همکاران (۲۰۰۷) مطالعات خود را روی ماشینکاری آلیاژ Ti6Al4V توسط ابزار تنگستن کارباید بدون پوشش[۴] و الماس چندکریستالی[۵] انجام دادند [۷]. آنها تأثیر استفاده از این دو ابزار را بر عوامل مختلفی چون ارتعاش ایجادشده در ماشین‌ابزار، نوع برادهٔ ایجادشده، زبری سطح و سایش ابزار بررسی کردند. شکل ۱ صافی سطح قطعهٔ سخت‌تراشی شده را در سرعت‌های مختلف، توسط دو ابزار تنگستن کارباید و الماس چندکریستالی نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مطالعهٔ آنها در مجموع نشان داد که برای رسیدن به بیشترین نرخ برداشت براده در ماشینکاری آلیاژ Ti6Al4V، ابزار تنگستن کارباید بدون پوشش برای سرعت ۴۰ تا ۸۰ متر بر دقیقه و ابزار الماس چندکریستالی برای سرعت ۱۲۰ تا ۱۶۰ متر بر دقیقه مناسب است.



شکل ۱. نمودار زبری سطح در سرعت‌های برشی مختلف برای ابزار تنگستن کارباید بدون پوشش و الماس چندکریستالی [۷]

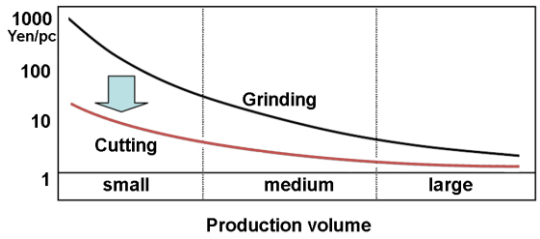
۲. تراشکاری مواد سخت

ماشینکاری مواد سخت نیازمند ابزار خاص با خاصیت ضد سایش زیاد و حفظ سختی در دماهای بالاست. در سخت‌تراشی، از ابزارهای نیترید سیلیکون، کاربایدهای زینترشده، سرمت‌ها، الماس‌های چندکریستالی، سرامیک‌ها و CBNها استفاده می‌شود. ابزار CBN با سختی فوق‌العاده در دمای بالا، استحکام فشاری و چقرمگی بالا، از ابزارهای پرکاربرد و محبوب در ماشینکاری مواد سخت است. فرایند تراشکاری مواد سخت براساس استاندارد ایـزو، مطابق شکل ۲، به سه دستهٔ سخت‌تراشی خشن، سخت‌تراشی دقیق و سخت‌تراشی خیلی دقیق تقسیم‌بندی می‌شود. با کنترل شرایط برشی می‌توان به زبری سطح کمتر از ۱ میکرومتر رسید [۸].



شکل ۲. زبری سطح در تراشکاری مواد سخت [۷]

فرایند تراشکاری مواد سخت اغلب در سرعت بالا و پیشروی و عمق برش کم برای عملیات پیش‌پرداخت و پرداخت نهایی استفاده می‌شود. سرعت برشی گزارش‌شده در عملیات سخت‌تراشی بین ۱۰۰ تا ۲۵۰ متر بر دقیقه، نرخ پیشروی بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ میلی‌متر بر دور و عمق برش کمتر از ۰/۲ میلی‌متر است. در عملیات سخت‌تراشی می‌توان به صافی سطح متوسط ۰/۴ تا ۰/۸ میکرومتر و تولرانس گردی ۲ تا ۳ میکرومتر دست یافت [۱]. با توجه به این مشخصات، فرایند سخت‌تراشی را با عملیات سنگ‌زنی مقایسه می‌کنند. در شکل ۳، هزینه نسبت به حجم تولید در فرایندهای سخت‌تراشی و سنگ‌زنی با هم مقایسه شده است. در حجم‌های مختلف تولید، هزینهٔ فرایند سخت‌تراشی کمتر از سنگ‌زنی است.



شکل ۳. نسبت هزینه به حجم تولید
در فرایندهای سنگ‌زنی و سخت‌تراشی [۱]

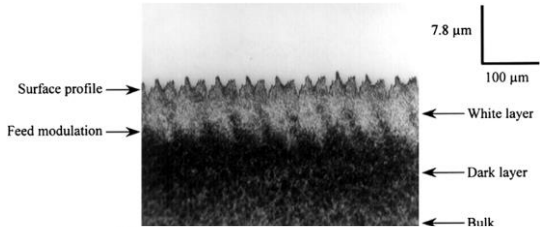
اگرچه فرایند تراشکاری مواد سخت بسیار مورد توجه است، اما دارای محدودیت‌هایی است که مهم‌ترین آنها عبارت است از:

۱. تشکیل لایهٔ سفید روی سطح قطعه‌کار که در شکل ۴ به وضوح در سخت‌تراشی فولاد AISI 52100 قابل مشاهده است.

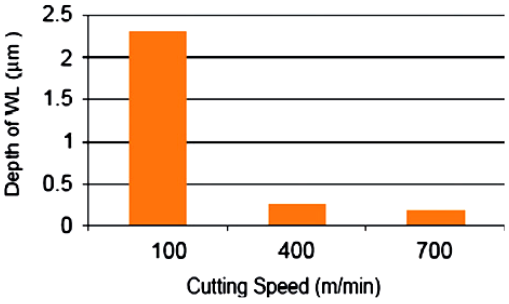
۲. وجود تنش‌های پسماند کششی در قطعه که با ضخامت لایهٔ سفید رابطهٔ مستقیم دارد.

۳. بروز خطاهای ابعادی - هندسی و زبری سطح که در اثر سایش ابزار ایجاد می‌شود.

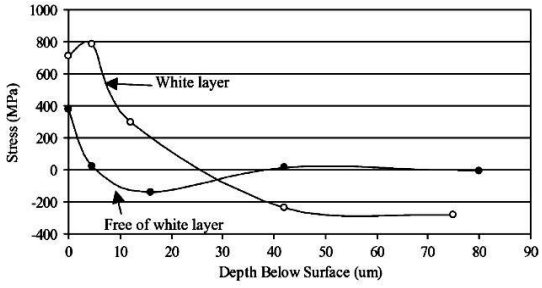
لایهٔ سفید یک لایهٔ خارجی بسیار نازک روی سطح قطعه‌کار و سخت‌تر از لایه‌های زیرین قطعه‌کار است. سرعت برشی روی عمق لایهٔ سفید اثرگذار است. به این صورت که با افزایش سرعت برشی، عمق این لایه کاهش می‌یابد (شکل ۵). وقتی حرارت منتقل‌شده به قطعه زیاد شود، لایهٔ سفید روی سطح تازه ماشینکاری‌شدهٔ قطعه‌کار تشکیل می‌شود. لایهٔ سفید در فشار و حرارت زیاد می‌تواند باعث ورقه‌ورقه شدن و در نهایت شکست قطعه گردد [۱۰]. همچنین، تشکیل این لایه سبب افزایش تنش پسماند در قطعه‌کار می‌شود (شکل ۶).



شکل ۴. لایهٔ سفید روی سطح سخت‌تراشی‌شدهٔ فولاد AISI 52100



شکل ۵. تأثیر سرعت برشی بر عمق لایهٔ سفید [۱۱]



شکل ۶. تأثیر لایهٔ سفید بر تنش پسماند سطح به‌سمت داخل آن [۱۲]

۳. ابزار برشی در سخت‌تراشی

در فرایند سخت‌تراشی به‌دلیل وجود نیروهای برشی و دمای بسیار بالا در منطقهٔ برش، انتخاب مناسب ابزار برشی از اهمیت زیادی برخوردار است. مقاومت به سایش و خوردگی و عمر بالای ابزار از مهمترین پارامترهای مؤثر در کاهش هزینهٔ تولید است. ابزار برشی باید از مقاومت به سایش بالا، به‌خصوص در دما و فشار زیاد، برخوردار باشد. عمر ابزار برشی متأثر از فاکتورهایی چون جنس، هندسه، میکروساختار و نوع پوشش ابزار است؛ برای دستیابی به تولید انبوه و اقتصادی باید تمامی این فاکتورها مورد توجه باشند [۱۳]. پوشش‌دهی ابزار تأثیر

زیادی بر عمل برش دارد و نقش مهمی در افزایش عمر ابزار ایفا می‌کند. بنگا و همکاران (۲۰۰۹) تأثیر انواع پوشش بر عمر ابزار در فرایند سخت‌تراشی را بررسی کرده و دریافتند که بدون در نظر گرفتن هندسهٔ ابزار، عمر ابزار برشی محافظت‌شده با روکش TiAlN تا ۱/۳۵ برابر نسبت به ابزار بدون پوشش افزایش پیدا می‌کند [۱۴]. پوشش روی ابزار سبب افزایش سختی سطح ابزار، کاهش ضریب اصطکاک و محافظت لبهٔ برشی در برابر دمای بالای ماشینکاری می‌شود. تأثیر انواع پوشش ابزار بر رفتار سایشی در مطالعات کالیشکان و همکاران (۲۰۱۳) بررسی شده است [۱۵]. آنها بیان کردند که انتخاب نوع پوشش مهم است، اما نباید تأثیر انتخاب روش پوشش‌دهی و همچنین میکروساختار لبهٔ برش اصلی قبل و بعد از پوشش‌دهی را نادیده گرفت.

دنکنا و همکاران (۲۰۱۴) پوشش‌دهی ابزارهای کاربایدی در ماشینکاری مواد سخت را بررسی کردند و دریافتند که ترکیب جنس ابزار با نوع پوشش، مهمترین عامل در ایجاد سایش ابزار است [۱۶]. در حین ماشینکاری مواد سخت، استفاده از شرایط برشی مناسب مهم است. شرایط برشی باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که بتوان از نهایت ظرفیت ابزار برشی استفاده کرد. بهره‌برداری از نهایت ظرفیت ابزار برشی به‌معنای بیشترین مقدار عمق برش و پیشروی در عملیات برش با حفظ خواص مطلوب قطعه‌کار و عمر بهینهٔ ابزار برشی است. شعاع لبهٔ برش متغیر (بخش الف از شکل ۷)، از جهاتی چون کاهش و انتقال حرارت تولیدشده در راستای لبهٔ برشی، ایجاد کرنش پلاستیک کمتر در قطعه‌کار و کاهش سایش ابزار بسیار کارآمد است. شعاع لبهٔ برش بزرگتر سبب ایجاد ارتعاش و پدیدهٔ چتر می‌شود که ثبات و صلبیت بیشتر ماشین‌ابزار را می‌طلبد. افزایش شعاع لبهٔ برش (بخش ب از شکل ۷) سبب کاهش زبری سطح می‌شود و بر نیروی اصلی برش اثر می‌گذارد [۹]. شعاع کوچکتر لبهٔ برش باعث کاهش و لبهٔ پخ‌خورده سبب افزایش نیروی برش می‌شود. ابزارهای کاربایدی و پوشش‌دار مقاومت به سایش بالایی دارند و دمای کمتری ایجاد می‌کنند. در این ابزارها مقدار گودال فرسایش نزدیک به صفر است و فقط آستانهٔ فرسایش به‌وجود می‌آید [۹].

۳-۱. ابزار با هندسهٔ وایپر[۶]

ابزار با هندسهٔ وایپر دارای نوعی لبهٔ برشی با زاویه و شعاع خاص است که برای ماشینکاری فلزات سخت طراحی شده است. در ماشینکاری با ابزار وایپر می‌توان به نرخ برداشت برادهٔ بیشتر و کیفیت سطح بهتر دست یافت. در شعاع وایپر، لبهٔ برندهٔ ابزار متشکل از دو شعاع منحصربه‌فرد است (بهش الف از شکل ۸)، اما لبهٔ برشی در ابزارهای معمولی یک شعاع است (بخش ب از شکل ۸). از مقایسهٔ ابزارهای سرامیکی متداول با ابزار با هندسهٔ وایپر در ماشینکاری فولاد سخت‌کاری‌شدهٔ AISI 5140 نتایج زیر به‌دست آمده است [۹]:

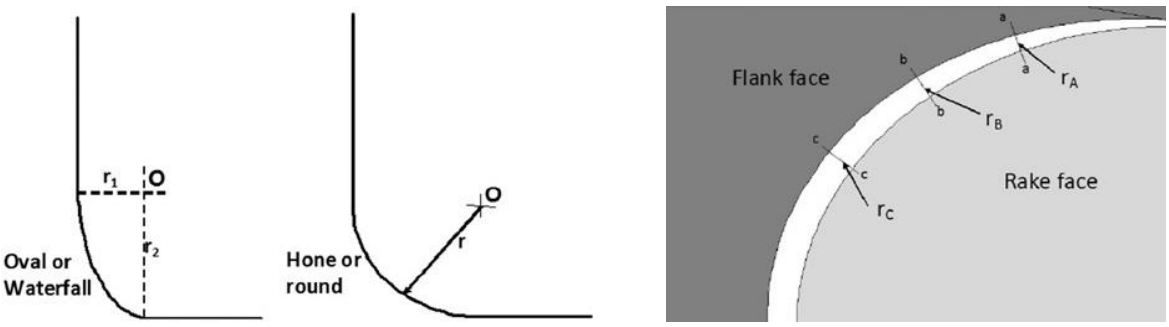
۱. در ماشینکاری به‌وسیلهٔ ابزار با هندسهٔ وایپر، گودال فرسایش در ابزار ایجاد نمی‌شود
۲. در ابزار با هندسهٔ وایپر، سایش در لبهٔ ابزار به‌صورت یک شیار کوچک ایجاد می‌شود
۳. با ابزار با هندسهٔ وایپر می‌توان به صافی و سلامت سطح بهتری نسبت به ابزارهای متداول دست یافت

گودات و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی تأثیر ماشینکاری فولاد AISI 52100 به‌وسیلهٔ ابزار PCBN با هندسهٔ وایپر را بر زبری سطح، سلامت سطح و تنش پسماند بررسی کرده و تأثیر مثبت هندسهٔ وایپر را بر این فاکتورها اثبات کردند [۱۷]. تأثیر پیشروی ابزار بر زبری سطح نهایی قطعه در ابزارهای وایپر بسیار کم است و محدودیت‌ها برای افزایش نرخ برداشت ماده کمتر می‌شود. در ماشینکاری با ابزار وایپر، ضخامت لایهٔ سفید و در نتیجه مقدار تنش پسماند نهایی قطعه‌کار کاهش می‌یابد.

۳-۲. ابزار برشی دورانی

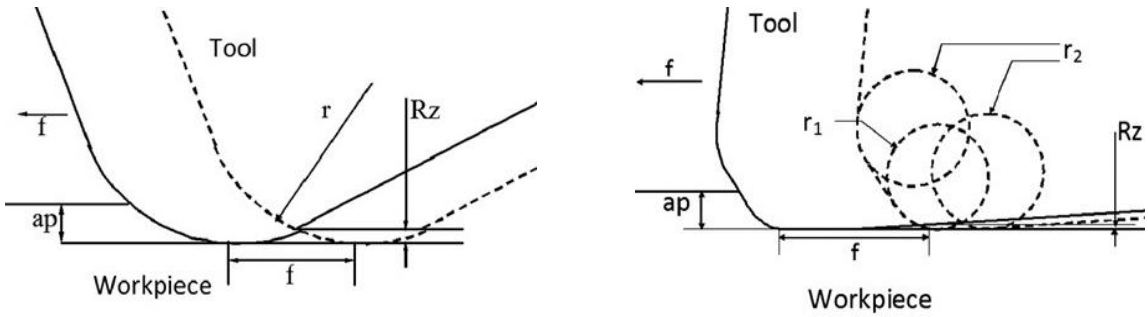
از جمله مشکلات ایجادشده در تراشکاری مواد سخت، که سبب افزایش هزینه و کاهش کیفیت سطح قطعه کار می‌شود، سایش ابزار است. توسعهٔ ابزارهای دورانی سبب افزایش نرخ براده‌برداری و کاهش سایش ابزار شده است. در این ابزارها از اینسرت‌های دایره‌ای استفاده می‌شود (شکل ۹) و همزمان با عمل برش، چرخش اینسرت باعث خنک‌شدن لبهٔ برش در اثر تماس با هوا می‌گردد [۱۸].

کیشاوی و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی سایش ابزار در فرایند سخت‌تراشی به‌وسیلهٔ ابزار دورانی را بررسی کردند [۱۹]. مطالعات آنها نشان‌دهندهٔ افزایش عمر ابزار دورانی در ماشینکاری فولاد سخت‌کاری شدهٔ AISI 4340 در مقایسه با ابزارهای ثابت است (شکل ۱۰). هیچ‌گونه اثری از گودال فرسایش در ابزار دورانی در این تحقیق مشاهده نشده است.



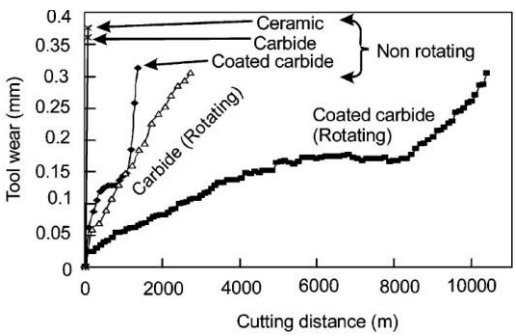
(الف) (ب)

شکل۷. نمایی از الف) ابزار گرد با شعاع لبهٔ برش متغیر[۷]، ب) ابزار با لبهٔ بیضوی و گرد [۹]

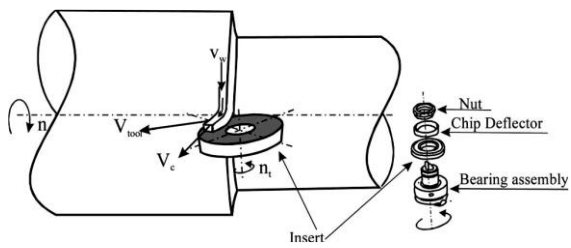


(ب) (الف)

شکل ۸. نمایی از الف) ابزار با هندسهٔ واپر(r_1 و r_2 شعاع منحنی واپر) ب) ابزار با هندسهٔ معمولی [۱۸]



شکل۱۰. مقایسه مقدار سایش ابزارهای دورانی و ثابت در سخت‌تراشی فولاد AISI 4340 [۱۹]



شکل ۹. نمایی شماتیک از ابزار دورانی در حال ماشینکاری [۲۰]

۴. نتیجه‌گیری

استفاده از قطعات با سختی و استحکام بالا در صنایع نظامی، خودروسازی، نیروگاهی و ساخت انواع قالب‌ها، امری ضروری است. در گذشته ساخت این نوع قطعات با روش‌های غیرمستقیم مانند ماشینکاری تخلیهٔ الکتریکی صورت می‌گرفت که با مشکلاتی چون زمان زیاد تولید همراه بود. با پیشرفت ماشین‌ابزارها و ابزارهای برشی، امکان ماشینکاری مواد سخت ایجاد شد. در حال حاضر این جریان به یکی از حوزه‌های اصلی رقابت در زمینهٔ ماشینکاری تبدیل شده و به‌سرعت در حال پیشرفت است. در این مقاله به معرفی سخت‌تراشی، مزایا و معایب آن و برخی تحقیقات منتشرشده در این زمینه پرداخته شده است. سخت‌تراشی با کاهش مراحل تولید، انرژی مصرفی کل، آثار مخرب زیست‌محیطی و حذف محدودیت‌ها نسبت به

فرایند سنگ‌زنی توانسته جایگاه ویژه‌ای بین فرایندهای ماشینکاری به‌دست آورد. هزینه‌هایی که به‌دلیل فرسوده‌شدن ابزار و زمان تعویض ابزار باعث کاهش کاربرد فرایند سخت‌تراشی می‌شد، امروزه با پیشرفت ابزارهای برشی، انواع روش‌های پوشش‌دهی، هندسهٔ وایپر ابزار و ابزارهای جدید با لبهٔ برشی دورانی تا حدودی برطرف شده است. انتخاب پارامترهای ماشینکاری به‌دلیل وجود نیروهای برشی و حرارت تولیدشده زیاد از اهمیت خاصی برخوردار است. انتخاب نامناسب پارامترهای فرایند، ممکن است باعث بروز عواقب جدی مثل آسیب‌دیدن ابزار، قطعه‌کار و حتی ماشین‌ابزار شود.

۵. مآخذ

[1] Zębala, W., J. Siwiec. “Hard Turning of Cold Work Tool Steel with CBN Tools.” *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 36(4), 2012, pp. 19-32.

[2] Thakur, D. G., B. Ramamoorthy, L. Vijayaraghavan. “Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning.” *Materials and Design*, 30, 2009, pp. 1718-1725.

[3] Durul, U., O. Tugrul. “Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review.” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 51, 2011, pp. 250-280.

[4] Ezugwu, E. O., J. Bonney, Y. Yamane. “An overview of the machinability of aeroengine alloys.” *Journal of Materials Processing Technology*, 134, 2003, pp. 233-253.

[5] Kamata, Y., T. Obikawa. “High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools.” *Journal of Materials Processing Technology*, 192–193, 2007, pp. 281-286.

[6] Yazid, M. Z. A., G. A. Ibrahim, A. Y. Said, C. H. CheHaron, J. A. Ghani. “Surface integrity of Inconel 718 when finish turning with PVD coated carbide tool under MQL.” *Procedia Engineering*, 19, 2011, pp. 396-401.

[7] Nurul, A. K. M., F. Ahmad, M. Ismail, N. Khairusshima. “Effectiveness of uncoated WC-Co and PCD inserts in end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V.” *Journal of Materials Processing Technology*, 192–193, 2007, pp. 147-158.

[8] Byrne, G., D. Dornfeld, B. Denkena. “Advancing Cutting Technology.” *Manufacturing Technology*, 2003, pp. 483-695.

[9] Bartarya, G., S. K. Choudhury, “State of the art in hard turning.” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 53, 2012, pp. 1-14.

[10] Chou, Y. K., J. Chris. “White layers and thermal modeling of hard turned surfaces.” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39, 1999, pp. 1863-1881.

[11] Bosheh, S. S., P. T. Mativenga. “White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling.” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 2006, pp. 225-233.

[12] Schwach, D. W., Y. B. Guo. “Feasibility of producing optimal surface integrity by process design in hard turning.” *Materials Science and Engineering*, 395, 2005, pp. 116-123.

[13] Baksa, T., T. Kroupa, P. Hanzl, M. Zetek. “Durability of Cutting Tools during Machining of Very Hard and Solid Materials.” *Procedia Engineering*, 100, 2015, pp. 1414-1423

[14] Benga. G., I. Ciupitu. “Influence of coating and tool geometry on the tool life.” *Chapter 91 in DAAAM International Scientific Book*, 2009, pp. 931-938.

[15] Çalişkan, H., C. Kurbanoglu, P. Panjan, M. Cekada, D. Kramar. “Wear behavior and cutting performance of nanostructured hard coatings on cemented carbide cutting tools in hard milling.” *Tribology International*, 62, 2013, pp. 215-222.

[16] Denkena, B., J. Köhler, B. Breidenstein, A. M. Abrao, C. E. H. Ventura. “Influence of the cutting edge preparation method on characteristics and performance of PVD coated carbide inserts in hard turning.” *Surface & Coatings Technology*, 254, 2014, pp. 447-454.

[17] Guddat, J., R. M'Saoubi, P. Alm, D. Meyer. "Hard turning of AISI 52100 using PCBN wiper geometry inserts and the resulting surface integrity." *Procedia Engineering*, 19, 2011, pp. 118-124.

[18] Grzesik, W. "Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools Wear." *Wear*, 265, 2008, pp. 327-335.

[19] Kossakowska, J., K. Jemielniak. "Application of Self-Propelled Rotary Tools for turning of difficult-tomachine materials." *Procedia CIRP 1*, 2012, pp. 425-430.

[20] Kishawy. H. A., J. Wilcox. "Tool wear and chip formation during hard turning with selfpropelledrotary tools." *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 2003, pp. 433-439.

پی‌نوشت

1. electrical discharge machining (EDM)
2. MQL
3. physical vapor deposition (PVD)
4. WC-Co
5. polycrystalline diamond (PCD)
6. wiper
7. variable hone radius

آدرس : خیابان حافظ ، روبروی دانشگاه صنعتی امیر کبیر ، کوچه آرژانتین ، پلاک ۲
فکس :۸۸۸۰۷۰۰۸ تلفن : ۸۸۸۹۲۱۴۴ ، ۸۸۸۹۵۹۶۹