http://mjmec.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

تیر ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ٤ ص ۱-۱۲

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۱/۱۰/۱٤
تاریخ پذیرش ۹۱/۱۱/۲۲
ارائه در سایت ۹۲/۲/۳۰

بررسی تأثیر روش روانکاری کمینه بر عملکرد سنگزنی فولاد تندبر[1]

فرشاد ربیعی[1]، عبدالرضا رحیمی[2*]، محمدجعفر حداد[3]، مرتضی اشرفی‌جو[4]

۱ و ۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
۲- استادیار گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
۳- دانشجوی فوق دکترا، مرکز تحقیقات سنگزنی و فوق‌پرداخت، دانشگاه فورت وانگن، شونینگن، آلمان
* تهران، صندوق پستی ۴۴۱۳- ۱۵۸۷۵، rahimi@aut.ac.ir

چکیده- در فرایند سنگزنی از سیال‌های برشی به منظور روانکاری، خنک‌کاری، دفع براده از منطقه تماس بین چرخ‌سنگ و قطعه‌کار و نیز تمیز کردن چرخ‌سنگ استفاده می‌شود. این سیال‌های برشی با وجود مزایای متعدد، مسائل زیست‌محیطی و اقتصادی فراوانی ایجاد می‌کنند. از طرفی عدم استفاده از سیال برشی در سنگزنی خشک، عموماً با آسیب‌های حرارتی و کاهش کیفیت سطح همراه است. روش روانکاری کمینه یکی از راه‌حل‌های ارائه شده در زمینه حذف و یا کاهش سیال برشی است که به دلیل نفوذ مؤثر در منطقه تماسی، منجر به بهبود عملکرد فرایند می‌شود. در این تحقیق برای بررسی اثر روانکاری کمینه بر فرایند سنگزنی فولاد، ماشین‌کاری دو نوع فولاد تندبرخام و عملیات حرارتی شده (سخت) مورد بررسی قرار گرفته است. عملکرد فرایند شامل نیروی مماسی، ضریب اصطکاک، زبری سطح، مورفولوژی سطح و شکل براده در سه حالت سنگزنی خشک، پاشش پیوسته سیال برشی و روانکاری کمینه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که روش روانکاری کمینه در فولاد تندبر سخت، در مقایسه با روش‌های دیگر به صورت چشمگیری منجر به بهبود کیفیت سطح و نیز کاهش نیروی مماسی و ضریب اصطکاک می‌شود، در صورتی که در مورد فولاد تندبر خام، با وجود کاهش نیروی مماسی و ضریب اصطکاک، کیفیت سطح نامطلوبی ایجاد می‌شود.

کلیدواژگان: سنگزنی، روانکاری کمینه، نیروی سنگزنی، کیفیت سطح.

Investigation of the effect of minimum quantity lubrication technique on performance of the grinding of HSS

F. Rabiei[1], A.R. Rahimi[2*], M.J. Hadad[3], M. Ashrafijou[4]

1,4- MSc. Student, Mech. Eng., Amirkabir Univ., Tehran, Iran.
2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Amirkabir Univ., Tehran, Iran.
3-Postdoctoral Researcher, Institute of Grinding and Precision Technology (KSF), Furtwangen Univ., VS-Schwenningen, Germany
* P. O. B. 15875-4413, Tehran, Iran. rahimi@aut.ac.ir

Abstract- In grinding operation, cutting fluid is utilized for lubrication, cooling, chip removal from contact zone and also cleaning of grinding wheel. Despite these advantages, grinding fluids make many economic and environmental issues. On the other hand, dry grinding generally leading to thermal damages and reduction of surface quality level. Minimum Quantity Lubrication (MQL) technique is a new approach to elimination or reduction of cutting fluids that improves grinding performance by efficient penetration to the cutting zone. In this paper, in order to investigate the effect of MQL on grinding of steels, raw and hardened High Speed Steel has been selected. Grinding performance such as tangential grinding force, friction coefficient, roughness and morphology of the ground surface and chip form in three states of dry, conventional fluid and MQL have been studied and compared. The results show that MQL technique in comparison with the others lead to improvement of surface quality and also reduction of tangential grinding force and friction coefficient in hardened steel, but in the case of raw steel despite of reduction of tangential grinding force and friction coefficient, the surface quality is worst.

Keywords: Grinding, Minimum Quantity Lubrication, Grinding force, Surface Quality.

1. High Speed Steel

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

مزایای متعدد سیال‌های برشی در بهبود عملکرد ماشین‌کاری، منجر به روند افزایشی مصرف آنها در فرایندهای مختلف ماشین‌کاری شده است. این سیالات در فرایند سنگزنی به منظور کاهش نیرو و توان مصرفی، کاهش آسیب‌های حرارتی، دور کردن براده‌های تولید شده از منطقه سنگزنی و نیز تمیز کردن چرخ‌سنگ از براده‌ها استفاده می‌شوند [۱-۳].

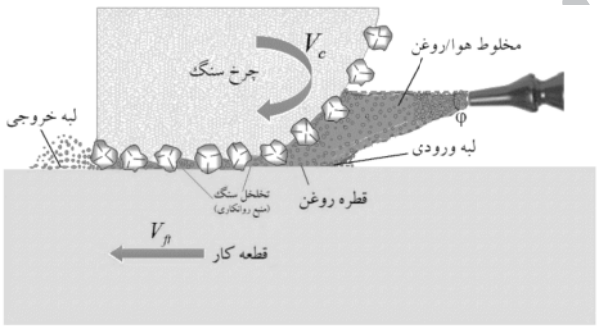
سیال‌های خنک‌کار-روانکار با وجود مزایای فراوان، مسائل زیست محیطی و اقتصادی متعددی را ایجاد می‌کنند. سرعت محیطی بالای چرخ‌سنگ و فشار بالای سیال برشی منجر به تولید مه و ذرات معلق در هوا می‌شود که استنشاق و یا تماس آنها با پوست، بسیار خطرناک بوده و مشکلات متعددی را برای اپراتور ایجاد می‌کند، چون بیشتر سیال‌های برشی از مشتقات نفت هستند. از این رو گزارش شده است که هشتاد درصد بیماری‌های کارگاهی، ناشی از تماس مستقیم اپراتور ماشین‌های ابزار و شکل‌دهی با سیال برشی می‌باشد. این عوامل زیست‌محیطی در کنار مصرف بالای سیال برشی - سالانه ۳۲۰۰۰۰ تن در اروپا- چالشی جدی در استفاده از سیال‌های برشی ایجاد کرده است [۵،۴].

محدودیت دیگر استفاده از سیال‌های برشی مسائل اقتصادی است، به گونه‌ای که هزینه سیال برشی، سیستم پمپ و فیلتر و نیز دفع زباله بیشتر از هزینه ابزار می‌باشد. همچنین گزارش شده است که ۳۰-۱۵ درصد هزینه‌های ماشین‌کاری در صنایع اتومبیل‌سازی مربوط به سیال برشی می‌باشد. از این رو تحقیقات گسترده‌ای در زمینه حذف و یا کاهش سیال‌های برشی در دهه گذشته انجام شده است [۶].

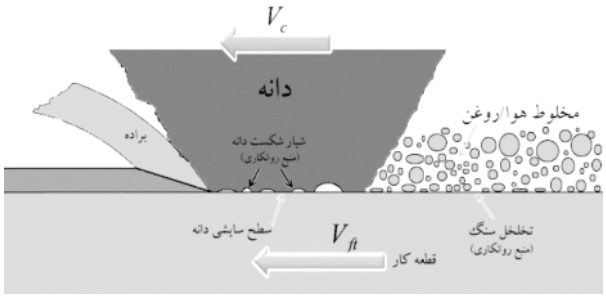
از سوی دیگر در سنگزنی خشک که هیچ‌گونه سیالی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، عدم دفع حرارت تولید شده ناشی از اصطکاک زیاد بین دانه‌های چرخ‌سنگ و سطح قطعه‌کار منجر به آسیب‌های حرارتی متعددی از قبیل سوختن، اکسیداسیون، تشکیل لایه مارتنزیت بازپخت نشده[1] و نیز ایجاد تنش‌های پسماند و ترک در سطح قطعه‌کار می‌شود [۷،۶].

راه‌حل ارائه شده برای کاهش مصرف سیال برشی و نیز کاهش مشکلات مربوط به ماشین‌کاری خشک، روش روانکاری کمینه[2] یا ماشین‌کاری نیمه‌خشک[3] می‌باشد. در این روش مقدار بسیار ناچیزی از روانکار به طرز دقیقی به منطقه تماس بین چرخ‌سنگ و قطعه‌کار هدایت می‌شود و عملکرد فرایند برشی را بهبود می‌بخشد. میزان روانکار مصرفی در این روش (۵۰۰-۵ میلی‌لیتر بر ساعت) حدوداً ۱۰۰۰ مرتبه کمتر از میزان روانکار مصرفی در حالت سیال برشی با پاشش پیوسته است [۸].

در این روش، نازل دارای دو ورودی مجزای روغن و هوا می‌باشد. هوای فشرده در خروجی نازل دارای سرعت زیادی بوده و باعث اسپری کردن روغن می‌شود. بنابراین قطرات کوچک روغن توسط هوای فشرده به صورت مستقیم و با سرعت بالا وارد منطقه تماسی می‌شوند. ذرات اسپری از طریق منابع روغن‌کاری از قبیل تخلخل چرخ‌سنگ و نیز شیارهای مربوط به دانه‌های شکسته شده چرخ‌سنگ به منطقه سنگزنی نفوذ می‌کنند و منجر به ایجاد لایه روانکاری مرزی پایدار در این منطقه می‌شوند. از سوی دیگر تخلخل چرخ‌سنگ با به دام انداختن ذرات اسپری و پمپ کردن آنها به منطقه تماس منجر به خنک‌کاری این منطقه می‌شود [۹] (شکل ۱).



شکل ۱- الف وضعیت اسپری روانکاری کمینه در منطقه سنگ‌زنی [۹]



شکل ۱- ب منابع روانکاری در فصل مشترک سنگ-قطعه‌کار [۹]

1. Untempered Martensitic

2. Minimum Quantity Lubrication (MQL)
3. Semi Dry Machining (SDM)

www.SID.ir

سیلوا و همکاران [۱۱،۱۰] اثر پارامترهای سنگزنی بر عملکرد سنگزنی فولاد ۴۳۴۰ با استفاده از روش روانکاری کمینه را بررسی کردند و دریافتند که روش روانکاری کمینه به دلیل نفوذ مؤثر روانکار به منطقه برشی، منجر به بهبود زبری سطح، کاهش سایش شعاعی چرخ‌سنگ و نیز کاهش تنش پسماند در قطعه‌کار می‌شود [۱۱،۱۰]. توکلی و همکاران [۱۲] تأثیر پارامترهای روانکاری کمینه از قبیل دبی روغن، فشار هوا و نیز موقعیت و فاصله نازل نسبت به چرخ‌سنگ را مورد مطالعه قرار دادند. آنها با معرفی موقعیت نازل به عنوان یک پارامتر مؤثر بر عملکرد روش روانکاری کمینه، دریافتند که قرارگیری نازل تحت زاویه ۲۰-۱۰ درجه نسبت به سطح قطعه‌کار منجر به بهبود قابل ملاحظه عملکرد سنگزنی می‌شود، ضمن این که فاصله نازل از منطقه برش دارای یک مقدار بهینه می‌باشد. آنها همچنین نشان دادند که با افزایش فشار هوای فشرده و دبی روغن، عملکرد سنگزنی بهبود می‌یابد [۱۲].

بارنر نشان داد که استفاده از روغن استر با دبی ۴ میلی‌لیتر بر دقیقه نسبت به روغن معدنی با دبی ۱۱ میلی‌لیتر بر دقیقه در سنگزنی فولاد 16MnCr5 با استفاده از روش روانکاری کمینه، منجر به کاهش ۳۵ درصدی نیروهای قائم و مماسی سنگزنی و نیز افزایش ۵۰ درصدی زبری سطح می‌شود [۱۳].

توکلی و همکاران اثر نوع روانکار و نیز نوع چرخ‌سنگ را بر عملکرد روش روانکاری کمینه در سنگزنی فولاد 100Cr6 سختکاری شده بررسی کردند و دریافتند که چرخ‌سنگهای با تخلخل کم و دانه‌های ریز دارای ضعیف‌ترین عملکرد می‌باشند، در حالی که استفاده از چرخ‌سنگ متخلل CBN منجر به بهبود عملکرد سنگزنی می‌شود. آنها همچنین نشان دادند که در صورت استفاده از چرخ‌سنگ CBN با تخلخل زیاد و دانه‌های درشت، عملکرد سنگزنی وابستگی اندکی به نوع سیال دارد [۱۴].

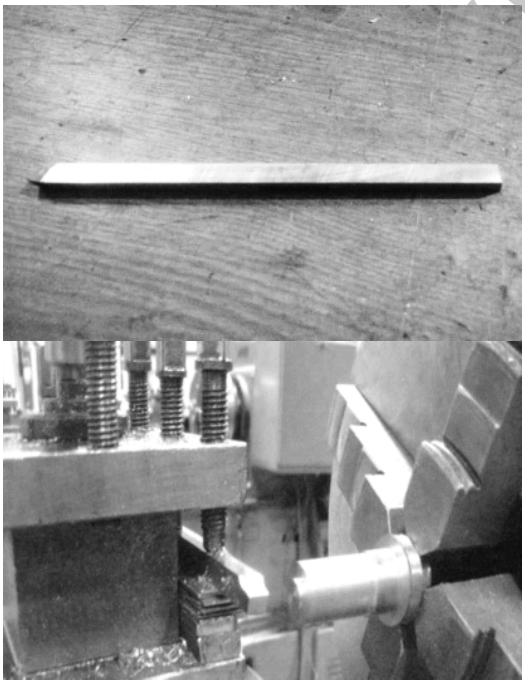
با توجه به تاریخچه ارائه شده، کمبود تحقیقات در زمینه تأثیر جنس و خواص قطعه‌کار بر عملکرد فرایند سنگزنی با استفاده از روش روانکاری کمینه مشهود می‌باشد. از سوی دیگر با توجه به تنوع و گستردگی وسیع فولادها در صنعت، این آلیاژ در بسیاری از کاربردهای صنعتی در طول فرایند ساخت تحت عملیات سنگزنی قرار می‌گیرد. از جمله می‌توان به فولادهای تندبر اشاره کرد. این فولادها کاربرد وسیعی در صنایع ابزارسازی و برشکاری دارند و به منظور ایجاد شکل نهایی و تیز کردن لبه‌های برشی سنگ زده می‌شوند.

از این رو در تحقیق حاضر به منظور بررسی تأثیر روش روانکاری کمینه بر عملکرد سنگزنی فولادهای تندبر و مقایسه این روش با محیط‌های خنک‌کار- روانکار سنتی، تیغچه تراشکاری از جنس فولاد تندبر در دو وضعیت خام (نرم) و عملیات‌حرارتی‌شده (سخت) مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- تجهیزات و شرایط انجام آزمایشات

آزمایش‌ها بر روی دو نمونه خام و عملیات حرارتی شده از تیغچه تراشکاری انجام شده است. این تیغچه که کاربرد وسیعی در کارگاه‌های عمومی دارد در طی مراحل ساخت و تولید و نیز در چرخه عمر خود به دفعات زیادی به منظور ایجاد زوایای ابزار و تیز کردن لبه‌های برشی تحت عملیات سنگزنی قرار می‌گیرند. شکل ۲ تیغچه مورد استفاده در اجرای آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. شرایط کلی اجرای آزمایشات در جدول ۱ ارائه شده است.

چیدمان تجهیزات در هنگام اجرای آزمایش‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

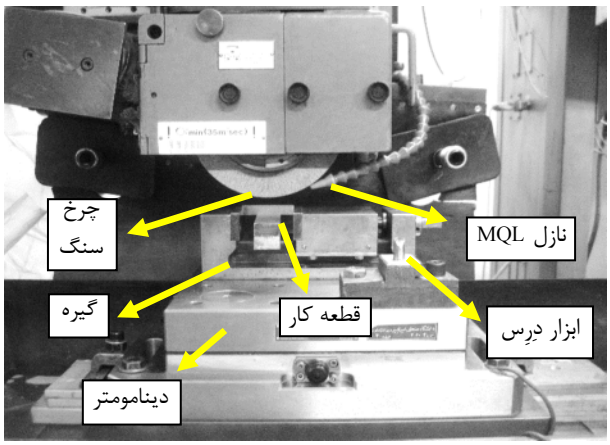


شکل ۲ تیغچه تراشکاری مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها و کاربرد آن

www.SID.ir

جدول ۱ شرایط سنگزنی

نوع سنگزنی	سنگزنی تخت (موافق)
چرخسنگ	چرخسنگ اکسید آلومینیم (89A60K5V217)
جنس قطعات‌کار	۱) فولاد تندبر خام (25HRC) ۲) فولاد تندبر سخت‌کاری شده (63HRC)
ابعاد قطعات‌کار	عرض (۱۰میلیمتر)، طول (۶۰ میلیمتر)
ماشین سنگزنی	دستگاه سنگزنی تخت، شرکت BOHLM آلمان
دستگاه روانکاری کمینه	RSK100، ساخت شرکت رویال صنعت خاوران
دستگاه نیروسنج	مدل ۹۲۵۵۸ ازشرکت KISTLER آلمان،
سرعت چرخسنگ	۳۰ متر بر ثانیه
پیشروی طولی	۳۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه
عمق برش	۵، ۲۰، ۳۵، ۵۰ میکرومتر
تعداد پاس برش	۵ پاس
محیطهای خنک‌کار-روانکار	خشک، سیال برشی با پاشش پیوسته، روانکاری کمینه
روغن روانکاری کمینه	روغن استر (بهران RS 1642)
دبی روغن روانکاری کمینه	۱۲۰ میلی‌لیتر بر ساعت
فشار هوای فشرده	۴ بار
سیال برشی در پاشش پیوسته	روغن حل‌شونده در آب (غلظت ۱۰درصد)
ابزار درِس[1]	الماس تک لبه
تعداد پاس درِس	۳ پاس
عمق کل درِس	۴۵ میکرومتر
سرعت پیشروی‌درِس	۳۰۰ میلیمتر بر دقیقه



شکل ۳ چیدمان تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها

دستگاه روانکاری کمینه مورد استفاده در آزمایش‌های این تحقیق قابلیت تنظیم هوای فشرده و دبی روغن را به صورت مجزا دارا می‌باشد. دبی روغن خروجی از طریق تغییر کورس پمپ پنوماتیکی و تعداد دفعات کورس کامل آن در دقیقه توسط سیستم فرکانس هوایی تعبیه شده در دستگاه تنظیم می‌شود. این روغن توسط شیلنگ هم‌محور با شیلنگ هوای فشرده به نازل هدایت شده و در سر نازل با هوای فشرده مخلوط می‌شود. سرعت بالای هوای فشرده علاوه بر انتقال روغن به منطقه تماس بین چرخسنگ و قطعه‌کار، منجر به اتمیزه شدن ذرات روغن می‌شود. ذرات بسیار ریز روغن، سرعت بالای هوای فشرده و وجود مخازن روغن‌کاری در چرخسنگ، نفوذ مؤثر روانکار به منطقه برش را فراهم می‌کند.

برای ایجاد شرایط یکسان برای انجام آزمایش‌ها، قبل از انجام هر آزمایش چرخسنگ توسط الماس تک‌لبه درِس (تیز) شد. همچنین برای افزایش دقت و قابلیت اطمینان نتایج، هر آزمایش پنج مرتبه تکرار گردید و میانگین نیروهای مماسی و عمودی سنگزنی استخراج شد. زبری سطح قطعات ماشین‌کاری شده تحت شرایط مختلف نیز در پنج نقطه مختلف در جهت عمود بر راستای سنگزنی اندازه‌گیری شده و میانگین آنها به عنوان زبری سطح در نظر گرفته شد.

۳- نتایج آزمایش‌ها و بحث

خواص قطعه‌کار و نیز ضریب اصطکاک اصلی‌ترین عوامل مؤثر در مکانیزم براده‌برداری می‌باشند که منجر به تغییرات شدید در کیفیت سطح قطعه‌کار و نیز نیروهای سنگزنی می‌شوند.

۳-۱- تأثیر ضریب اصطکاک و خواص قطعه‌کار بر کیفیت سطح

شکل ۴ مسیر حرکت لبه برشی در هنگام تماس با سطح قطعه‌کار و نیز مراحل براده‌برداری در فرایند سنگزنی را نشان می‌دهد. هر لبه برشی در طی فرایند براده‌برداری، سه منطقه تغییرشکل الاستیک، تغییر شکل پلاستیک و تشکیل براده، در قطعه‌کار ایجاد می‌کند. در مراحل اولیه تماس، به دلیل هندسه کروی شکل لبه برشی، زاویه بین منحنی حرکت لبه برشی نسبت به سطح قطعه‌کار بسیار اندک می‌باشد، از این رو براده‌ای تشکیل نمی‌شود بلکه انرژی جنبشی لبه برشی صرف جریان مواد به اطراف و تشکیل برآمدگی[2] و نیز جریان مواد به سطح

1. Dress

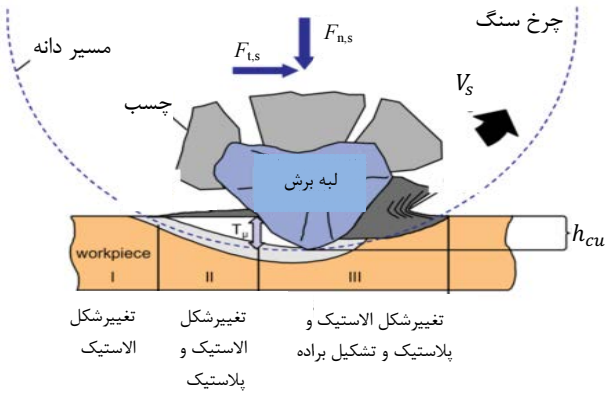
2. Lateral Bulging

Archive of SID
www.SID.ir

پهلوی[1] لبه برشی می‌شود. تشکیل براده فقط در صورتی امکان‌پذیر است که لبه برشی به اندازه کافی در قطعه‌کار نفوذ کند، این مقدار توسط پارامتر عمق برش دانه (T_μ) معرفی می‌شود که متناظر با ضخامت براده h_{cu} می‌باشد (شکل ۴). در ادامه فرایند سنگزنی و در منطقه شماره سه، مکانیزم‌های تغییر شکل و تشکیل براده به صورت همزمان عمل می‌کنند و منجر به تغییر در مقدار h_{cu} می‌شوند، از این رو ضخامت براده در پایان مراحل براده‌برداری به ضخامت براده مؤثر $h_{cu\,eff}$ موسوم است [۱۵]. این پارامتر به صورت مستقیم با زبری سطح در ارتباط می‌باشد بدین صورت که کاهش ضخامت براده مؤثر منجر به کاهش زبری سطح می‌شود.

پارامترهای T_μ و $h_{cu\,eff}$، تابعی از مکانیزم براده‌برداری هستند، از این رو عواملی مانند ضریب اصطکاک و خواص الاستیسیته و پلاستیسیته ماده قطعه کار که در مکانیزم براده‌برداری و مناطق سه‌گانه مؤثر هستند منجر به تغییر در مقادیر T_μ و $h_{cu\,eff}$ و متعاقباً تغییر در عملکرد سنگزنی می‌شوند.

شکل ۵ تأثیر ضریب اصطکاک بر روی مکانیزم براده‌برداری و پارامترهای T_μ و $h_{cu\,eff}$ را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که با افزایش روانکاری و کاهش ضریب اصطکاک مقدار T_μ افزایش می‌یابد. این امر منجر به افزایش منطقه تغییر شکل الاستیک و پلاستیک و نیز تأخیر در تشکیل براده می‌شود که متعاقباً مقدار $h_{cu\,eff}$ را کاهش می‌دهد [۱۵].



شکل ۴ مسیر حرکت لبه برشی و مراحل براده‌برداری در فرایند سنگزنی [۱۵]

1. Flank Surface

علاوه بر ضریب اصطکاک، خواص جریان ماده نیز بر روی مکانیزم براده‌برداری مؤثر هستند، به طور کلی مواد با خاصیت چکش‌خواری بالاتر منجر به کاهش مناطق تغییر شکل و کاهش مقدار T_μ می‌شود [۱۵].

۳-۲- تأثیر ضریب اصطکاک و خواص قطعه‌کار بر نیروهای سنگزنی

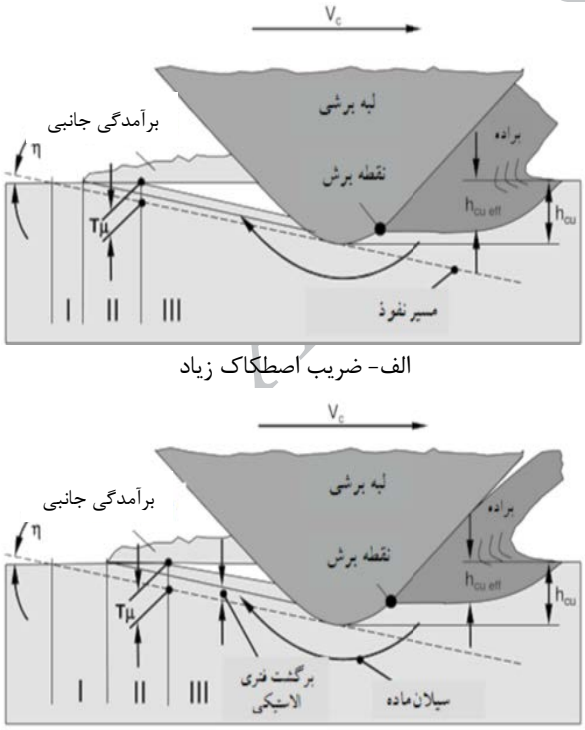
ضریب اصطکاک و خواص قطعه‌کار علاوه بر کیفیت سطح، به صورت چشمگیری بر روی نیروهای سنگزنی نیز مؤثر می‌باشند. نیروی سنگزنی را می‌توان به سه گروه اصطکاکی، برشی و شخم‌زنی تقسیم کرد که هر یک از این نیروها از یک مؤلفه مماسی و یک مؤلفه قائم تشکیل شده‌اند:

$$F = F_{\text{friction}} + F_{\text{cutting}} + F_{\text{plowing}} \quad (۱)$$

$$F_{\text{n}} = F_{\text{fn}} + F_{\text{cn}} + F_{\text{pn}} \quad (۲)$$

$$F_{\text{t}} = F_{\text{ft}} + F_{\text{ct}} + F_{\text{pt}} \quad (۳)$$

در فرایند سنگزنی، نیروی اصطکاک به علت تماس نواحی تخت دانه با قطعه‌کار ایجاد می‌شود که این نواحی تخت ناشی از سایش لبه‌های برشی در طی فرایند سنگزنی می‌باشند.



الف- ضریب اصطکاک زیاد

ب- ضریب اصطکاک کم

شکل ۵ تأثیر ضریب اصطکاک بر مکانیزم براده‌برداری [۱۵]

www.SID.ir

این نیرو تابعی از ضریب اصطکاک (μ)، فشار تماسی متوسط بین چرخ‌سنگ و قطعه‌کار (P)، مساحت سائیده شده نوک دانه (δ)، طول تماس واقعی بین چرخ‌سنگ و قطعه‌کار (l_c) و نیز سختی قطعه‌کار می‌باشد [۱۷،۱۶]:

$$F_{\text{friction}} = f(\mu, P, \delta, l_c, H) \quad (۴)$$

افزایش این نیرو، منجر به افزایش تولید حرارت و آسیب‌های حرارتی، تخریب کیفیت سطح و نیز سایش لبه‌های برشی می‌شود و به شدت عملکرد فرایند سنگزنی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

نیروی برشی منجر به برش و جدایش ماده از قطعه‌کار و تشکیل براده می‌شود. این نیرو تابعی از تنش تسلیم (σ_y)، خواص جریان مواد شامل توان کرنش سختی (n) و ثابت استحکام ماده (K)، قطر مؤثر چرخ‌سنگ (d_e)، پارامترهای سنگزنی شامل سرعت برشی چرخ‌سنگ (v_s)، سرعت پیشروی قطعه‌کار (v_w) و عمق برش (a_p) و نیز ضریب اصطکاک (μ) می‌باشد [۱۷،۱۶]:

$$F_{\text{cutting}} = f(\sigma_y, n, K, d_e, v_s, v_w, a_p, \mu) \quad (۵)$$

سومین مؤلفه نیرو در فرایند سنگزنی، مربوط به پدیده تغییرشکل الاستیک و پلاستیک ماده بدون تشکیل براده می‌باشد. در این پدیده -که به پدیده شخم‌زنی[1] موسوم است- مواد دچار تغییر شکل شده و نسبت به مسیر حرکت ابزار به اطراف رانده می‌شوند. نوع دیگر پدیده شخم‌زنی رانش مواد به سطح پهلوی لبه برشی می‌باشد که با تغییرشکل پلاستیک مواد همراه است. این پدیده نامطلوب در فرایند سنگزنی تابعی از سختی خراشی قطعه‌کار (H_s)، زاویه نوک دانه (α)، قطر دانه (d) و عمق نفوذ دانه (e) می‌باشد [۱۶]:

$$F_{\text{plowing}} = f(H_s, \alpha, d, e) \quad (۶)$$

در میان عوامل متعدد تأثیرگذار بر نیروهای سنگزنی، دو عامل خواص قطعه‌کار و ضریب اصطکاک به دلیل تأثیر مستقیم و غیرمستقیم بر نیروهای سه‌گانه سنگزنی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند.

۳-۳- نتایج آزمایش‌ها

با توجه به مطالب عنوان‌شده در دو بخش گذشته، می‌توان ضریب اصطکاک و خواص قطعه‌کار را مهمترین عوامل مؤثر بر عملکرد سنگزنی دانست که به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر روی کیفیت سطح و نیروهای سنگزنی تأثیر می‌گذارند. از سوی دیگر محیط خنک‌کار-روانکار با نفوذ در منطقه برش و ایجاد لایه روانکار، مهمترین عامل تأثیرگذار بر ضریب اصطکاک می‌باشد.

در تحقیق حاضر به منظور بررسی تأثیر روش نوین روانکاری کمینه بر عملکرد سنگزنی و مقایسه این روش با محیط‌های خنک‌کار-روانکار سنتی، دو نوع فولاد شامل فولاد تندبر سختکاری شده و فولاد تندبر خام مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. از این رو در این تحقیق تأثیر دو عامل محیط خنک‌کار – روانکار و نیز خواص قطعه‌کار بر عملکرد سنگزنی مورد توجه قرار گرفته است.

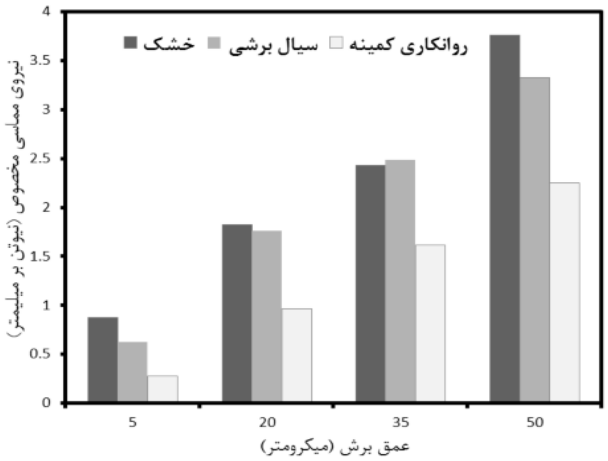
در شکل ۶ نتایج مربوط به نیروهای مماسی مخصوص (نیرو بر واحد عرض قطعه‌کار) برای هر دو نوع فولاد تندبر سخت-کاری‌شده و خام در شرایط مختلف سنگزنی خشک، سیال برشی با پاشش پیوسته و روانکاری کمینه نسبت به تغییرات عمق برش نشان داده شده است. نیروی مماسی، نیروی اصلی در سنگزنی بوده و به صورت مستقیم با انرژی و توان مصرفی و گرمای ایجاد شده در منطقه سنگزنی در ارتباط است. این شکل نشان می‌دهد که در عمق‌های برشی مختلف، روش روانکاری کمینه به صورت چشمگیری نیرو را کاهش می‌دهد. این کاهش نیرو را می‌توان به نفوذ مؤثر روانکار به منطقه تماسی نسبت داد.

نفوذ مؤثر قطرات روغن در منطقه سنگزنی منجر به ایجاد لایه روانکاری مرزی پایدار در منطقه تماسی بین دانه‌های چرخ سنگ و قطعه‌کار شده که در نتیجه بهبود رفتار تماسی دانه- قطعه‌کار و کاهش نیروهای برشی و اصطکاکی را در پی خواهد داشت.

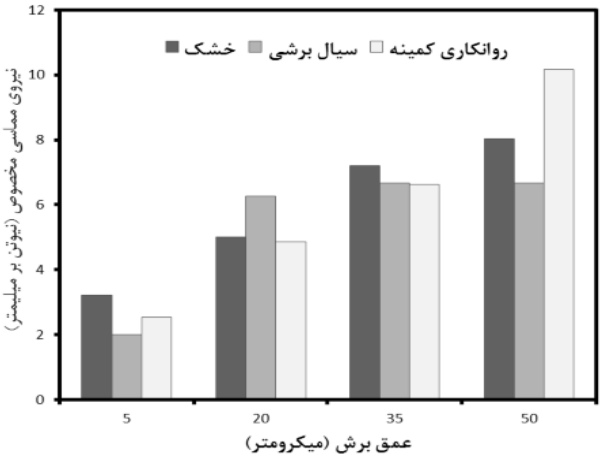
همان‌گونه که عنوان شد، یکی از اصلی‌ترین شاخص‌های بررسی عملکرد سنگزنی ضریب اصطکاک است که به صورت نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی تعریف می‌شود. شکل ۷ نتایج مربوط به ضرایب اصطکاک محاسبه شده در سنگزنی هر دو نوع فولاد در شرایط مختلف خنک‌کار-روانکار را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که روش روانکاری کمینه در مقایسه با استفاده از سیال برشی با پاشش پیوسته، به صورت چشمگیری ضریب اصطکاک را کاهش می‌دهد.

1. Plowing

Archive of SID
www.SID.ir



الف- فولاد تندبر خام

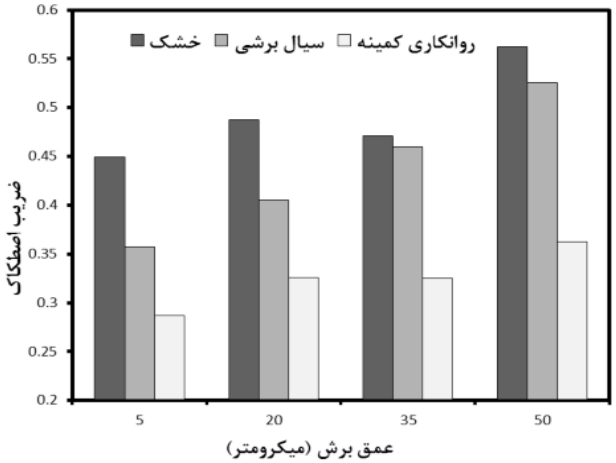


ب- فولاد تندبر سختکاری شده

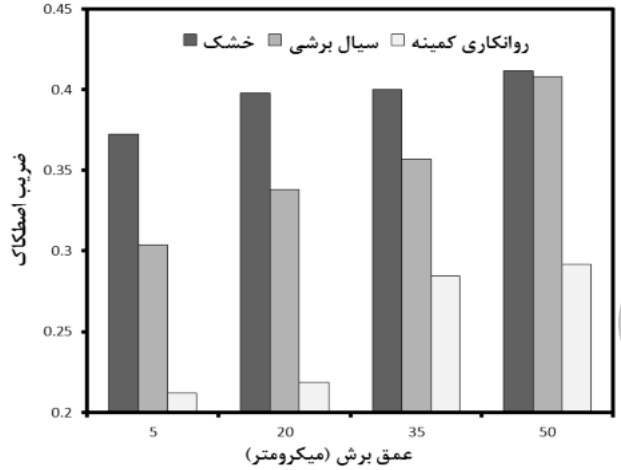
شکل ۶ تغییرات نیروی مماسی مخصوص نسبت به عمق برش در حضور محیط‌های مختلف خنک‌کار- روانکار

فشار و سرعت بالای هوای فشرده، ذرات بسیار ریز روغن و وجود منابع روغن‌کاری در چرخ‌سنگ عوامل اصلی در بهبود نفوذ قطرات روانکار به منطقه تماسی در روش روانکاری کمینه می‌باشد. این نتیجه را می‌توان شاخص‌ترین عملکرد روش روانکاری کمینه دانست چرا که علاوه بر کاهش مصرف مقدار سیال روانکار و حذف معایب ناشی از آن، با نفوذ مؤثر در منطقه برشی منجر به کاهش بسیار چشمگیر ضریب اصطکاک و در نتیجه بهبود عملکرد فرایند سنگزنی می‌شود.

افزایش عمق برش در روش‌های مختلف روانکاری، به دلیل افزایش سطح تماس دانه با قطعه‌کار و افزایش نیروی مماسی، منجر به افزایش ضریب اصطکاک می‌شود.



الف- فولاد تندبر خام



ب- فولاد تندبر سختکاری شده

شکل ۷ تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به عمق برش در حضور محیط‌های مختلف خنک‌کار- روانکار

شکل ۸ مربوط به زبری سطح قطعات سنگزنی شده در تحقیق حاضر است. این شکل حاکی از آن است که روش روانکاری کمینه تأثیر کاملاً متفاوتی بر روی نتایج زبری سطح دو نوع فولاد تندبر سختکاری شده و خام ایجاد می‌کند. به طور کلی مشاهده می‌شود که زبری سطح در فرایند سنگزنی فولاد تندبر خام با استفاده از روش روانکاری کمینه، نسبت به سیال برشی با پاشش پیوسته و حتی سنگزنی خشک افزایش می‌یابد (شکل ۸- الف).

علت این امر را می‌توان به افزایشِ نسبت تغییر شکل مواد به تشکیل براده و نیز خاصیت شکل‌پذیری بالای فولاد تندبر خام نسبت داد.

www.SID.ir

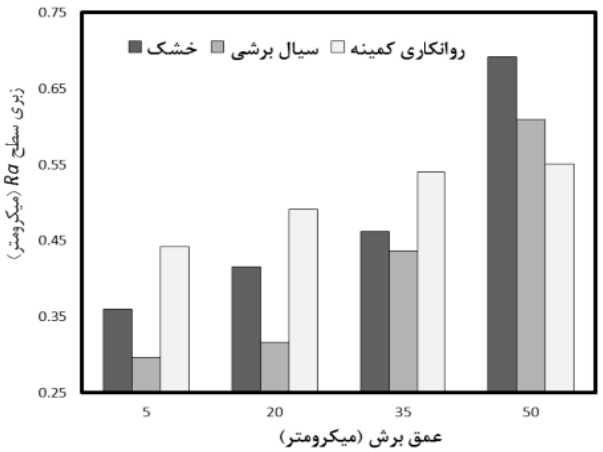
با کاهش ضریب اصطکاک در منطقه درگیری دانه ساینده، منطقه تغییر شکل الاستیک و پلاستیک افزایش می‌یابد و منطقه تشکیل براده کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر هر دانه باید به عمق بیشتری نفوذ کند تا منجر به تشکیل براده شود [۱۵]. این مسأله در فولادهای داکتیل شدت بیشتری می‌یابد به گونه‌ای که فقط تعداد محدودی از دانه‌ها می‌توانند منجر به تشکیل براده شوند چرا که به جای تشکیل براده، ماده را تحت تغییر شکل الاستیک و پلاستیک قرار می‌دهند و باعث جریان ماده به اطراف می‌شوند. این پدیده منجر به تخریب کیفیت سطح و افزایش زبری در فولادهای نرم می‌شود.

برای اثبات این مطلب عکس‌های مورفولوژی سطح قطعات فولاد تندبر خام توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر در عمق برش ۵ میکرومتر برای شرایط مختلف خنک‌کار–روانکار تهیه شده است (شکل ۹). این تصاویر به وضوح افزایش تغییرشکل و جریان مواد و نیز تخریب کیفیت سطح در روش روانکاری کمینه نسبت به محیط‌های دیگر خنک‌کار-روانکار برای فولاد تندبر خام را نشان می‌دهد.

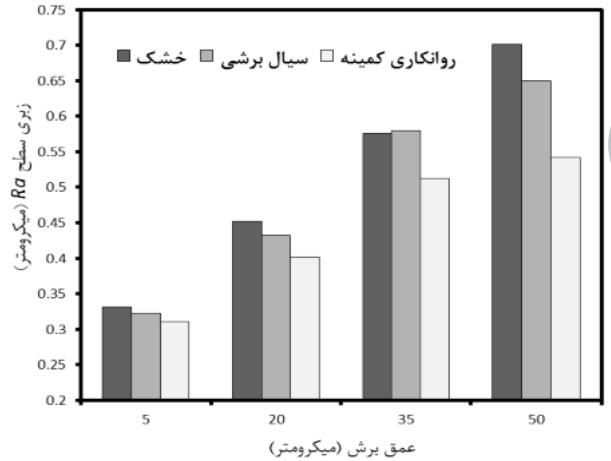
بر خلاف فولاد تندبر نرم، در فولاد تندبر سختکاری شده روانکاری کمینه منجر به بهبود زبری سطح می‌شود (شکل ۸-ب). در این فولادها برخلاف فولادهای نرم، مکانیزم براده‌برداری به سمت براده‌برداری ترد متمایل می‌شود. افزایش منطقه الاستیک و پلاستیک به دلیل بهبود روانکاری، منجر به کاهش منطقه تشکیل براده می‌شود که در نتیجه آن ضخامت براده مؤثر و زبری سطح کاهش می‌یابد، با این تفاوت که در مواد سخت، به دلیل مکانیزم براده‌برداری ترد، براده‌ها قبل از جریان یافتن به اطراف دچار شکست شده و از منطقه برشی خارج می‌شوند بنابراین پدیده شخم‌زنی و جریان مواد به اطراف شدیداً کاهش می‌یابد. این مطلب در شکل ۱۰ که مربوط به مورفولوژی سطح قطعات فولادی سخت تحت شرایط مختلف روانکاری می‌باشد، نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که برای فولاد تندبر سخت تحت شرایط روانکاری کمینه، کیفیت سطح بهبود یافته و عیوب سطحی از قبیل شخم‌زنی، جریان مواد در اطراف و ایجاد شیار در قطعه‌کار مشاهده نمی‌شود.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تصاویر براده‌های تشکیل شده در فرایند سنگزنی فولادهای تندبر خام و سختکاری شده تحت شرایط عمق برش ۳۵ میکرومتر و محیط‌های مختلف روانکاری را نشان می‌دهند که توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر تهیه شده‌اند.



الف- فولاد تندبر خام

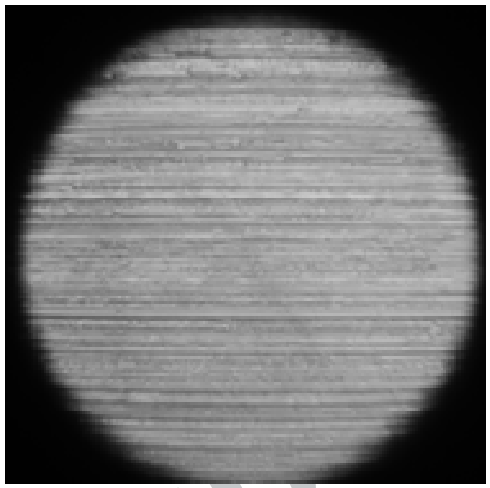


ب- فولاد تندبر سختکاری شده

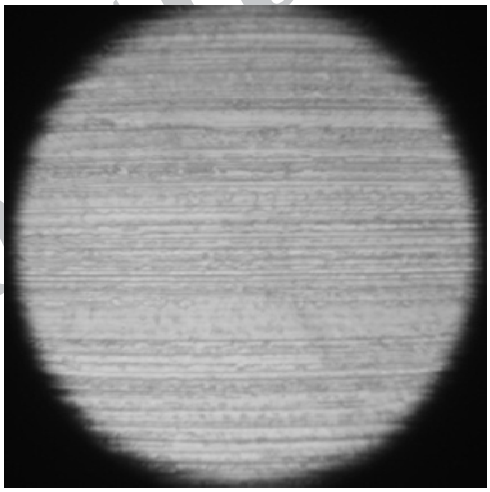
شکل ۸ تغییرات زبری سطح نسبت به عمق برش در حضور محیط‌های مختلف خنک‌کار-روانکار

مشاهده می‌شود که براده‌های ایجاد شده در محیط‌های روانکاری کمینه و سیال برشی با پاشش پیوسته از لحاظ شکل، طول و انحنا دارای تشابه بیشتری نسبت به حالت خشک می‌باشند، این امر تشابه مکانیزم براده‌برداری در محیطهای روانکاری کمینه و سیال برشی را نشان می‌دهد، در حالی که در حالت خشک گرمای تولید شده بالا منجر به ریز و کروی شدن براده‌ها شده است.

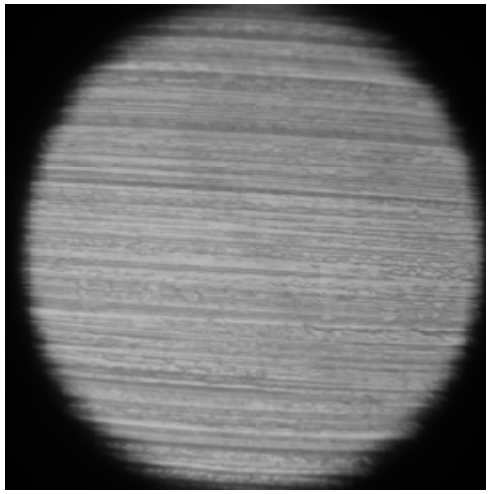
www.SID.ir



الف- سنگزنی خشک

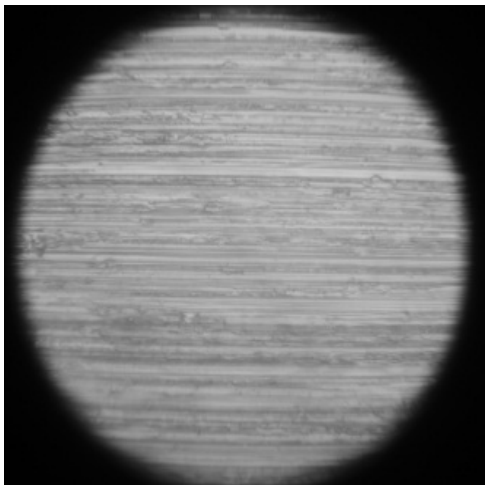


ب- سنگزنی با پاشش پیوسته سیال برشی

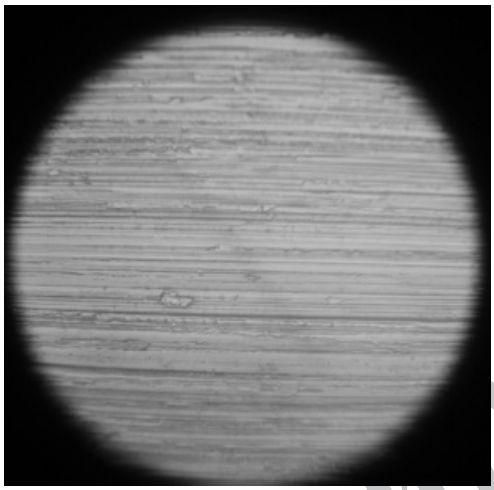


ج- سنگزنی با روانکاری کمینه

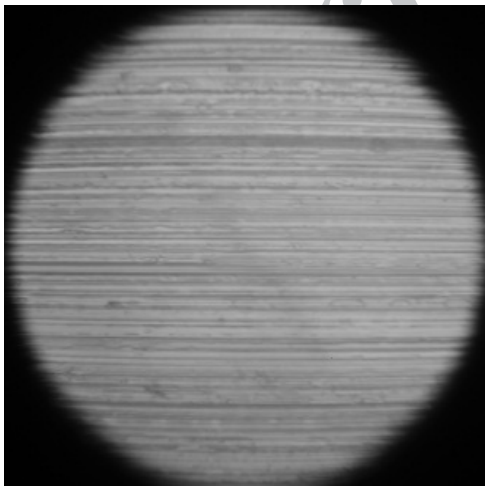
شکل ۹ مورفولوژی سطح قطعات فولاد تندبر خام (بزرگنمایی ۲۰۰ برابر)



الف- سنگزنی خشک



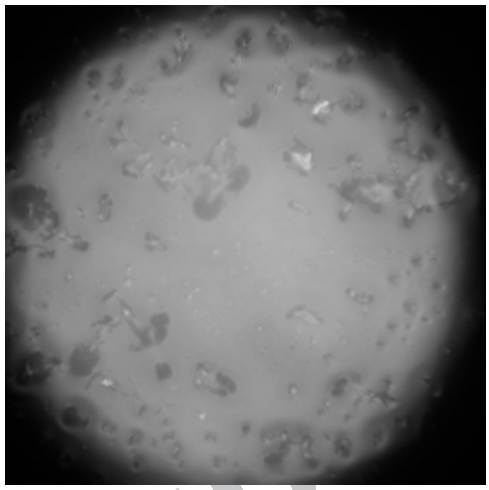
ب- سنگزنی با پاشش پیوسته سیال برشی



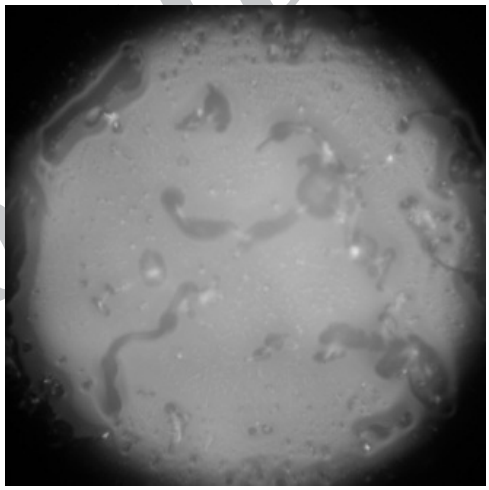
ج- سنگزنی با روانکاری کمینه

شکل ۱۰ مورفولوژی سطح قطعات فولاد تندبر سختکاری شده (بزرگنمایی ۲۰۰ برابر)

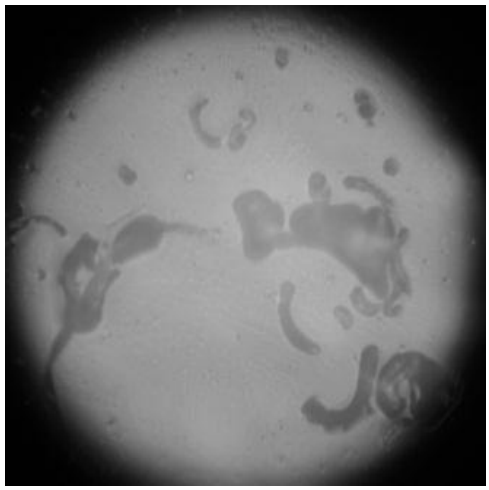
www.SID.ir



الف- سنگزنی خشک

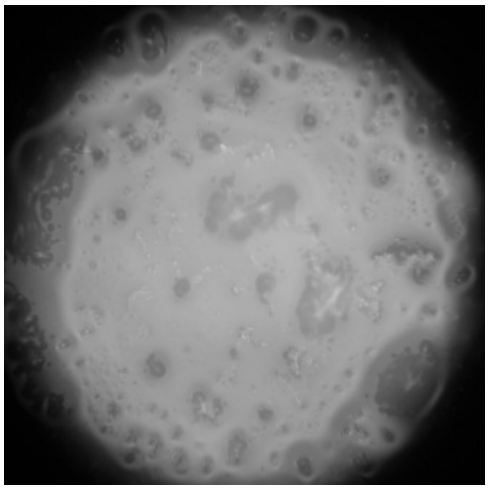


ب- سنگزنی با پاشش پیوسته سیال برشی

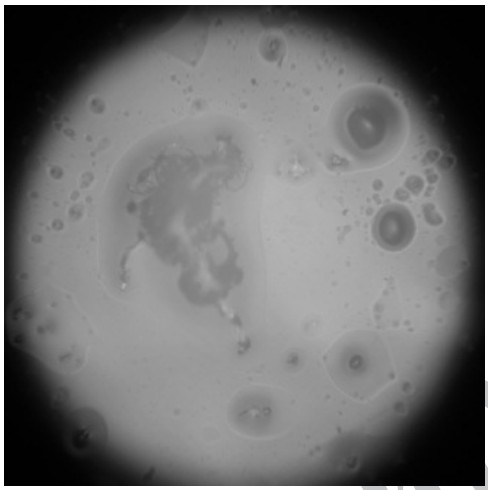


ج- سنگزنی با روانکاری کمینه

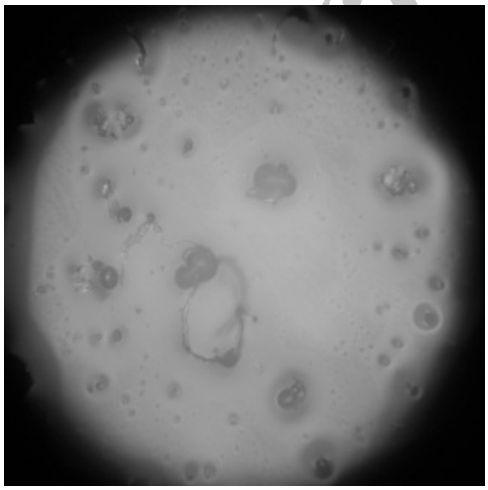
شکل ۱۱ براده‌های تشکیل شده از قطعات فولاد تندبر خام (بزرگنمایی ۲۰۰ برابر)



الف- سنگزنی خشک



ب- سنگزنی با پاشش پیوسته سیال برشی



ج- سنگزنی با روانکاری کمینه

شکل ۱۲ براده‌های تشکیل شده از قطعات فولاد تندبر سخت (بزرگنمایی ۲۰۰ برابر)

www.SID.ir

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر روش روانکاری کمینه بر روی عملکرد فرایند سنگزنی شامل نیروی مماسی مخصوص، ضریب اصطکاک، کیفیت سطح و مکانیزم براده‌برداری در دو نوع فولاد شامل فولاد تندبر سخت‌کاری شده و فولاد تندبر خام مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد:

۱) استفاده از روش روانکاری کمینه در سنگزنی فولادهای تندبر سختکاری شده و تندبر خام منجر به کاهش نیروی مماسی مخصوص و متعاقباً توان مصرفی نسبت به سنگزنی با استفاده از پاشش پیوسته سیال برشی و سنگزنی خشک می‌شود. علت این امر نفوذ مؤثر قطرات روغن به منطقه برش می‌باشد که منجر به بهبود شرایط روانکاری از طریق تشکیل لایه روانکاری مرزی بین لبه‌های برشی و سطح قطعه‌کار می‌شود.

۲) استفاده از روش روانکاری کمینه در سنگزنی فولادهای تندبر منجر به کاهش بسیار چشمگیر ضریب اصطکاک نسبت به سنگزنی در حالت پاشش پیوسته سیال برشی می‌شود.

۳) روش روانکاری کمینه منجر به تخریب کیفیت سطح و افزایش زبری سطح در فولاد تندبر خام می‌شود. علت این امر را می‌توان به میزان بالای شکل‌پذیری و جریان مواد و نیز مکانیزم براده‌برداری نرم در این فولاد نسبت داد که حرکت براده به اطراف و رسوب مجدد براده را تشدید می‌کند. در صورتی که روانکاری کمینه در فرایند سنگزنی فولاد تندبر سخت منجر به کاهش زبری و بهبود کیفیت سطح می‌شود.

۴) مکانیزم براده‌برداری در فرایند سنگزنی با روش روانکاری کمینه تشابه زیادی با حالت سنگزنی با سیال برشی دارد.

۵) به طورکلی با افزایش عمق برش و نرخ براده‌برداری مخصوص، اثر روانکاری کمینه بر فرایند سنگزنی فولادها افزایش یافته و منجر به بهبود عملکرد سنگزنی نسبت به سنگزنی خشک و سنگزنی با استفاده از سیال برشی با پاشش پیوسته می‌شود.

۵- مراجع

[1] Abdalla HS., Patel S., "The Performance and Oxidation Stability of Sustainable Metalworking Fluid Derived From Vegetable Extracts", *Proc ImechE Part B: J Eng. Manuf*, 2006, p. 220.

[2] Julieb Z., Andres F., Kimf H., Steven J., "Design of Hard Water Stable Emulsifier Systems for Petroleum and Bio-Based Semi-Synthetic Metalworking Fluids", *Environ Sci Technol*, Vol. 37, 2003, pp. 5278–88.

[3] Stanford M., Lister P.M., Kibble K.A., Morgan C., "Investigation into the use of Gaseous and Liquid Nitrogen as a Cutting Fluid When Turning BS 970-80A15(En32b) Plain Carbon Steel using WC–Co Uncoated Tooling", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 54, 2007, pp. 11–19.

[4] HSE, *Metal Working Fluids (MWF) Exposure Assessment*, EH74/4. London: HSE Books, 2000.

[5] Abdalla HS., Baines W., McIntyre G., Slade C. "Development of Novel Sustainable Neat-Oil Metal Working Fluids for Stainless Steel and Titanium Alloy Machining", Part 1.Formulation development. *J Adv Manuf Technol*, Vol. 34, 2007, pp. 21–33.

[6] Yui A., Terashima M., "Development of Coolant-Less Grinding System", in: Wang J., Scott W., Zhang L.C. (Eds.), *Abrasive Technology: Current Development and Applications*, Vol. 1, Word Scientific, 1999, p. 394.

[7] Snoeys R., Maris M., Peters B.J., "*Thermally Induced Damages in Grinding*", Ann. ClRP27(2), 1978, pp. 571-581.

[8] Attanasio A., Gelfi M., GiardinI C., Remino C., "Minimal Quantity Lubrication in Turning: Effect on Tool Wear", *Wear* Vol. 260, 2006, pp. 333-338.

[9] Tawakoli T., Hadad M.J., Sadeghi M.H., "Investigation on Minimum Quantity Lubricant-MQL Grinding of 100Cr6 Hardened Steel using Different Abrasive and Coolant–Lubricant Types", *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* Vol 50, 2010, pp. 698–708.

[10] Silva L.R., Bianchi E.C., Catai R.E., Fusse R.Y., Franc T.V., Aguiar P.R., "Study on the Behavior of the Minimum Quantity Lubricant-MQL Technique under Different Lubrication and Cooling Conditions When Grinding ABNT 4340 steel" , *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2005, pp. 192–199.

[11] Silva L.R., Bianchi E.C., Fusse R.Y., Catai R.E., Franc T.V., Aguiar P.R., "Analysis of Surface Integrity for Minimum Quantity Lubricant-MQL in Grinding", *Int. J. Mach. Tools Manuf*, Vol. 47, 2007, pp. 412–418.

[12] Tawakoli T., Hadad M.J., Sadeghi M.H., "Influence of oil Mist Parameters on Minimum Quantity Lubrication-MQL Grinding Process", *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* Vol. 50, 2010, pp. 521–531.

[13] Brunner G., "*Schleifen Mit Mikrokristallinem Aluminiumoxid*", Dr.-lng. Diss., Universit¨ at Hannover, D¨ usseldorf, VDI-Verlag, 1998.

Archive of SID

www.SID.ir

[14] Tawakoli T., Hadad M.J., Sadeghi M.H., Daneshi A., Sadeghi B., "Minimum Quantity Lubrication in Grinding: Effects of Abrasive and Coolant Lubricant Types", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 19, 2011, pp. 2088-2099.

[15] Fritz Klocke E.h., "*Manufacturing Process 2: Grinding, Honning, Lapping*", Vol. 2 , 2009, pp. 7-10.

Durgumahanti U.S., Singh .V, Venkateswara Rao P., "A New Model for Grinding Force Prediction and Analysis", *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* Vol. 50, 2010, pp. 231-240.

[16] Tang J., Du J., Chen Y., "Modeling and Experimental Study of Grinding Forces in Surface Grinding", *journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, 2009, pp. 2847-2854.

SID