

بهبود قابلیت ماشین کاری فولاد زنگ‌زن 17-4PH با استفاده از خنک کاری کرایوژنیک

سلمان خانی^{۱*}، محمدرضا رازفر^۲، مسعود فرحناکیان^۳

تاریخ دریافت: ۲۶ شهریور ۹۲ تاریخ پذیرش: ۷ آذر ۹۲

چکیده

فولاد زنگ‌زن 17-4PH دارای خواص مقاومت به خوردگی، استحکام و مقاومت به سایش بالا است. این آلیاژ در صنعت دارای کاربردهای فراوانی مانند صنایع پتروشیمی، صنایع هوافضا و صنعت کاغذسازی است؛ اما به خاطر ضریب انتقال حرارت پایین و چقرمگی بالا در گروه مواد سخت ماشین کاری شونده قرار گرفته است. عمر ابزار برش در ماشین کاری این فولاد زنگ‌زن با روش‌های سنتی پایین بوده و هزینه‌های ماشین کاری زیادی را بر صنعت تحمیل می‌کند. در این مقاله ماشین کاری کرایوژنیک به منظور بهبود قابلیت ماشین کاری فولاد زنگ‌زن 17-4PH استفاده شده است. خنک کاری کرایوژنیک، دمای ابزار را پایین نگه داشته، در نتیجه سایش ابزار، وابسته به افزایش دما، کاهش و عمر ابزار افزایش می‌یابد. نیروی برش و سایش ابزار به عنوان پارامترهای قابلیت ماشین کاری بررسی شده است. نتایج تجربی نشان داد در ماشین کاری کرایوژنیک در مقایسه با ماشین کاری سنتی، نیروهای برش تا ۲۲ درصد کاهش و عمر ابزار تا ۳۹ درصد افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: فولاد زنگ‌زن 17-4PH، عمر ابزار، خنک کاری کرایوژنیک، قابلیت ماشین کاری.

۱. مقدمه

فولاد زنگ‌زن 17-4PH یک آلیاژ رسوب سختی، دارای مقادیر درخور توجهی از عناصر کروم، نیکل و مس با مقادیر کمی از عناصر منگنز، مولیبدن و نیوبیوم است. در این آلیاژ، مس عنصر رسوب سختی است و این فولاد از طریق عملیات حرارتی به سختی مدنظر می‌رسد. این آلیاژ ترکیبی از خواص مقاومت به خوردگی، استحکام بالا، مقاومت به سایش را داراست. همچنین تا 350°C استحکام خود را حفظ می‌کند. فولاد زنگ‌زن 17-4PH در قطعات هواپیما و موشک، صنایع شیمیایی و پتروشیمی، صنایع غذایی و کاغذسازی کاربرد دارد [۱]. این آلیاژ به خاطر دلایل زیر جزو مواد سخت ماشین کاری شونده قرار گرفته است:

- استحکام برشی بالا
- قابلیت کارسختی بالا
- چقرمگی بالا
- ضریب انتقال حرارت پایین و ایجاد دمای بالا در ناحیه برش

لبه برنده ابزار می‌گردد [۲]. حرارت تولیدشده در فرآیند برش، مجموع تغییر شکل پلاستیک هنگام تشکیل براده و اصطکاک بین ابزار و قطعه کار و اصطکاک بین ابزار و براده است [۳]. مقدار زیادی از این حرارت تولیدشده داخل براده می‌ماند و مقداری از آن نیز به ابزار ابزار و قطعه کار منتقل می‌شود [۳، ۴]؛ اما همان حرارت منتقل شده به ابزار و قطعه کار برای افزایش دمای ناحیه برش تا مقادیر زیاد

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران: salmanxani@gmail.com

۲. دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

۳. دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

کافی است. افزایش زیاد دمای ناحیه برش موجب کاهش عمر ابزار و همچنین محدودیت نرخ براده برداری در مقایسه با سایر فولادها می گردد [۵]. همچنین سایش سریع ابزار برش به دلیل افزایش زمان تعویض ابزار نامطلوب است.

ماشین کاری به کمک خنک کاری کرایوژنیک^۱، یک روش کارآمد برای کاهش دمای ابزار برش است. هنگ [۶] از نیتروژن مایع به منظور کنترل دمای ناحیه برش استفاده کرد. وی با استفاده از نازل، نیتروژن مایع را به سطح براده ابزار و همچنین سطح آزاد تزریق کرد. ونوگوپال [۷] عمر ابزار کاربیدی را در ماشین کاری آلیاژ تیتانیوم از طریق پاشش نیتروژن مایع به ناحیه برش بررسی کرد. نتایج نشان داد ماشین کاری کرایوژنیک عمر ابزار را در مقایسه با ماشین کاری سنتی و خنک کاری سنتی به ترتیب ۱۴۰ و ۷۰ درصد بهبود می بخشد.

در این مقاله از ماشین کاری به کمک خنک کاری کرایوژنیک غیرمستقیم برای بهبود قابلیت ماشین کاری فولاد زنگ نزن 17-4PH استفاده شده است. خنک کاری کرایوژنیک توسط نیتروژن مایع موجب کاهش دمای ابزار می شود؛ در نتیجه سایش وابسته به دمای ابزار کاهش یافته و عمر ابزار افزایش می یابد. در قسمت دوم روش آزمایش های تجربی، در قسمت سوم تحلیل نتایج و در قسمت چهارم خلاصه نتایج شرح داده می شود.

۲. تجهیزات و شرایط انجام آزمایش های تجربی

در این بخش، تجهیزات استفاده شده در آزمایش و شرایط آزمایش های تجربی شرح داده می شود.

۱.۲. قطعه کار

آزمایش های تراشکاری روی قطعه کاری از جنس فولاد زنگ نزن 17-4PH انجام شده است. این آلیاژ یکی از فولادهای زنگ نزن رسوب سختی است. این فولاد زنگ نزن از استحکام و مقاومت به خوردگی بالایی برخوردار بوده و در صنایع شیمیایی که محیط های خورنده هستند، کاربرد دارد. در شکل (۱) ترکیب شیمیایی این فولاد زنگ نزن آمده است. قطعه کار تحت آزمایش با عملیات حرارتی H900 تا ۴۴ راکولسی سخت شده است.

۲.۲. ماشین ابزار و ابزار برش

آزمایش ها روی ماشین تراش TN50BR ساخت شرکت ماشین سازی تبریز با حداکثر سرعت دورانی ۲۰۰۰RPM و توان موتور اصلی ۵/۵kW انجام گردیده است. ابزار کاربیدی SNMG190612 با پوشش TiN ساخت شرکت ZCC استفاده شده است.

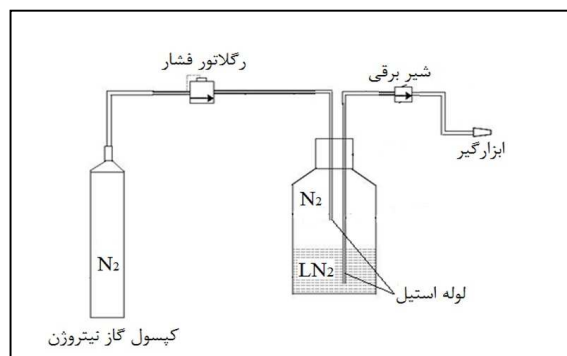
۳.۲. اندازه گیری نیروی برش

دینامومتر سه مؤلفه ای کیستلر ۹۱۲۱ به منظور اندازه گیری نیروی های برش استفاده شده است. سیگنال از طریق کابل 1689B5 و پورت RS-232 به تقویت کننده 5070A منتقل می گردد و در نهایت مؤلفه های نیروی تراش توسط نرم افزار داینوویر کیستلر^۲ در یک کامپیوتر نمایش داده می شود.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن ۱۷-PH۴ (%)

Cu	Nb	Ni	Mo	Cr	S	P	Mn	Si	C	
۳	-	۳	-	۱۵	-	-	-	-	-	کمینه
۵	۰/۴۵	۵	۰/۶	۱۷	۰/۳	۰/۴	۱/۵	۰/۷	۰/۰۷	بیشینه

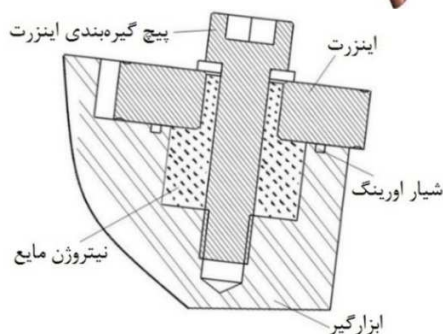
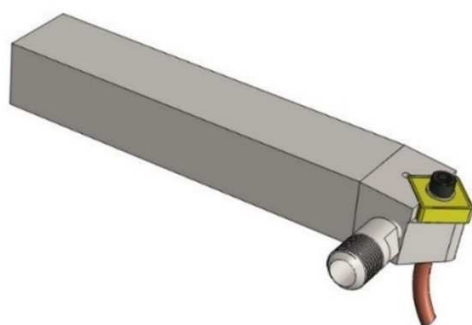
مایع بعد از تماس با ابزار کاربایدی از طریق این مسیر به بیرون هدایت می‌گردد. روی سطحی که ابزار کاربایدی قرار می‌گیرد، شیاری به‌منظور قرارگرفتن اورینگ ایجاد شده است. این اورینگ به‌عنوان آب‌بند عمل کرده و از ترشح نیتروژن مایع از زیر ابزار کاربایدی به بیرون ممانعت به‌عمل می‌آورد. به‌منظور جلوگیری از تماس نیتروژن مایع با قطعه‌کار، از یک لوله مسی برای هدایت نیتروژن از مسیر خروجی استفاده گردیده است. شکل (۲) ابزار برش را حین اعمال نیتروژن مایع نشان می‌دهد.



شکل (۱): سیستم خنک‌کاری کرایوژنیک

۴.۲. اندازه‌گیری سایش سطح آزاد ابزار

به‌منظور اندازه‌گیری سایش سطح آزاد ابزار برش، بعد از هر آزمایش از میکروسکوپ دیجیتالی داینولایت^۳ با بزرگ‌نمایی ۲۰-۲۰۰ برابر استفاده گردیده است. این ابزار به همراه نرم‌افزار داینوکیچر^۴ به‌منظور اندازه‌گیری و ثبت سایش سطح آزاد ابزار کاربایدی استفاده شد.



شکل (۲): شماتیک ابزارگیر طراحی شده و مقطع برش خورده از آن

جدول (۲): پارامترهای فرآیند تراشکاری فولاد زنگ‌نزن ۱۷-۴PH

پارامتر	تراشکاری سنتی و کرایوژنیک
ابزار برش	کارباید با پوشش TiN
قطعه‌کار	فولاد زنگ‌نزن ۱۷-۴PH (H900)
قطر قطعه‌کار	۶۰ میلی‌متر
عمق برش	۰/۷۵ میلی‌متر
نرخ پیشروی	۰/۱۱ میلی‌متر بر دور
سرعت برشی	۶۷ متر بر دقیقه
طول برش	۵۰ میلی‌متر در هر برش
خنک‌کار کرایوژنیک	نیتروژن مایع (LN)

۵.۲. سیستم خنک‌کاری کرایوژنیک

در شکل (۱) سیستم خنک‌کننده نشان داده شده است که شامل کپسول گاز نیتروژن، رگلاتور تنظیم فشار گاز نیتروژن، شیر برقی برای قطع و وصل نیتروژن مایع، کپسول نیتروژن مایع و اتصالات از جنس فولاد زنگ‌نزن است. نیتروژن مایع به‌خودی‌خود جریان ندارد، در نتیجه باید برای جریان‌یافتن آن فشاری روی آن ایجاد شود که این فشار توسط گاز نیتروژن تأمین می‌گردد. ابزارگیر در شکل (۱) نشان داده شده است. به‌منظور خنک‌کاری کرایوژنیک غیر مستقیم ابزارگیری مطابق با ابزارگیر استاندارد PSDNN3225P19 (مشخصه ایزو^۵) طراحی و ساخته شده است. سوراخی با ابعاد $\text{Ø}10 \times 4\text{mm}$ در سطحی که ابزار کاربایدی قرار می‌گیرد، ایجاد گردیده است. این سوراخ به‌عنوان مخزن نیتروژن مایع داخل ابزارگیر عمل می‌کند و از طریق یک سوراخ به رابط (آداپتور) متصل است. نیتروژن مایع از طریق رابط که توسط یک لوله به مخزن اصلی نیتروژن مایع متصل است، وارد مخزن داخل ابزارگیر شده و با سطح زیرین و سطح داخلی سوراخ ابزار کاربایدی تماس پیدا می‌کند. مسیر کوچکی به عنوان خروجی نیتروژن در ابزارگیر ایجاد شده است که نیتروژن

از ۷۵۰mm ماشین کاری در شرایط خشک و کرایوژنیک نشان داده شده است که تصدیق بر نمودارهای شکل (۴) و (۵) است.

۲.۳. نیروی برش

شکل (۴) نیروی اصلی برش F_t را بر حسب طول برش در ماشین کاری خشک و کرایوژنیک با ابزار کاربایدی در شرایط جدول ۲ نشان می‌دهد. نیروی اصلی برش برای ماشین کاری کرایوژنیک در محدوده ۱۴۷N تا ۱۶۰N قرار دارد، برای ماشین کاری خشک نیروی اصلی برش در محدوده ۱۷۲N تا ۲۰۵N است. با مقایسه نیروی اصلی برش در ماشین کاری خشک و کرایوژنیک، مشخص می‌شود که نیروی اصلی برش در ماشین کاری کرایوژنیک کمتر از ماشین کاری خشک است. همچنین از شکل (۵) واضح است که نیروی برش در حالت کرایوژنیک خیلی پایدارتر از حالت خشک است، در واقع تغییرات نیرو با طول برش در ماشین کاری کرایوژنیک کمتر از ماشین کاری خشک است. کاهش نیرو در ماشین کاری کرایوژنیک به این دلیل است که خنک کاری کرایوژنیک ابزار برش مانع از تجمع حرارت در ابزار می‌گردد، در این شرایط سختی لبه برنده حفظ شده و به تبع آن سایش کمتر بوده و نیروی برش کاهش می‌یابد.



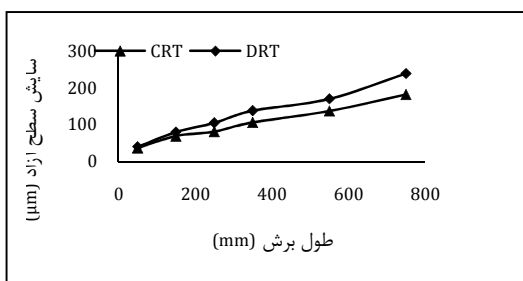
شکل (۳): چیدمان تراشکاری کرایوژنیک

۳. نتایج تجربی

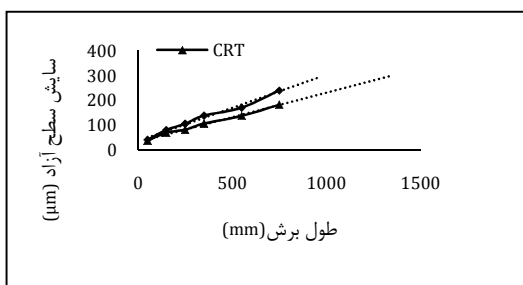
۱.۳. سایش ابزار

سایش تدریجی ابزار بیشتر به دو صورت شکل می‌گیرد: ایجاد گودال فرسایش و سایش سطح آزاد. گودال فرسایش به صورت مقعر در سطح براده ابزار توسط لغزش براده بر روی سطح براده شکل می‌گیرد. سایش سطح آزاد ابزار بر اثر حرکت نسبی، سطح آزاد ابزار در مقایسه با سطح ماشین کاری شده ایجاد می‌شود. از آنجاکه عمر ابزار برش در ماشین کاری این فولاد با ابزار کاربایدی پوشش‌دار، توسط سایش سطح آزاد تعیین می‌گردد [۸،۹]، در این پژوهش، این مکانیسم سایش مطالعه شده است. شکل (۳)، چگونگی افزایش سایش سطح آزاد ابزار برش را با افزایش طول برش در ماشین کاری خشک و کرایوژنیک با ابزار کاربایدی نشان می‌دهد. در این شکل هر نقطه معادل سایش ابزار، بعد از ماشین کاری طول مشخصی از قطعه کار است. در تراشکاری خشک سایش ابزار بعد از ۷۵۰mm ماشین کاری برابر $240\mu m$ است؛ اما در تراشکاری کرایوژنیک سایش ابزار بعد از همان طول تراشکاری برابر با $185\mu m$ است که کاهش ۲۳٪ در سایش سطح آزاد مشاهده می‌گردد.

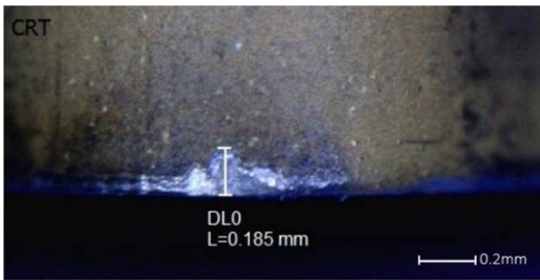
شکل (۴)، نمودار پیش‌بینی سایش ابزار را تا حداکثر سایش $300\mu m$ نشان می‌دهد. در ماشین کاری کرایوژنیک بعد از 1350mm ماشین کاری، سایش ابزار به مقدار مشخص شده $300\mu m$ رسیده است؛ اما در ماشین کاری خشک، هنگام سایش $300\mu m$ فقط 970mm ماشین کاری انجام شده است. این نشانگر افزایش ۳۹ درصدی طول عمر ابزار در ماشین کاری کرایوژنیک در مقایسه با ماشین کاری خشک است. در شکل (۴) سایش سطح آزاد ابزار بعد



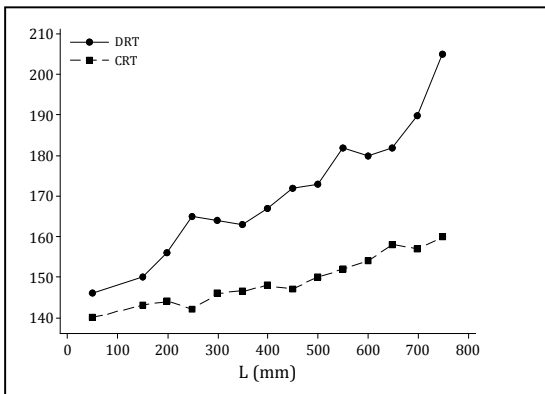
شکل (۴): سایش سطح آزاد بر حسب طول برش برای تراشکاری سنتی و کرایوژنیک



شکل (۵): پیش‌بینی عمر ابزار با استفاده از برازش خطی



شکل (۶): سایش سطح آزاد بعد از mm750 ماشین کاری در ماشین کاری خشک و کرایوژنیک، X1۹۰



شکل (۷): نیروی اصلی برش Ft بر اساس طول برش

تنش اصطکاکی میانگین بین براده و ابزار τ به صورت رابطه ۴ است. تنش برشی روی صفحه برش است و فرض می شود که برابر تنش برشی ماده قطعه کار است. این تنش به حرارت تبدیل شده و کسر α از آن به براده و کسر $1-\alpha$ آن به ابزار جریان پیدا می کند. نرخ حرارت اصطکاکی بر واحد سطح تماس ابزار/ براده q^f به صورت حاصل ضرب سرعت براده V_{chip} در تنش اصطکاکی بین ابزار/ براده تعریف می شود (رابطه ۵). فرض می شود که q^f و α در ناحیه تماس ثابت باشند [۱۰].

$$\frac{\tau}{k} = 1.73 \frac{\sin 2\lambda}{\sin 2(\phi + \lambda - \gamma)} \quad (4)$$

$$q^f = \tau V_{chip} \quad (5)$$

فرض β می گردد، جریان حرارت به داخل ابزار برش از طریق ناحیه مستطیلی شکل ثابت در سطح آن، با طول l و عرض d انجام می گردد. از روابط انتقال حرارت برای سطوحی که از یک طرف نامتناهی هستند^۷. برای ابزار، رابطه ۶ و برای براده، رابطه ۷ را داریم. با برابر قراردادن این دو رابطه، α از رابطه ۸ محاسبه می گردد. در این رابطه K_{tool} ضریب هدایت حرارتی ابزار، K_{work} ضریب هدایت

۳.۳. تحلیل حرارتی ابزار برش

توان مصرف شده در برش فلزات به مقدار زیادی در ناحیه اولیه تغییر شکل، تبدیل به حرارت شده و مقداری هم صرف اصطکاک در سطح براده ابزار می گردد. نرخ صرف انرژی یا توان مصرفی در حین عمل تراش P_m از حاصل ضرب سرعت تراش V_c در مولفه نیروی اصلی تراش F_t بدست می آید.

$$P_m = F_t \cdot V_c \quad (1)$$

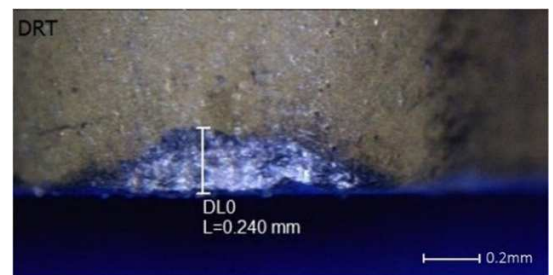
کسر β از این حرارت داخل قطعه کار جریان پیدا کرده و کسر $1-\beta$ باعث افزایش دمای براده می شود. برای به دست آوردن مقدار β از نمودار وینر^۸ استفاده می گردد [۱۰]. این نمودار در شکل (۴) نشان داده شده است. برای محاسبه β نیاز به زاویه برش ϕ است، این زاویه از آزمایش های تجربی با توجه به رابطه ۲ بدست می آید:

$$\tan \phi = \frac{r_c \cos \gamma}{1 - r_c \sin \gamma}, r_c = \frac{a_c}{a_o} \quad (2)$$

که در آن a_c ضخامت براده جدا نشده، a_o ضخامت براده جدا شده، r_c نسبت تراش و γ زاویه براده نرمال ابزار برش است. a_c از طریق رابطه ۳ محاسبه می گردد. زاویه براده $\gamma = -6^\circ$ و زاویه تنظیم ابزار $\chi = 45^\circ$ می باشد.

$$a_c = \frac{f \sin \chi}{\cos \gamma} \quad (3)$$

در جدول (۳) برای شرایط خشک و کرایوژنیک زاویه صفحه برش ϕ محاسبه شده است. ملاحظه می شود که این زاویه برای دو حالت یکسان است. اگر فرض شود که کل انرژی مصرفی در فرآیند تراش صرف تغییر شکل پلاستیک شده و به حرارت تبدیل می گردد. با توجه به مقادیر β به دست آمده از نمودار در شکل (۵)، تقریباً ۱۰٪ حرارت تولید شده به قطعه کار و ۹۰٪ آن به داخل براده جریان می یابد (جدول (۳)).



حرارتی قطعه کار، λ زاویه اصطکاک و s_f ضریب شکل است. در مقایسه با ناحیه تماس d/l وابسته است. این فاکتور برای شرایط آزمایش تقریباً برابر $0/8$ است. K_{work} ضریب نفوذ، برای فولاد زنگ‌نزن 17-4PH برابر با $4.6 \times 10^{-6} m^2/S$ است. با استفاده از رابطه ۸، برای شرایط خشک و کرایوژنیک محاسبه شده و در جدول (۴) ثبت گردیده است. برای ابزار کاربیدی ضریب هدایت حرارتی برابر با $K_{tool}=84 W/m.K$ و برای قطعه کار از جنس فولاد زنگ‌نزن 17-4PH برابر با $K_{work}=14.9 W/m.K$ است. طول تماس براده با ابزار 1 تابع ضریب اصطکاک بین ابزار/ براده μ ، زاویه صفحه برش α ، زاویه براده γ و ضخامت براده a_o است و طبق رابطه ۹ محاسبه می‌گردد [۱۰]

$$\gamma_{\varepsilon} = \frac{\cos \alpha}{\cos^2(\phi - \alpha)} \frac{a_o}{f}$$

$$\begin{aligned} & \times \left(1 + \frac{0.75 K_{tool}}{s_f K_{work}} \left(\frac{\cos \lambda \cos(\phi - \gamma) \tan \phi}{173 \sin(\phi + \lambda - \phi)} \right)^{1/2} \left(\frac{k_{work}}{v_c f \tan \phi} \right)^{1/2} \right) \\ & = 1 - \frac{1 - \beta}{s_f (v_c \tan \phi / k_{work})} \left(\frac{K_{tool}}{K_{work}} \right) \frac{\cos \gamma \cos(\phi + \lambda - \gamma)}{\sin \lambda \cos \phi} \end{aligned} \quad (۸)$$

$$l = 1.73 a_o (\mu + \tan(\phi - \gamma)) \quad (۹)$$

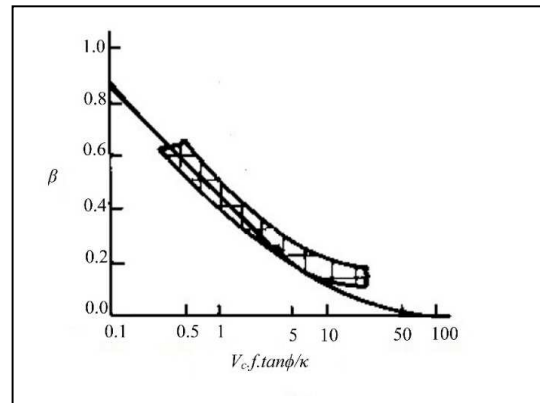
ضریب اصطکاک μ طبق رابطه ۱۰ محاسبه می‌گردد که در آن F_t نیروی اصلی برش و F_h نیروی پیشروی است. برای شرایط خشک و کرایوژنیک طول تماس و ضریب اصطکاک بین ابزار/ براده در جدول ۵ آمده است.

$$\mu = \tan \lambda = \frac{F_h - F_t \tan \gamma}{F_t - F_h \tan \gamma} \quad (۱۰)$$

با توجه به تحلیل‌های فوق مدل دوبعدی حرارتی ابزار برش به صورت شکل (۹) است، شرایط مرزی شامل دمای اتاق و دمای خنک کار کرایوژنیک است. انتقال حرارت همرفتی^۹، تابشی^۹، هدایتی^{۱۰} موجب تغییر دمای ابزار می‌گردند که در آنالیز حرارتی در نظر گرفته شده‌اند. ضریب همرفت برای محیط هوا برابر $8 W/m^2 K$ و ثابت بولتزمن^{۱۱} برابر $5.6 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ است. تحلیل‌های حرارتی برای دو حالت CRT و DRT در نرم افزار آباکوس به صورت دوبعدی اجرا شده است. در شکل (۱۰) توزیع دمایی برای این دو حالت نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل پیداست، ماکزیمم دمای ابزار در این دو حالت به ترتیب برابر با $635^\circ C$ و $154^\circ C$ است. ماکزیمم دمای ابزار در حالت کرایوژنیک نسبت به حالت خشک ۷۵٪ کمتر است که می‌تواند دلیلی بر کاهش سایش ابزار در حالت کرایوژنیک در مقایسه با حالت خشک باشد

جدول (۳): مقادیر زاویه صفحه برش و β

شرایط	a_c (mm)	a_o (mm)	r_c	α°	$V_c f \tan \alpha / k$	% β
خشک DRT	۰/۰۸	۰/۱۷	۰/۴۷	۲۴	۱۱/۹	۱۰
کرایوژنیک CRT	۰/۰۸	۰/۱۷	۰/۴۷	۲۴	۱۱/۹	۱۰



شکل (۸): نمودار وینر برای یافتن β [۱۰]

$$(T - T_0)_{av, tool contact} = (T - 25)_{av, tool contact} = s_f \frac{(1 - \alpha) \tau V_{chip} l}{K_{tool}} \quad (۶)$$

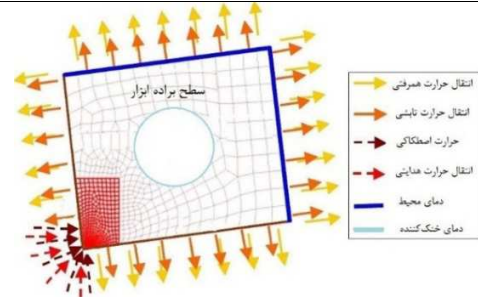
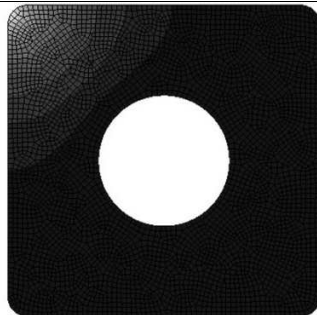
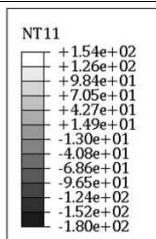
$$(T - T_0)_{av, chip contact} = 0.75 \frac{\alpha \tau V_{chip} l}{K_{work}} \left(\frac{K_{work}}{V_{chip} l} \right)^{1/2} + (1 - \beta) \frac{k \gamma_{\varepsilon}}{(\rho C)_{work}} \quad (۷)$$

جدول (۴): پارمترهای لازم جهت محاسبه α

شرایط	λ°	\square°	$V_c \cdot f \cdot \tan \square / k$	$\beta\%$	$\alpha\%$
خشک DRT	۶۲/۸	۲۴	۱۱/۹	۱۰	۵۹
کرایوژنیک CRT	۶۲/۸	۲۴	۱۱/۹	۱۰	۵۹

جدول (۵): طول تماس براده/ ابزار l و پارمترهای لازم جهت محاسبه آن

شرایط	F_h (N)	F_t (N)	μ	l (mm)
خشک DRT	۳۳۶	۱۴۶	۱/۹۴	۰/۷۴
کرایوژنیک CRT	۳۱۵	۱۴۰	۱/۹۰	۰/۷۳



شکل (۹): مدل دوبعدی ابزار برش و شرایط مرزی آن برای تحلیل حرارتی

شکل (۱۰): توزیع دمایی ابزار برش در شرایط خشک (بالا) و کرایوژنیک (پایین)

۴. نتیجه گیری

در این مقاله ماشینکاری سنتی و کرایوژنیک فولاد زنگ نزن 17-4PH با ابزار برش کاربیدی مطالعه و مقایسه شد. نتایج نشان داد که در ماشینکاری کرایوژنیک عمر ابزار در مقایسه با ماشینکاری سنتی ۳۹ درصد بهبود یافته است. نیروی برش تقریباً ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش داشته است. آزمایش‌های تراشکاری نشان داد که نیروی برش در شرایط خنک‌کاری کرایوژنیک در مقایسه با حالت خشک کمتر است. به علاوه تغییرات نیروی برش با طول برش نیز کمتر از حالت خشک است، به بیان دیگر ماشینکاری کرایوژنیک پایدارتر از ماشینکاری سنتی است. آنالیز حرارتی ابزار برش نشان داد، ماکزیمم دمای ابزار برش در ماشینکاری کرایوژنیک در مقایسه با شرایط خشک ۷۵ درصد کاهش می‌یابد.

فهرست علائم

سرعت برشی (m/min)	V_c
پیشروی (mm/rev)	f
عمق برش (mm)	d
نیروی اصلی برش (N)	F_t
ضخامت براده جدا نشده (mm)	a_c
ضخامت براده جدا شده (mm)	a_o
نسبت تراش	r_c
تنش برشی روی صفحه برش (MPa)	k
نرخ حرارت اصطکاکی (kW)	q^f
ضریب شکل	s_f
طول تماس براده با ابزار (mm)	l
ضریب هدایت حرارتی ابزار (W/m.K)	K_{tool}
ضریب هدایت حرارتی قطعه کار (W/m.K)	K_{work}

واژه‌نامه

علائم یونانی

1. Cryogenically enhanced machining	کسر حرارت تولیدی در ناحیه اول، منتقل شده به	
2. Dynoware Kistler	قطعه‌کار (deg)	β
3. Dino-Lite	زاویه صفحه برش (deg)	ϕ
4. DinoCapture	زاویه براده ابزار (deg)	γ
5. ISO specification	زاویه تنظیم ابزار (deg)	χ
6. Weiner	تنش اصطکاکی بین ابزار و براده (MPa)	τ
7. Semi-infinite	کسر حرارت اصطکاکی منتقل شده به براده	α
8. Heat convection	زاویه اصطکاک (deg)	λ
9. Heat radiation	ضربی اصطکاک بین ابزار و براده	μ
10. Conduction heat	ضریب نفوذ قطعه‌کار (m^2/S)	wor K_k
11. Stefan-Boltzmann Constant		

۵. مراجع

- [1] Bohler. Properties of N700, Accessed; <http://www.bohler-edelstahl.com>.
- [2] Handbook, M. Machining, 9th Edition, ASM International, United States of America, Vol 16, 1989.
- [3] Shaw, M. C. Energy conversion in cutting and grinding. *Annals of CIRP*, 45(1): 101-104, 1996.
- [4] Stephenson, D. A., Barone, M. R. and Dargush, G. H. "Thermal expansion of the workpiece in turning". *ASME Journal of Engineering for Industry*, 117: 542-550, 1995.
- [5] Handbook, M. Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, 10th Edition, ASM International, United States of America, Vol 1, 1990.
- [6] Hong, S. Y. Cryogenic Machining, US Patent NO. 5901623, 1999.
- [7] Venugopal, K. A., Paul, S. and Chattopadhyay, A. B. "Tool wear in cryogenic turning of Ti-6Al-4V alloy". *Cryogenics*, 47(1): 12-18, 2007.
- [8] Venkatesh, V. C. and Satchithanandam, M. A. "Discussion on Tool Life Criteria and Total Failure Causes". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 29(1): 19-22, 1980.
- [9] Zhao, H., Barber, G. C. and Zou, Q "A study of flank wear in orthogonal cutting with internal cooling". *Wear*, 253(9-10): 957-962, 2002.
- [10] Childs, T. Metal machining: theory and applications, Butterworth-Heinemann, New York, 2000.