



تأثیر نوع روان کاری بر دما و سایش ابزار در تراش کاری فولاد AISI 304

عارف سلیمی نیا¹، محمد مهدی ابوترابی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

* صندوق پستی 741-89195، abzda.ac.ir@abootorabi

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 آذر 1396

پذیرش: 30 بهمن 1396

ارائه در سایت: 26 اسفند 1396

کلید واژگان:

تراش کاری

خنک کاری تبریدی

سایش ابزار

دما

نیترژن مایع

چکیده

یکی از راه‌های کاهش دمای ناحیه برش، استفاده از خنک‌کار مناسب است. خنک‌کارهای رایج، علاوه بر اثر نامطلوب بر سلامتی اپراتور، باعث آلودگی محیط زیست نیز می‌شوند. به این دلیل، علاقه به ماشین‌کاری خشک یا روش‌های خنک‌کاری سبز در سال‌های اخیر افزایش زیادی یافته است. یکی از روش‌های خنک‌کاری سبز، خنک‌کاری تبریدی است که در آن، معمولاً از نیترژن مایع به عنوان خنک‌کار در فرایند براده‌برداری استفاده می‌شود. در این مقاله، اثر خنک‌کاری تبریدی به وسیله نیترژن مایع بر دما و سایش ابزار برشی در فرایند تراش کاری فولاد زنگ‌زن آستنیتی 304 مورد بررسی قرار گرفته است. از بین روش‌های مختلف خنک‌کاری تبریدی، روش پاششی به علت تأثیر مستقیم بر ناحیه برش، انتخاب شده است. ماشین‌کاری با روش‌های خنک‌کاری تبریدی و معمولی و همچنین ماشین‌کاری خشک انجام شده است. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تراش کاری تبریدی فولاد 304 در مقایسه با تراش کاری خشک و معمولی، دما را به ترتیب تا 83 و 67 درصد و سایش در سطح آزاد ابزار را به ترتیب تا 75 و 53 درصد کاهش می‌دهد. آنالیز واریانس نشان داد که سرعت برشی نسبت به نرخ پیشروی تأثیر بسیار بیشتری بر دما و سایش ابزار دارد. افزایش سرعت برشی در تمام حالت‌های روان کاری باعث افزایش دما و سایش ابزار شده است.

The effect of lubrication type on tool temperature and wear in turning of AISI 304 steel

Aref Saliminia, Mohammad Mahdi Abootorabi*

Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

* P.O.B. 89195-741, Yazd, Iran, abootorabi@yazd.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 19 December 2017

Accepted 19 February 2018

Available Online 17 March 2018

Keywords:

Turning

Cryogenic cooling

Flank wear

Temperature

Liquid nitrogen

ABSTRACT

One way of reducing the cutting zone temperature is the use of an appropriate coolant. Common coolants, in addition to the adverse health effects on operator, cause environmental pollution as well. Because of this, interest in dry machining or green cooling methods in recent years has been greatly increased. Cryogenic cooling is one of the green cooling methods where liquid nitrogen is usually used as coolant. In the present paper, the effect of cryogenic cooling by liquid nitrogen on the cutting tool temperature and wear in turning process of AISI 304 austenitic stainless steel has been investigated. Among different methods of cryogenic cooling, the spraying technique due to its direct effect on the cutting zone has been selected. Turning with dry, wet (conventional) and cryogenic cooling methods are done. The obtained results indicated that the cryogenic cooling decreased the tool temperature compared to the dry and wet machining by 83% and 67%, respectively and reduced the flank wear of the tool by 75% and 53%, respectively. Analysis of variance showed that cutting speed relative to feed rate has a much greater impact on the tool temperature and wear. Increase of cutting speed in all cooling cases increased the tool temperature and wear.

1- مقدمه

ضریب کشسانی و صافی سطح بالا از ویژگی‌های یک ابزار مناسب است [1]. تمامی این خصوصیات در یک ابزار به‌طور همزمان دیده نمی‌شود. برای مثال، سختی و چقرمگی معمولاً با یکدیگر در تضاد هستند. با توجه به نیاز صنعت به براده‌برداری از مواد جدید با خواص ویژه و رشد روز افزون تکنولوژی ساخت این گونه مواد، باید شرایط عملکردی ابزارهای برشی بهبود یابد کارایی ابزار را می‌توان از طریق پوشش‌دهی و استفاده از خنک‌کار مناسب افزایش داد. حرارت ایجاد شده در ناحیه برش، ناشی از تغییر شکل پلاستیک مواد هنگام تشکیل براده، اصطکاک بین ابزار- براده و ابزار - قطعه‌کار است.

موفقیت در عملیات براده‌برداری به انتخاب مناسب ابزار از لحاظ جنس، شکل هندسی و پوشش بستگی دارد. مواد زیادی با ویژگی‌ها و قابلیت‌های متفاوت به‌عنوان جنس ابزار مورد استفاده قرار گرفته است. از مهم‌ترین این مواد می‌توان فولاد تندبر، کاربایدها، سرامیک‌ها، نیتريد بور مکعبی و الماس‌ها را نام برد. ویژگی‌های ابزار مستقیماً بر قابلیت تولید اثر گذار است. سختی زیاد، مقاومت در برابر سایش و خوردگی، چقرمگی زیاد، سختی زیاد در دمای بالا، مقاومت در برابر تغییر شکل، پایداری شیمیایی، خواص حرارتی مناسب و

Please cite this article using:

A. Saliminia, M. M. Abootorabi, The effect of lubrication type on tool temperature and wear in turning of AISI 304 steel, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 04, pp. 153-162, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

دادند که فرایند ماشین کاری تبریدی در مقایسه با ماشین کاری خشک باعث کاهش 55 تا 65 درصدی سایش ابزار می شود و دمای برش را 93.5 درصد کاهش می دهد. آن ها دلیل کاهش ارتفاع آستانه فرسایش و عمق گودال فرسایش را کنترل مکانیزم های سایش وابسته به دما بیان کردند. سان و همکاران [9] به بررسی قابلیت ماشینکاری آلیاژ تیتانیوم Ti-5553 در حالت تراش کاری در حالت تبریدی در مقایسه با تراش کاری معمولی و روان کاری کمینه پرداختند. بهبود کیفیت سطح، افزایش عمر ابزار و کاهش نیروی برش در حالت تبریدی توسط آن ها گزارش شده است. آن ها علت بهبود عمر ابزار را کاهش چسبندگی بین سطوح در فرایند خنک کاری تبریدی بیان کردند. لی و همکاران [10] از نیتروژن مایع به عنوان خنک کننده، به منظور بررسی میزان تأثیر آن بر سایش ابزار در فرسایش آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V استفاده کردند. در این تحقیق از دو نوع پوشش ابزار یعنی پوشش نرم و پوشش سخت برای انجام آزمایش ها استفاده شد. آن ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از خنک کاری تبریدی باعث افزایش عمر ابزار به میزان 50 تا 90 درصد در ابزار با پوشش نرم و 50 تا 55 درصد در ابزار با پوشش سخت می شود.

در این مقاله، اثر خنک کاری در حالت های مختلف یعنی تبریدی، معمولی (تر) و خشک (بدون استفاده از سیال برشی) در تراش کاری فولاد 304 بر دما و سایش ابزار در سرعت های برشی 55، 111، 219 و 314 متر بر دقیقه، نرخ های پیشروی 0.2 و 0.4 میلی متر بر دور و عمق برش 1 میلی متر با ابزار کاربیدی مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی سابقه فرایند خنک کاری تبریدی نشان می دهد که مقایسه دمای برش و سایش ابزار در فرایندهای خنک کاری تبریدی و خشک برای تراش کاری فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 انجام نشده است. فولاد 304 علی رغم کاربرد زیاد در صنایع مختلف، در حالت خشک قابلیت ماشین کاری پایینی دارد. نتایج به دست آمده نشان دهنده کارایی روش خنک کاری تبریدی در کاهش دما و سایش ابزار برشی نسبت به تراش کاری خشک و معمولی است. برای توضیح بهتر مشاهدات تجربی، از آنالیز واریانس و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی² نیز استفاده شده است. استفاده از آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای مقایسه این سه روش خنک کاری در ماشین کاری فولاد 304 قبلاً انجام نشده است.

2- خنک کاری تبریدی

فرایندهای ماشین کاری را از لحاظ استفاده از روانکار می توان به ماشین کاری معمولی، خشک و سبز تقسیم بندی نمود. در ماشین کاری سبز از روانکارهایی استفاده می شود که آلودگی زیست محیطی ندارند. روش های ماشین کاری سبز شامل خنک کاری تبریدی، روان کاری کمینه و خنک کاری با هوای فشرده است. خنک کاری تبریدی فرایندی است که در آن، از گازهایی که دارای قدرت خنک کنندگی بسیار بالا هستند به عنوان خنک کار در عملیات براده برداری استفاده می شود. استفاده از نیتروژن مایع در خنک کاری تبریدی رایج تر از سایر عناصر است. نیتروژن گازی بی بو، بی رنگ، بی مزه و غیر سمی است. نیتروژن مایع علاوه بر نداشتن عیوب روان کارهای رایج مثل ایجاد مشکلات پوستی، آلودگی محیط زیست و تولید بخارهای سمی، دارای قدرت خنک کنندگی بسیار بالا است [11]. نیتروژن مایع با جذب حرارت تولید شده در ناحیه برش، به سرعت بخار شده و لایه ای از روانکار در ناحیه تماس ابزار و براده شکل می دهد [12]. نیتروژن مایع به عنوان خنک کار سازگار با محیط زیست، بعد از جذب حرارت در ناحیه ی برش، به گاز نیتروژن که 78 درصد از

ماکزیمم دما معمولاً در سطح تماس ابزار و براده روی سطح براده و نزدیک به لبه برنده اصلی ایجاد می شود. حرارت ایجاد شده در عملیات ماشین کاری، توسط قطعه کار، ابزار، براده و سیال برش دفع می شود. از آنجا که دما عامل اصلی مؤثر بر عمر ابزار است، یک روان کار مناسب می تواند از طریق کاهش دمای ناحیه برش، کارایی و عمر ابزار را افزایش دهد. خنک کارهای معمولی علاوه بر ایجاد مشکلات پوستی و تنفسی برای اپراتور و عدم توانایی نفوذ مؤثر در ناحیه تماس ابزار - براده، یک منبع بزرگ آلودگی محسوب می شود که به علت قوانین سخت گیرانه زیست محیطی، هزینه دفع بالایی دارد [2]. امروزه به دلیل عوارض جانبی خنک کاری معمولی (ماشین کاری تر)، علاقه به ماشین کاری خشک یعنی براده برداری بدون استفاده از سیال برشی و مهمتر از آن، استفاده از روش های خنک کاری سبز نظیر خنک کاری تبریدی¹ افزایش یافته است. خنک کاری تبریدی فرایندی است که در آن از نیتروژن مایع به عنوان خنک کننده در عملیات ماشین کاری استفاده می شود. ونگوپال و همکاران [3] عمر ابزار و دمای ناحیه برش را در تراش کاری آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V در حالت های ماشین کاری تبریدی، خشک و معمولی مورد بررسی قرار دادند. سرعت برش مورد استفاده آن ها 70، 85 و 100 متر بر دقیقه، عمق برش 2 میلی متر، نرخ پیشروی 0.2 میلی متر بر دور و ابزار از نوع کاربیدی بدون پوشش بود. آن ها از روش خنک کاری تبریدی پاششی و دو نازل برای پاشش همزمان نیتروژن روی سطح آزاد و براده ابزار برشی استفاده کردند و دلیل افزایش عمر ابزار در ماشین کاری تبریدی نسبت به ماشین کاری خشک و معمولی را کاهش چسبندگی بین سطوح و کاهش سایش به دلیل کنترل دمای ناحیه برش بیان کردند. وانگ و همکاران [4] در تراش کاری آلیاژهای تانتالیوم به بررسی سایش ابزار در دو حالت ماشین کاری تبریدی و خشک پرداختند. آن ها بیان کردند که خنک کاری تبریدی به طور چشم گیری سایش ابزار را کاهش و عمر ابزار را افزایش می دهد. افزایش 300 درصدی عمر ابزار و کاهش 70 درصدی ارتفاع آستانه فرسایش توسط آن ها گزارش شده است. چودهاری و کالیان [5] تأثیر سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش را بر سایش ابزار در تراش کاری فولاد زنگ نزن SS 202 مورد بررسی قرار دادند. آن ها با استفاده از نیتروژن مایع به عنوان خنک کننده نتیجه گرفتند که خنک کاری تبریدی باعث کاهش 37 درصدی ارتفاع آستانه فرسایش نسبت به ماشین کاری خشک می شود. دهانانچزین و کومار [6] به بررسی تغییرات دمای برش و سایش ابزار با ابزاری از جنس تنگستن کارباید، در تراش کاری آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V تحت تأثیر خنک کاری معمولی و تبریدی پرداختند. نتایج حاصل از تحقیق آن ها نشان داد که خنک کاری تبریدی باعث کاهش 61 تا 66 درصدی دمای برش و کاهش 27 تا 39 درصدی سایش ابزار نسبت به خنک کاری معمولی می شود. آن ها کنترل مکانیزم های سایش از طریق کاهش دمای منطقه ماشین کاری و کاهش چسبندگی بین ابزار و براده و بین ابزار و قطعه کار را عامل کاهش ارتفاع آستانه فرسایش دانستند. سانیل و همکاران [7] در تراش کاری فولاد زنگ نزن En 20 به بررسی تأثیر سرعت برشی بر سایش ابزار در دو حالت ماشین کاری تبریدی و معمولی پرداختند. سرعت برش مورد استفاده آن ها 125، 160 و 200 متر بر دقیقه، و ابزار از نوع کاربیدی پوشش دار بود. آن ها کاهش دمای ابزار و قطعه کار، کاهش ضریب اصطکاک، افزایش میزان سختی ابزار برش، کاهش نرم شدن حرارتی، بهتر شدن سلامت لبه برش و کاهش نرخ سایش ابزار را دلایل افزایش عمر ابزار گزارش کردند. گوپتا و همکاران [8] در تراش کاری فولاد AISI 1040 با ابزار تنگستن کارباید به صورت تجربی نشان

² Scanning Electron Microscope¹ Cryogenic Cooling

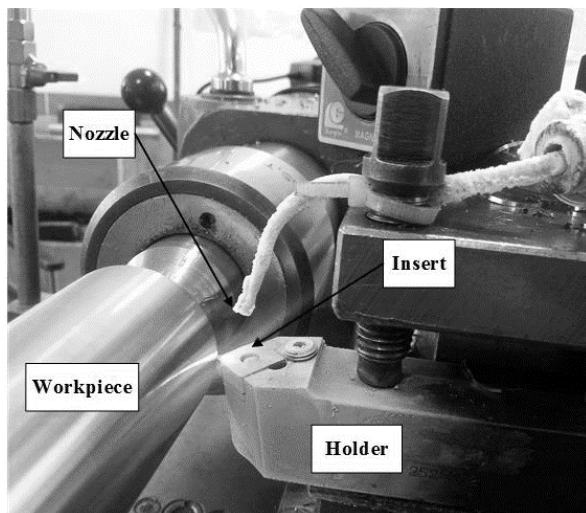


Fig. 2 Cooling of cutting tool by spraying liquid nitrogen (cryogenic cooling)

شکل 2 نحوه ی خنک کاری ابزار برشی توسط پاشش نیتروژن مایع (خنک کاری تبریدی)

هستند به نام فولاد 8-18 نیز شناخته می شوند. مقدار کربن فولاد زنگ نزن 304 کمتر از 0.08 درصد است و خاصیت آهنربایی ندارد. برای اطمینان از ماهیت قطعه کار خریداری شده، از کوانتومتری استفاده شده است. دستگاه طیف سنج نوری که آن را کوانتومتر نیز می نامند از جمله سیستم های تجزیه و آنالیز دقیق برای اندازه گیری درصد عناصر آلیاژی فلزات است. بعد از آماده سازی اولیه نمونه، آزمایش کوانتومتری در سه نقطه متفاوت از سطح نمونه برای تعیین مقادیر عناصر موجود در ساختار قطعه کار انجام و میانگین سه حالت به عنوان ترکیب شیمیایی در نظر گرفته شد. ترکیب شیمیایی به دست آمده برای فولاد 304 در جدول 2 ارائه شده است.

اینسرت استفاده شده در آزمایش ها از جنس تنگستن کارباید با پوشش نیتريد و فاقد براده شکن است. کد ابزار و ابزار گیر مورد استفاده در آزمایش ها، طبق استاندارد ایزو به ترتیب SNGA 120408 و PSDNN 2525M است. برای اندازه گیری دمای سطح ابزار، از ترمومتر مادون قرمز مدل MS6550B ساخت شرکت مستک با دقت 0.1 درجه سانتی گراد استفاده شده است. قابلیت اندازه گیری دما به صورت خودکار و دستی، محدوده دمای قابل اندازه گیری از 32- تا 1650 درجه سانتی گراد و قابلیت اتصال به رایانه جهت ذخیره سازی اطلاعات دریافتی، از ویژگی های این ترمومتر است. این ترمومتر بعد از قرار گیری روی پایه مخصوص، در موقعیت مناسب نسبت به سطح ابزار قرار گرفت. با تنظیم ترمومتر روی حالت اندازه گیری خودکار، دمای ابزار در کل زمان براده برداری اندازه گیری شد و ماکزیمم دمای ثبت شده توسط

حجم هوا را به خود اختصاص داده تبدیل و به صورت طبیعی بازیافت می شود. خنک کاری تبریدی به سه روش انجام می گیرد: الف) روش پیش سرد کردن قطعه کار به منظور تغییر خاصیت مواد از نرم به ترد، ب) روش خنک کاری تبریدی غیر مستقیم به منظور خنک کاری ناحیه برش با انتقال گرمای ابزار به محفظه نیتروژن مایع تعبیه شده در سطح زیر ابزار یا ابزار گیر و ج) روش خنک کاری تبریدی پاششی که هدف از آن خنک کاری ناحیه برش، به ویژه سطح مشترک ابزار و براده با استفاده از نازلی جهت پاشش نیتروژن مایع است. از بین روش های مختلف خنک کاری تبریدی، روش پاششی برای خنک کاری فصل مشترک بین ابزار و براده در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. شکل شماتیک تجهیزات به کار رفته جهت خنک کاری تبریدی پاششی در شکل 1 نشان داده شده است. کمپرسور با دمش هوا به داخل مخزن نیتروژن مایع دو جداره با ظرفیت 30 لیتر، فشار مورد نیاز جهت خروج نیتروژن از نازل را تأمین می کند. کمپرسور مورد استفاده، ساخت شرکت آسیا با ظرفیت 80 لیتر و حداکثر فشار 10 بار است. نازل وظیفه ی هدایت نیتروژن مایع خروجی به محدوده مورد نظر را بر عهده دارد. نحوه ی خنک کاری سطح ابزار، با پاشش نیتروژن مایع توسط نازلی با قطر دهانه 3 میلی متر که در فاصله 5 میلی متری سطح ابزار تنظیم شده، در شکل 2 قابل مشاهده است. این نازل نسبت به سطح براده ابزار حدود 75 درجه زاویه دارد و مخلوط نیتروژن با هوای فشرده را مستقیماً روی این سطح می پاشد.

3- آزمایش ها

قطعه کار استفاده شده در این پژوهش، فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 با قطر 50 میلی متر و طول 400 میلی متر است که خواص آن در جدول 1 ارائه شده است. فولادهای سری 300 رایج ترین نوع فولادهای زنگ نزن هستند که در بین آن ها فولاد 304 کاربرد وسیعی دارد. در ساختار این فولادها در طول عملیات حرارتی، آستنیت (آهن γ) باقی می ماند؛ به همین علت به آن ها فولاد زنگ نزن آستنیتی می گویند. این فولاد در برابر اسید سولفوریک مقاوم است و دارای استحکام در دماهای بالا و پایین می باشد. فولاد زنگ نزن 304 به علت داشتن مقاومت بالا نسبت به خوردگی، در ساخت تجهیزات مورد استفاده در صنایع گاز، آب، نفت، هوافضا، پتروشیمی، نیروگاهی، غذایی، دارویی، ساختمانی و شیمیایی مورد استفاده قرار می گیرد. فولاد زنگ نزن 304 و برخی از فولادهای سری 300 که شامل 18 درصد کروم و 8 درصد نیکل

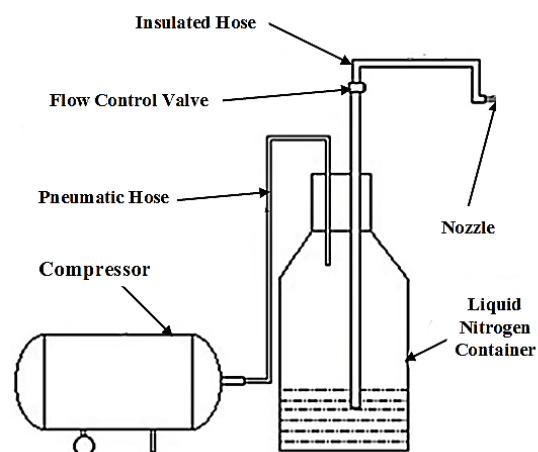


Fig. 1 Schematic of cryogenic cooling system equipment

شکل 1 شماتیک تجهیزات مورد نیاز سیستم خنک کاری تبریدی

جدول 1 خواص فولاد زنگ نزن 304 [13]

مقدار	پارامتر
0.3	ضریب پواسون
8000	چگالی (kg/m^3)
193	مدول الاستیک (GPa)
205	استحکام تسلیم (MPa)
515	استحکام کششی (MPa)
500	ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$)
16.2	ضریب انبساط حرارت ($^\circ\text{C}^{-1}$)

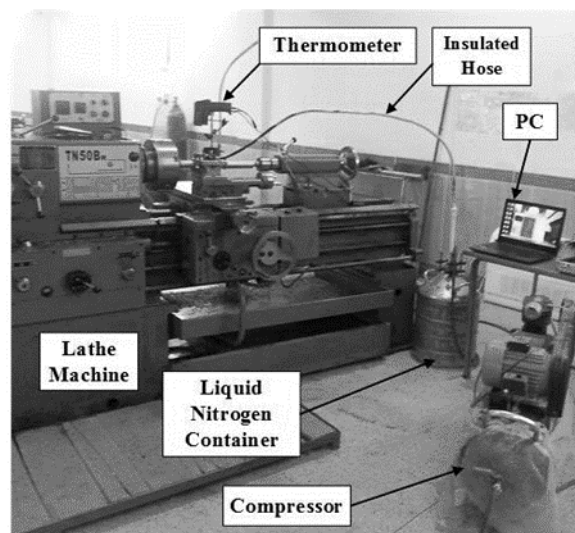


Fig. 4 Lathe machine and the used equipment for cryogenic cooling

شکل 4 دستگاه تراش و تجهیزات بکار رفته جهت خنک کاری تبریدی

جدول 3 پارامترهای ماشین کاری در آزمایش های تجربی

Table 3 Machining parameters in experimental tests

مقدار	پارامتر
55, 111, 219, 314	سرعت برشی (m/min)
0.2, 0.4	نرخ پیشروی (mm/rev)
1	عمق برش (mm)

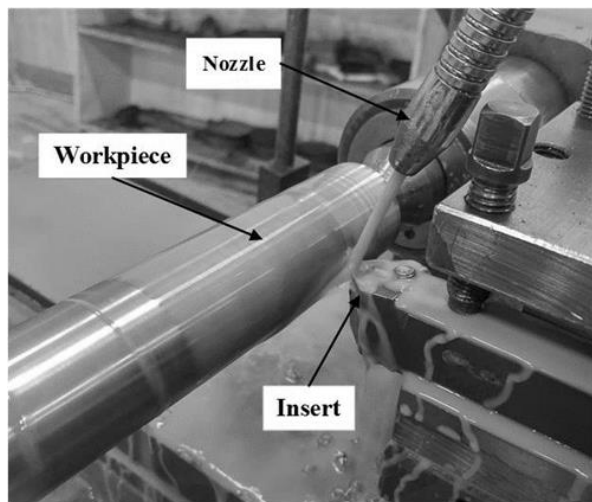


Fig. 5 Wet cooling

شکل 5 خنک کاری معمولی (تر)

آب در این روش از نوع RST 202 ساخت شرکت بتیس با درصد حجمی 0.05 است.

4- نتایج و بحث

4-1- دمای ابزار

دما مهم ترین عامل مؤثر بر عمر ابزار است. در حین فرایند ماشین کاری، حرارت در ناحیه اولیه و ثانویه تغییر شکل به وجود می آید. حرارت ایجاد شده در ناحیه برش ناشی از تغییر شکل پلاستیک مواد هنگام تشکیل براده و همچنین اصطکاک بین ابزار با براده و سطح قطعه کار است. میزان حرارت تولید شده به خواص فیزیکی و شیمیایی جنس ابزار و قطعه کار، سرعت برش،

جدول 2 ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن 304

Table 2 Chemical composition of 304 stainless steel

مقدار	عنصر
71.10	آهن
0.065	کربن
0.343	سیلیسیم
1.000	منگنز
0.005	فسفر
0.019	گوگرد
18.40	کروم
8.160	نیکل
0.011	آلومینیوم
0.009	کبالت
0.432	مس
0.007	تیتانیوم
0.070	وانادیوم
0.013	نیوبیم
< 0.02	تنگستن
0.231	مولیبدن

ترموتر، به عنوان دمای سطح ابزار منظور گردید. نحوه نصب این ترمومتر در شکل 3 نشان داده شده است. شکل 4، دستگاه تراش مدل TN50BR و تجهیزات جانبی برای انجام عملیات خنک کاری تبریدی پاششی را نشان می دهد. به منظور تصویربرداری از سطوح ابزار برشی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. پارامترهای ماشین کاری مورد استفاده در آزمایش های تجربی در جدول 3 ذکر شده است. انتخاب مقادیر پارامترهای برشی بر اساس پیشنهاد کارخانه سازنده ابزار و بررسی تحقیقات منتشر شده قبلی در مورد ماشین کاری فولاد 304 انجام شده است. هدف از این تحقیق، بررسی اثر سرعت برشی و نرخ پیشروی بر دما و سایش ابزار در حالت های مختلف خنک کاری است. همه ترکیبات ممکن از پارامترهای برشی مورد تست قرار گرفته است. در هر یک از حالت های ماشین کاری خشک، خنک کاری معمولی و خنک کاری تبریدی، 8 آزمایش و در مجموع 24 آزمایش انجام شده است. شکل 5 چگونگی انجام خنک کاری معمولی (تر) و سطح پاشش مخلوط آب صابون را نشان می دهد. روغن برش اضافه شده به

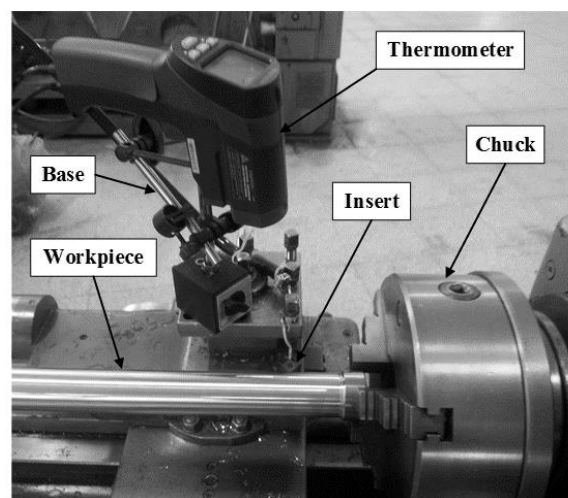


Fig. 3 Measurement of tool temperature by laser thermometer

شکل 3 نحوه اندازه گیری دمای ابزار توسط ترمومتر لیزری

کاهش دما در سرعت برشی 314 متر بر دقیقه در ماشین کاری تبریدی به مقدار 83% نسبت به ماشین کاری خشک مشاهده شده است. مقدار متوسط کاهش دما در نرخ پیشروی 0.4 میلی متر بر دور در فرایند تراش کاری تبریدی نسبت به حالت خشک و معمولی به ترتیب 79% و 65% است که تفاوت معناداری با میزان متوسط کاهش دما در نرخ پیشروی 0.2 میلی متر بر دور ندارد. مقایسه شکل های 7 و 8 نشان می دهد که در تراش کاری تبریدی تأثیر افزایش نرخ پیشروی بر افزایش دمای ابزار به مراتب کمتر از تراش کاری با خشک کار معمولی و خشک است. نکته ی قابل ذکر دیگر در مورد شکل های 7 و 8 آن است که روند افزایش دما با افزایش سرعت برشی در تراش کاری تبریدی یکنواخت است ولی در تراش کاری خشک و تراش کاری با خشک کار معمولی، با زیاد شدن سرعت برش مخصوصاً از 219 به 314 متر بر دقیقه، دما با شیب تندتری نسبت به سرعت های برشی کوچک تر افزایش می یابد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که تأثیر افزایش سرعت برشی بر دما در تراش کاری خشک و معمولی بیشتر از تراش کاری تبریدی است. نیتروژن مایع به علت قدرت خنک کنندگی بسیار زیاد، به طور مؤثر بر مناطق تولید حرارت اثر گذاشته و باعث کاهش دما می گردد. روند مشاهده شده در شکل های 7 و 8 با نتایج به دست آمده توسط سایر محققان [21,20] مطابقت دارد.

4-2- سایش ابزار

سایش ابزار باعث کند شدن آن و کاهش کیفیت براده برداری می شود. پایان عمر ابزار به جنس و هندسه ابزار برش، شرایط عمومی ماشین کاری، گیره بندی ابزار و پارامترهای برشی وابسته است. مکانیزم های مختلفی برای سایش ابزار وجود دارد که مهمترین آنها عبارتند از: ساییدگی، چسبندگی، نفوذ و اکسیداسیون. از معیارهای اندازه گیری عمر ابزار می توان به ارتفاع آستانه فرسایش و عمق گودال فرسایش اشاره کرد [8]. آستانه فرسایش در اثر اصطکاک بین سطح آزاد ابزار و سطح ماشین کاری شده به وجود می آید. گودال فرسایش در اثر تماس براده با سطح ابزار به صورت مقعر در روی سطح براده ابزار و نزدیک به لبه برنده اصلی شکل می گیرد. در این مقاله، معیار عمر ابزار ارتفاع آستانه فرسایش در حالت های مختلف خشک کاری بررسی شده است.

شکل 9 ارتفاع آستانه فرسایش در سرعت های برشی مختلف و نرخ های

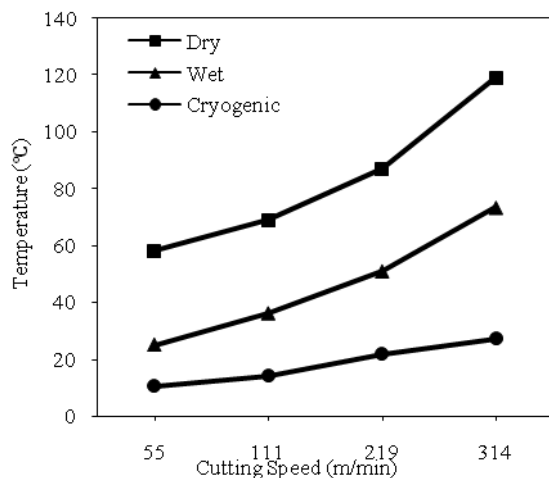


Fig. 7 Comparison of tool temperature in various cutting speeds under dry, conventional and cryogenic turning with 0.2 mm/rev feed rate

شکل 7 مقایسه دمای ابزار در سرعت های برشی مختلف در تراش کاری خشک، معمولی و تبریدی با نرخ پیشروی 0.2 میلی متر بر دور

عمق برش، نرخ پیشروی، مایع خنک کار و هندسه ابزار براده برداری بستگی دارد [14]. دما علاوه بر سایش ابزار، باعث تغییر شکل براده و کاهش کیفیت سطح قطعه کار می شود [15]. در آزمایش های تجربی انجام شده در این مطالعه، دمای سطح ابزار اندازه گیری شده است. در شکل 6 دمای ابزار در سرعت های برشی مختلف، عمق برش 1 میلی متر و دو نرخ پیشروی 0.2 و 0.4 میلی متر بر دور در حالت ماشین کاری خشک نشان داده شده است. در ماشین کاری خشک، با افزایش سرعت برشی، روند افزایش دما در هر دو نرخ پیشروی مذکور مشابه است. همان طور که در شکل 6 واضح است، دمای سطح ابزار مربوط به نرخ پیشروی 0.2 میلی متر بر دور در همه ی سرعت ها کمتر از نرخ پیشروی 0.4 میلی متر بر دور است. با افزایش نرخ پیشروی، سطح مقطع براده و در نتیجه، توان اصطکاکی تلف شده روی سطح ابزار افزایش می یابد [16]. این افزایش توان اصطکاکی هنگام براده برداری، دمای برشی در عملیات تراش کاری را افزایش می دهد. افزایش سرعت برشی نیز به دلیل افزایش نیروی اصطکاکی و نرخ کرنش در نواحی اولیه و ثانویه تغییر شکل، دمای برش را افزایش می دهد [17]. روند مشاهده شده در شکل 6 با یافته های سایر محققان مطابقت دارد [19,18].

شکل 7 دمای ابزار در سرعت های برشی مختلف با نرخ پیشروی 0.2 میلی متر بر دور در حالت های مختلف خشک کاری را نشان می دهد. با افزایش سرعت برشی از 55 تا 314 متر بر دقیقه، دمای ابزار در هر سه حالت خشک کاری افزایش یافته است. در حالت های مختلف خشک کاری، با افزایش سرعت، روند افزایش دما مشابه است ولی در هر سرعت، دمای ابزار برشی در خشک کاری تبریدی کمتر از خشک کاری معمولی و در خشک کاری معمولی کمتر از ماشین کاری خشک است. بیشترین کاهش دما در سرعت برشی 314 متر بر دقیقه در ماشین کاری تبریدی به مقدار 82% نسبت به ماشین کاری خشک مشاهده می شود. مقدار متوسط کاهش دما در نرخ پیشروی 0.2 میلی متر بر دور در خشک کاری تبریدی نسبت به حالت خشک و معمولی به ترتیب 78% و 60% است. در شکل 8، دمای ابزار با نرخ پیشروی 0.4 میلی متر بر دور در حالت های مختلف خشک کاری نشان داده شده است. در این حالت نیز با افزایش سرعت، روند دما افزایشی است و در هر سرعت، دمای ماشین کاری تبریدی کمتر از ماشین کاری خشک و معمولی است. بیشترین

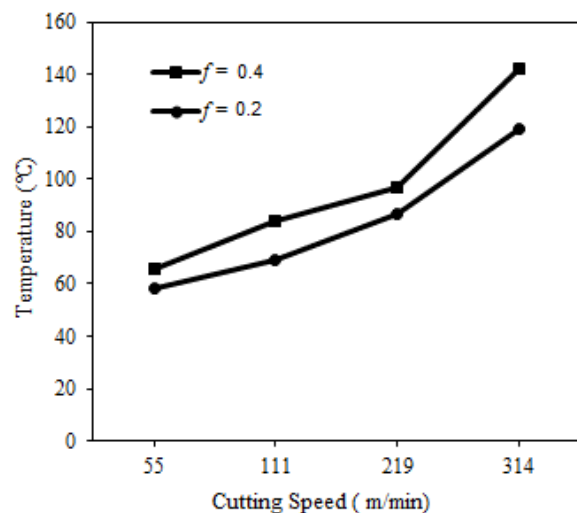


Fig. 6 Tool temperature in various cutting speeds and feed rates under dry turning

شکل 6 مقایسه دمای ابزار در سرعت های برشی و نرخ های پیشروی مختلف در تراش کاری خشک

0.4 میلی‌متر بر دور در فرایند تراش کاری تبریدی در مقایسه با تراش کاری خشک و معمولی به ترتیب 71% و 45% است. به نظر می‌رسد که نرخ پیشروی تأثیر معناداری بر میزان متوسط کاهش سایش ابزار در خنک کاری تبریدی نسبت به خنک کاری معمولی و خشک نداشته است.

3-4- آنالیز SEM

در شکل 12 تصویر ابزار پس از تراش کاری با سرعت برشی 314 متر بر دقیقه، نرخ پیشروی 0.2 میلی‌متر بر دور و عمق برش 1 میلی‌متر در حالت‌های مختلف خنک کاری نشان داده شده است. شکل 12 (a) مربوط به ماشین کاری خشک است. در این حالت، نوک ابزار دچار شکست شده و تغییر هندسه ابزار برش به وضوح قابل مشاهده است. مقدار ارتفاع آستانه فرسایش در حالت خشک 2150 میکرومتر است. شکل 12 (b) سایش ابزار در حالت

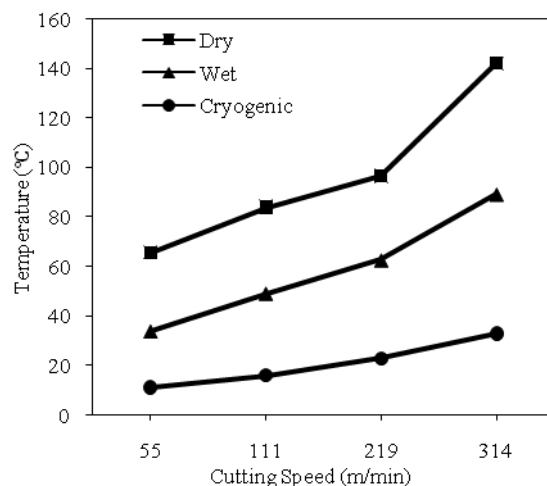


Fig. 8 Comparison of tool temperature in various cutting speeds under dry, conventional and cryogenic turning with 0.4 mm/rev feed rate

شکل 8 مقایسه دمای ابزار در سرعت‌های برشی مختلف در تراش کاری خشک، معمولی و تبریدی با نرخ پیشروی 0.4 میلی‌متر بر دور

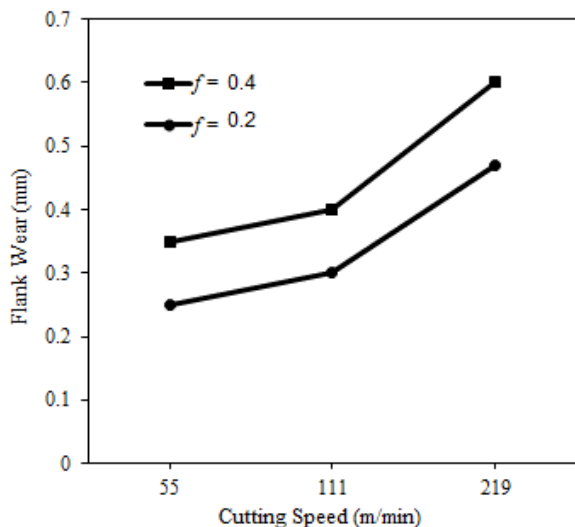


Fig. 9 Flank wear height of tool at different cutting speeds under dry turning

شکل 9 ارتفاع آستانه فرسایش ابزار در سرعت‌های برشی مختلف تحت تراش کاری خشک

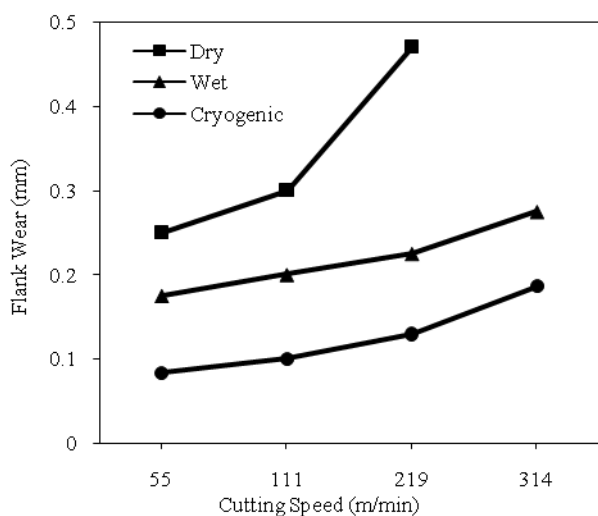
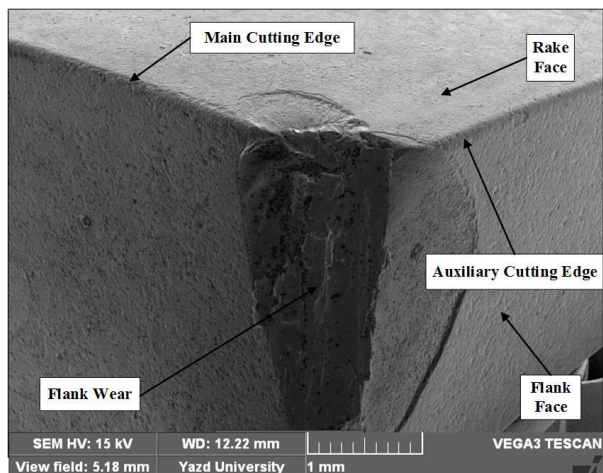


Fig. 10 Flank wear height of tool at different cutting speeds under dry, conventional and cryogenic turning in 0.2 mm/rev feed rate

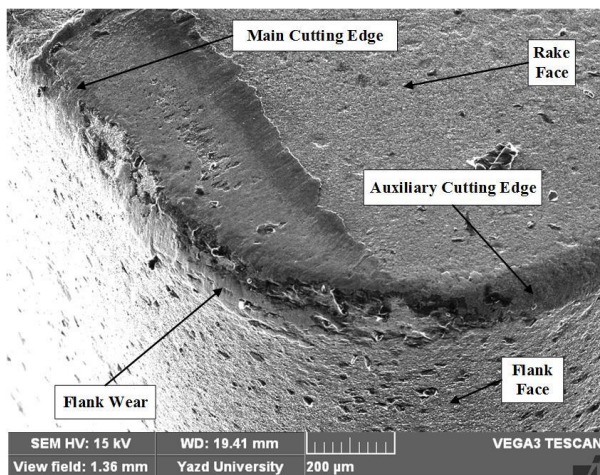
شکل 10 ارتفاع آستانه فرسایش ابزار در سرعت‌های برشی مختلف در تراش کاری خشک، معمولی و تبریدی با نرخ پیشروی 0.2 میلی‌متر بر دور

پیشروی 0.2 و 0.4 میلی‌متر بر دور را در حالت تراش کاری خشک نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سرعت‌های برشی و نرخ‌های پیشروی کوچک‌تر، سایش ابزار کمتر است. در ماشین کاری خشک با هر دو نرخ پیشروی آزمایش شده، در سرعت برشی 314 متر بر دقیقه ابزار دچار شکست فاجعه‌آمیز شد؛ به این دلیل، اطلاعات مربوط به ارتفاع آستانه فرسایش ابزار در تراش کاری خشک در سرعت برشی 314 متر بر دقیقه در شکل‌های 9 تا 11 ذکر نشده است. لازم به ذکر است که دمای ابزار مربوط به ماشین کاری خشک در سرعت برشی 314 متر بر دقیقه در شکل‌های 6 تا 8 حداکثر دمای اندازه‌گیری شده تا لحظه شکست ابزار را نشان می‌دهد. شکل 10 ارتفاع آستانه فرسایش در نرخ پیشروی 0.2 میلی‌متر بر دور در حالت‌های مختلف خنک کاری را نشان می‌دهد. با افزایش سرعت برشی، میزان سایش ابزار در همه حالت‌های خنک کاری افزایش یافته است. در هر سرعت برشی، میزان سایش ابزار در خنک کاری تبریدی کمتر از خنک کاری معمولی و در خنک کاری معمولی کمتر از ماشین کاری خشک است. مقدار متوسط کاهش سایش ابزار در نرخ پیشروی 0.2 میلی‌متر بر دور در تراش کاری تبریدی نسبت به تراش کاری خشک و معمولی به ترتیب 68% و 44% است. استفاده از نیتروژن مایع به عنوان خنک‌کار در تراش کاری تبریدی باعث کاهش دمای ناحیه برش و سایش ابزار نسبت به تراش کاری خشک و معمولی شده است. دمای پایین، مواد را سخت‌تر می‌کند و چسبندگی بین آن‌ها را کاهش می‌دهد [22]. با تشکیل لایه روانکار حاصل از تبخیر نیتروژن مایع و کاهش چسبندگی بین سطوح در فرایند خنک کاری تبریدی، اصطکاک کاهش پیدا می‌کند [12,6]. نیتروژن مایع به علت قدرت خنک‌کنندگی بالا و نقش مؤثر بر کاهش دمای ناحیه برش، علاوه بر حفظ سختی ابزار، از نرم شدن حرارتی ابزار نیز جلوگیری می‌کند [7]. لازم به ذکر است که بر خلاف تراش کاری خشک، براده‌برداری از قطعه کار با سرعت برشی 314 متر بر دقیقه بدون شکست لبه ابزار یا سایش بیش از حد انتظار، در تراش کاری تبریدی و معمولی انجام شده است. شکل 11 ارتفاع آستانه فرسایش در نرخ پیشروی 0.4 میلی‌متر بر دور در حالت‌های مختلف خنک کاری را نشان می‌دهد. روند مشاهده شده در اینجا نیز کاملاً مشابه شکل 10 با نرخ پیشروی 0.2 میلی‌متر بر دور است. مقدار متوسط کاهش سایش ابزار در نرخ پیشروی

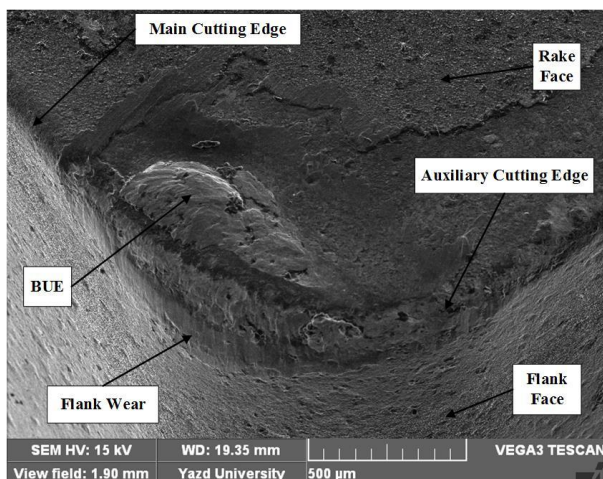
می‌دهد. مقدار ارتفاع آستانه فرسایش در تراش کاری تبریدی 427 میکرومتر است که نسبت به ماشین کاری خشک و معمولی کاهش یافته است. سایش در سطح آزاد و براده ابزار از طریق کنترل مکانیزم‌های سایش وابسته به دما



(a)



(b)



(c)

Fig. 12 Tool wear in different states of machining with 0.2 mm/rev feed rate, 314 m/min cutting speed and 1 mm depth of cut, a) dry, b) wet, c) cryogenic

شکل 12 سایش ابزار در حالت‌های مختلف ماشین کاری با نرخ پیشروی 0.2 میلی‌متر بر دور، سرعت برشی 314 متر بر دقیقه و عمق برش 1 میلی‌متر، (a) خشک، (b) معمولی، (c) تبریدی

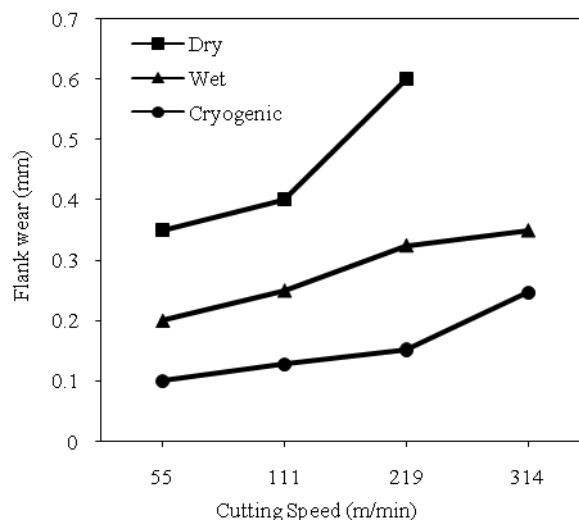


Fig. 11 Flank wear height of tool at different cutting speeds under dry, conventional and cryogenic turning in 0.4 mm/rev feed rate

شکل 11 ارتفاع آستانه فرسایش ابزار در سرعت‌های برشی مختلف در تراش کاری خشک، معمولی و تبریدی با نرخ پیشروی 0.4 میلی‌متر بر دور

خنک کاری معمولی را نشان می‌دهد. مقدار ارتفاع آستانه فرسایش در این حالت 275 میکرومتر است که نسبت به ماشین کاری خشک کاهش زیادی یافته است. در تراش کاری با خنک کاری معمولی، شکست و تغییر هندسه ابزار برش مشاهده نمی‌شود.

شکل 12 (c) سایش ابزار در حالت خنک کاری تبریدی را نشان می‌دهد. مقدار ارتفاع آستانه فرسایش در ماشین کاری تبریدی 427 میکرومتر است که به علت تأثیر نیتروژن مایع بر فرایند و کنترل مکانیزم‌های سایش وابسته به دما، نسبت به ماشین کاری خشک و معمولی کاهش یافته است. در ماشین کاری تبریدی، شکست ابزار برش رخ نداده ولی تشکیل لبه انباشته روی سطح اینسرت قابل مشاهده است. لبه انباشته می‌تواند باعث کاهش کیفیت سطح گردد. لبه انباشته در تراش کاری معمولی در سرعت‌های برشی نسبتاً پایین تشکیل می‌شود [23]. ولی در خنک کاری تبریدی، همان‌گونه که در شکل 12 (c) مشاهده می‌شود، در یک سرعت برشی بسیار بیشتر نسبت به تراش کاری معمولی به وجود آمده است. دلیل این رفتار، رسیدن دمای برش در سرعت برشی 314 متر بر دقیقه و نرخ پیشروی 0.2 میلی‌متر بر دور به دمایی است که برای تشکیل لبه انباشته مناسب است. در تراش کاری خشک و معمولی، شرایط مناسب دمایی برای تشکیل لبه انباشته در سرعت‌های برشی کمتر اتفاق می‌افتد. در شکل 13 سایش ابزار در سرعت برشی 314 متر بر دقیقه، نرخ پیشروی 0.4 میلی‌متر بر دور و عمق برش 1 میلی‌متر در حالت‌های مختلف خنک کاری نشان داده شده است. تفاوت شکل‌های 12 و 13 در مقدار نرخ پیشروی است. شکل 13 (a) مربوط به حالت خشک است. در این حالت نیز مانند شکل 12 (a)، ابزار دچار شکست فاجعه‌آمیز شده و تغییر هندسه ابزار برش به‌وضوح قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل 13 (a) مشاهده می‌شود، گودال فرسایش نیز بر روی سطح ابزار به وجود آمده است. گودال فرسایش به‌واسطه تغییر مکانیزم سایش از ساییدگی به نفوذ، به علت افزایش دما در ناحیه ی برش به وجود می‌آید. شکل 13 (b) مربوط به حالت خنک کاری معمولی است. مقدار ارتفاع آستانه فرسایش در این حالت 350 میکرومتر است که نسبت به ماشین کاری خشک کاهش یافته است. در خنک کاری معمولی، شکست ابزار برش مشاهده نمی‌شود. شکل 13 (c) سایش ابزار در حالت خنک کاری تبریدی را نشان

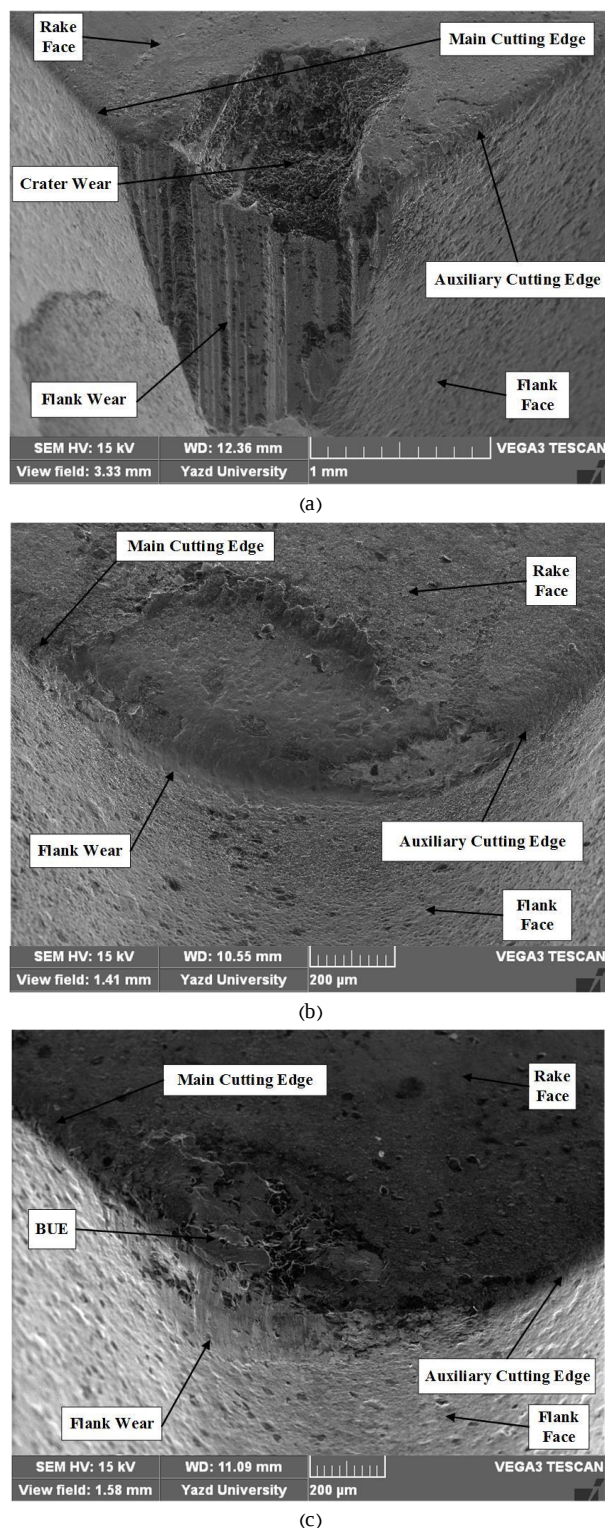


Fig. 13 Tool wear in different states of machining with 0.4 mm/rev feed rate, 314 m/min cutting speed and 1 mm depth of cut, a) dry, b) wet, c) cryogenic

شکل 13 سایش ابزار در حالت‌های مختلف ماشین کاری با نرخ پیشروی 0.4 میلی‌متر، سرعت برشی 314 متر بر دقیقه و عمق برش 1 میلی‌متر، (a) خشک، (b) معمولی، (c) تبریدی

از نمودار اثرهای اصلی میانگین‌ها می‌توان برای تعیین شرایط بهینه و مشاهده نحوه اثر متغیرهای ورودی بر پاسخ خروجی استفاده کرد. در شکل 14 اثرهای اصلی میانگین‌ها روی دمای سطح ابزار نشان داده شده است. در شکل 14،

در خنک کاری تبریدی کاهش می‌یابد [8,15].

در خنک کاری تبریدی و معمولی، شکست و تغییر هندسه ابزار برش رخ نداده و گودال فرسایش روی سطح ابزار مشاهده نمی‌شود. در شکل 13 (c) نیز مانند شکل 12 (c) لبه انباشته بر روی سطح براده ابزار تشکیل شده است ولی ارتفاع آن به دلیل افزایش 20 درصدی دما با زیاد شدن نرخ پیشروی از 0.2 به 0.4 میلی‌متر بر دور و در نتیجه نرم‌تر شدن لبه انباشته، کاهش یافته است. شرایط تشکیل لبه انباشته علاوه بر سرعت برشی، به جنس قطعه کار و نرخ پیشروی نیز وابسته است [24].

4-4 آنالیز واریانس

از آنالیز واریانس می‌توان برای بررسی تأثیر یک یا چند عامل ورودی بر یک متغیر خروجی یا پاسخ استفاده کرد. ایده اصلی آنالیز واریانس مبتنی بر نمایش میزان کل تغییرات یک مجموعه آماری، به صورت جمع چند عبارت است که بتوان هر یک را به منشأ خاصی از تغییرات نسبت داد. در این پژوهش از آنالیز واریانس برای بررسی میزان تأثیر سرعت برشی و نرخ پیشروی بر دما و سایش ابزار در حالت‌های مختلف خنک کاری استفاده شده است. آنالیز واریانس به کمک نرم‌افزار مینی‌تپ و با در نظر گرفتن سرعت برشی، حالت روان کاری (خشک، معمولی و تبریدی) و نرخ پیشروی به عنوان پارامترهای ورودی و دما و سایش ابزار به عنوان متغیر پاسخ انجام گردید. جدول 4، آنالیز واریانس برای دمای ابزار را نشان می‌دهد که R^2 ضریب تعیین صحت، $R^2(\text{adj})$ ضریب تعیین صحت تصحیح شده و S خطای استاندارد برآورد شده است. R^2 معیاری برای بررسی صحت مدل است و هرچه بزرگتر باشد میزان خطای مدل کمتر است. R^2 معرف درصد تغییراتی است که توسط مدل توضیح داده می‌شود و بیان می‌کند که مدل چند درصد از داده‌ها را پوشش داده است. $R^2(\text{adj})$ چون به جای استفاده از مجموع مربعات از میانگین مربعات استفاده می‌کند، نسبت به R^2 دقیق‌تر است. مطابق آنالیز واریانس انجام شده در جدول 4، میزان تأثیر سرعت برشی، نرخ پیشروی و حالت روان کاری بر دمای ابزار برشی به ترتیب 24.58، 1.82 و 67.97 درصد و میزان صحت آنالیز 99.73 درصد است. علاوه بر اثر جداگانه هر پارامتر، اثر همزمان پارامترها نیز بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حالت روان کاری بیشترین تأثیر و اثر همزمان سرعت برشی و حالت روان کاری کمترین تأثیر را بر دمای ابزار دارد.

جدول 4 آنالیز واریانس برای دمای ابزار

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار تأثیر
سرعت برشی	3	7214.4	2404.81	24.58%
نرخ پیشروی	1	533	532.98	1.82%
حالت روان کاری	2	19945.7	9973.73	67.97%
سرعت برشی × نرخ پیشروی	3	72.2	24.07	0.25%
سرعت برشی × حالت روان کاری	6	1404	234.01	4.78%
نرخ پیشروی × حالت روان کاری	2	153.6	76.82	0.52%
خطا	6	20.9	3.48	0.07%
مجموع	23	29345.7		100%
$R^2(\text{adj}) = 99.73\%$		$R^2 = 99.93\%$		$S = 1.866$

که مشاهده می‌شود، روند تغییر سایش ابزار با افزایش سرعت برشی و نرخ پیشروی افزایشی است و سایش در سطح آزاد ابزار با افزایش سرعت برشی از 219 به 314 متر بر دقیقه، با شیب تندتری افزایش یافته است. در شکل 15 سهم بیشتر سرعت برشی و حالت روان کاری نسبت به نرخ پیشروی در سایش ابزار برشی به خوبی قابل مشاهده است. با تغییر حالت روان کاری از تبریدی به تر و معمولی میزان سایش ابزار افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار اثر اصلی میانگین‌ها کمترین سایش در سطح آزاد ابزار در سرعت برشی 55 متر بر دقیقه، نرخ پیشروی 0.2 میلی‌متر بر دور و حالت ماشین کاری تبریدی به وجود می‌آید. کمترین مقدار سایش ابزار طبق نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها تجربی برابر با 84 میکرومتر می‌باشد

5- نتیجه گیری

در این مقاله، تأثیر سرعت برشی و نرخ پیشروی بر دما و سایش ابزار در حالت‌های تراش کاری خشک، تراش کاری با خنک کاری معمولی و تبریدی روی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 304 با ابزار کاربیدی، بررسی و مقایسه شده است. مهمترین نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:

- افزایش سرعت برشی و نرخ پیشروی در حالت‌های مختلف خنک کاری باعث افزایش دمای برش و ارتفاع آستانه فرسایش در سطح آزاد ابزار شده است.
- متوسط دمای ابزار در عملیات خنک کاری تبریدی در مقایسه با ماشین کاری خشک و معمولی به ترتیب 79 و 62 درصد کاهش یافته است. تأثیر افزایش سرعت برشی بر افزایش دما و سایش ابزار در تراش کاری خشک و معمولی بیشتر از تراش کاری تبریدی است.
- در ماشین کاری تبریدی، ارتفاع آستانه فرسایش در سطح آزاد ابزار به طور متوسط به ترتیب 70 و 45 درصد نسبت به حالت ماشین کاری خشک و خنک کاری معمولی کاهش نشان داد. تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهد که مکانیزم‌های سایش ابزار در حالت‌های مختلف روان کاری متفاوت است.
- براده برداری در سرعت برشی 314 متر بر دقیقه با هر دو نرخ پیشروی 0.2 و 0.4 میلی‌متر بر دور در حالت خشک منجر به شکست ابزار شد؛ ولی در حالت تبریدی و معمولی، به شکل مناسبی انجام گردید.
- آنالیز واریانس داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های تجربی نشان داد که حالت روان کاری و سرعت برشی به ترتیب مهمترین عامل مؤثر بر دما و سایش ابزار هستند و پس از آن‌ها، نرخ پیشروی تأثیر اندکی دارد.

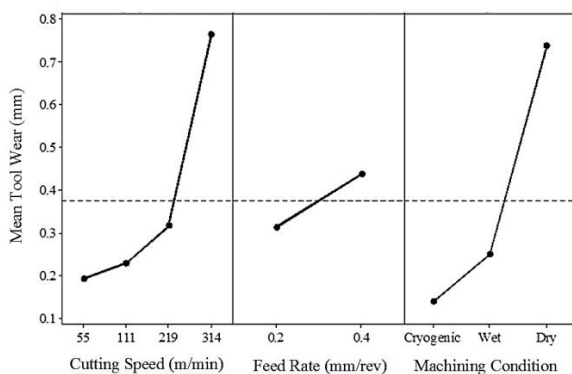


Fig. 15 Main effects plot for means on cutting tool wear

شکل 15 اثرهای اصلی میانگین‌ها روی سایش ابزار

محور X مقادیر میانگین پارامترهای ورودی (سرعت برشی، نرخ پیشروی و حالت روان کاری) و محور Y میانگین دمای ابزار را نشان می‌دهد. طبق شکل 14، روند تغییر دما با افزایش سرعت برشی و نرخ پیشروی افزایشی است و سهم سرعت برشی در افزایش دما بسیار بیشتر از نرخ پیشروی می‌باشد. با تغییر حالت روان کاری از تبریدی به تر و معمولی میزان دمای سطح ابزار افزایش می‌یابد. میزان تأثیر حالت روان کاری بر دمای ابزار بیشتر دو پارامتر دیگر یعنی سرعت برشی و نرخ پیشروی می‌باشد. با توجه به نمودار، کمترین دما در سرعت برشی 55 متر بر دقیقه، نرخ پیشروی 0.2 میلی‌متر بر دور و حالت ماشین کاری تبریدی به وجود می‌آید. کمترین مقدار دما طبق نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها تجربی برابر با 10.6 درجه سانتی‌گراد است.

در جدول 5، آنالیز واریانس برای سایش ابزار نشان داده شده است. مطابق آنالیز واریانس انجام شده میزان تأثیر سرعت برشی، نرخ پیشروی و حالت روان کاری بر دمای ابزار برشی به ترتیب 25.83، 1.90 و 33.26 درصد و میزان صحت آنالیز 91.77 درصد است. حالت روان کاری بیشترین تأثیر و اثر همزمان سرعت برشی و نرخ پیشروی کمترین تأثیر را بر سایش ابزار داشته‌اند.

در شکل 15 اثرهای اصلی میانگین‌ها روی سایش ابزار نشان داده شده است. محور X مقادیر میانگین پارامترهای ورودی (سرعت برشی، نرخ پیشروی و حالت روان کاری) و محور Y میانگین سایش ابزار را نشان می‌دهد. همان‌طور

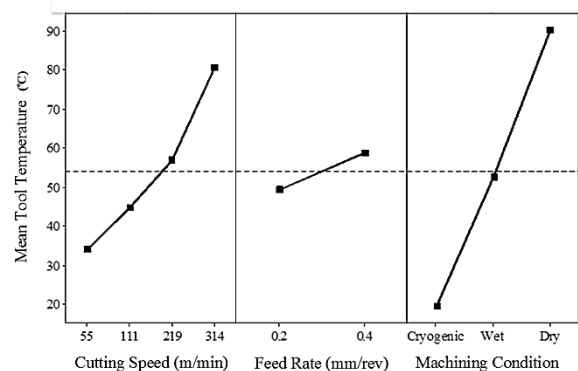


Fig. 14 Main effects plot for means on cutting tool temperature

شکل 14 اثرهای اصلی میانگین‌ها روی دمای ابزار برشی

جدول 5 آنالیز واریانس برای سایش ابزار

Table 5 Analysis of variance for tool wear

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار تأثیر
سرعت برشی	3	1.24	0.41	25.83%
نرخ پیشروی	1	0.092	0.092	1.90%
حالت روان کاری	2	1.670	0.809	33.26%
سرعت برشی × نرخ پیشروی	3	0.066	0.022	1.38%
سرعت برشی × حالت روان کاری	6	1.643	0.273	33.99%
نرخ پیشروی × حالت روان کاری	2	0.071	0.035	1.49%
خطا	6	0.103	0.017	2.15%
مجموع	23	4.8345		100%
S = 0.131 R ² = 97.85% R ² (adj) = 91.77%				

6- مراجع

- processes, *Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 1, pp. 947-964, 2008.
- [13] X. M. Anthony, M. Adithan, Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 1, pp. 900-909, 2009.
- [14] M. B. Silva, J. Wallbank, Cutting temperature prediction and measurement methods a review, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 88, No. 1, pp. 195-202, 1999.
- [15] M. Dhananchezian, M. kumar, T. Sornakumar, cryogenic turning of AISI 304 stainless steel with modified tungsten carbide tool inserts, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 26, No. 1, pp.781-785, 2011.
- [16] M. C. Shaw, *Metal Cutting Principles*, pp.213-272, London: Oxford University Press, 1984.
- [17] S. Sulaiman, A. Roshan, S. Borazjani, Effect of cutting parameters on tool-chip interface temperature in an orthogonal turning process, *Advanced Materials Research*, Vol. 903, No. 1, pp 21-26, 2014.
- [18] M. Dhananchezian, M. kumar, T. Sornakumar, cryogenic turning of AISI 304 stainless steel with modified tungsten carbide tool inserts, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 26, No. 1, pp. 781-785, 2011.
- [19] M. Sarikaya, V. Yilmaz, A. Gullu, Analysis of cutting parameters and cooling/lubrication methods for sustainable machining in turning of Haynes 25 superalloy, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 133, No. 1, pp. 172-181, 2016.
- [20] S. Y. Hong, Y. Ding, Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, No. 1, pp. 1417-1437, 2001.
- [21] N. R. Dhar, S. Paul, A. B. Chattopadhyay, Machining of AISI 4140 steel under cryogenic cooling-tool wear, surface roughness and dimensional deviation, *Journal of Materials processing technology*, Vol. 123, No. 1, pp. 483-489, 2002.
- [22] S. Y. Hong, Y. Ding, W. C. Jeong, Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, No. 1, pp. 2271-2285, 2001.
- [23] G. Boothroyd, W. A. Knight, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Second Edition, pp. 78-135, New York: CRC Press, 2005.
- [24] E. M. Trent, P. K. Wright, *Metal Cutting*, Fourth Edition, pp. 21-104, New York: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [1] P. Degarmo, J. T. Black, A. K. Ronald, *Materials and Processes in Manufacturing*, Tenth Edition, pp.560-562, New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [2] N. R. Dhar, M. Kamruzzaman, Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, No. 1, pp. 754-759, 2007.
- [3] K. A. Venugopal, S. Paul, A. B. Chattopadhyay, Tool wear in cryogenic turning of Ti-6Al-4V alloy, *Cryogenics*, Vol. 47, No. 1, pp. 12-18, 2007.
- [4] Z. Y. Wang, K. P. Ragurkar, J. Fan, G. Petrescu, cryogenic machining of tantalum, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 4, No. 2, pp. 122-127, 2002.
- [5] S. K. Choudhury, K. V. Kalyan, Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, No. 1, pp. 95-101, 2008.
- [6] M. Dhananchezian, M. P. Kumar, Cryogenic turning of the Ti-6Al-4V alloy with modified cutting tool inserts, *Cryogenics*, Vol. 51, No. 1, pp. 34-40, 2011.
- [7] M. Sunil, A. S. Kumar, V. G. Yoganah, C. K. Srinivasa, T. GuruMurthy, Evaluation of tool life and cutting forces in cryogenic machining of hardened steel, *Procedia Materials Science*, Vol. 5, No. 1, pp. 2542-2549, 2014.
- [8] M. K. Gupta, G. Singh, P. K. Sood, Experimental investigation of machining AISI 1040 medium carbon steel under cryogenic machining: a comparison with dry machining, *Journal of The Institution of Engineers*, Vol. 96, No. 4, pp. 373-379, 2015.
- [9] Y. Sun, B. Huang, D. A. Puleo, I. S. Jawahir, Enhanced machinability of Ti-5553 alloy from cryogenic machining: comparison with MQL and flood-cooled machining and modeling, *Procedia CIRP*, Vol. 31, No. 1, pp. 477-482, 2015.
- [10] I. Lee, V. Bajpai, S. Moon, Tool life improvement in cryogenic cooled milling of the preheated Ti-6Al-4V, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 79, No. 1, pp. 665-673, 2015.
- [11] S. Y. Hong, M. Broomer, Economical and ecological cryogenic machining of AISI 304 austenitic stainless steel, *Clean Products and Processes*, Vol. 2, No. 1, pp. 157-166, 2000.
- [12] Y. Yildiz, M. Nalbant, A review of cryogenic cooling in machining