



## Effect of Cryogenic Machining (Turning) of AISI 440C Stainless Steel on Roughness, Hardness, Chip Morphology and Tool Wear Pattern

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Mozaffari E<sup>1</sup>, MSc,  
Amini S<sup>1\*</sup>, Phd

#### How to cite this article

Mozaffari E, Amini S. Effect of Cryogenic Machining (Turning) of AISI 440C Stainless Steel on Roughness, Hardness, Chip Morphology and Tool Wear Pattern. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(6):415-428.

<sup>1</sup> Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, Kashan University, Kashan, Iran.

#### \*Correspondence

Address: Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, Kashan University, Kashan, Iran.  
Phone: +98 (31) 55912497  
Fax: +98 (31) 55511121  
amini.s@kashanu.ac.ir

#### Article History

Received: August 03, 2020  
Accepted: December 19, 2020  
ePublished: May 28, 2021

### ABSTRACT

Nowadays, Cryogenic Machining has received a lot of attention due to the increasing demand for environmentally friendly production processes. Many studies show that the use of cryogenic machining using liquid nitrogen (LN<sub>2</sub>) leads to an increase in tool life, improved shear speed, and material extraction rate compared to other conventional cooling methods such as shear fluid and MQL. In this research, the effect of cryogenic machining is investigated on the roughness and hardness of AISI 440C stainless steel. The results showed that using cryogenic machining, the surface roughness of AISI 440C stainless steel was significantly reduced even at a high feed rate. The morphology of the chips showed that with the use of cryogenic machining, the surface burn and the accumulation of materials on the inner surface of the chips have been significantly reduced. In this study, it was found that in cryogenic machining, the tool wear pattern is the erosion pit on the chip surface and has increased the tool life by 400% compared to the dry machining.

**Keywords** Cryogenic Machining, Liquid Nitrogen, AISI 440C Stainless Steel, Roughness, Hardness, Tool Wear

### CITATION LINKS

[1] Determination of Tool Temperature in Orthogonal Metal Cutting by... [2] Experimental study of the effect of cryogenic cooling on... [3] Comparing Cooling and Lubricating Effects of... [4] Review of the cryogenic machining in... [5] Experimental investigation of external surface... [6] Analysis of the vertical moving table... [7] The effect of cryogenic cooling on surface... [8] Cryogenic machining of SS304 steel... [9] Cutting temperature, tool wear, surface... [10] A review on cryogenic machining of... [11] Investigation of turning elastomers... [12] The influence of cryogenic cooling on tool... [13] Machining of AISI 4140 steel under... [14] Beneficial effects of cryogenic cooling... [15] Improved surface integrity from cryogenic... [16] Investigation of machining parameters and... [17] Hybrid machining of Inconel 718. [18] A New Approach of Applying Cryogenic Coolant in... [19] <https://www.astmsteel.com/product/440c-stainless-steel-aisi>. [20] Friction and cutting forces in cryogenic... [21] Methods of applying cutting fluids [22] Cryogenic machining. [23] Cooling approaches and cutting temperatures in... [24] Cryogenic machining, surface integrity and... [25] Effect of Process Factors on Surface Roughness in... [26] Metal Cutting Theory and... [27] Prediction of surface roughness and... [28] On-line prediction of surface finish and... [29] On effect of cryogenic cooling on... [30] Cryogenic machining-induced surface... [31] Effects of cutting parameters on... [32] sub-zero-treatment-of-steels-technology... [33] A review of cryogenic... [34] Deep Cryogenic treatment of a D2... [35] Correlation between surface roughness and... [36] Experimental investigation of surface... [37] Fundamentals of Machining and Machine Tools. [38] Metal Cutting. [39] New observations on tool life... [40] Machinability investigation of Inconel... [41] Cryogenic turning of AISI 304 stainless steel with modified tungsten carbide tool inserts.

## تاثیر فرایند ماشین‌کاری (تراشکاری) برودتی فولاد زنگ‌زن AISI 440C بر زبری سطح، سختی، شکل‌شناسی براده و طول عمر ابزار

ابراهیم مظفری MSc

کارشناسی ارشد، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه  
کاشان، کاشان، ایران

سعید امینی PhD\*

دکتری، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان،  
کاشان، ایران

### چکیده

امروزه فرایند ماشین‌کاری برودتی با توجه به افزایش تقاضا برای فرآیندهای تولید سازگار با محیط زیست، بسیار مورد توجه جامعه ماشین‌کاری قرار گرفته است. تحقیقات بسیاری نشان می‌دهد استفاده از فن‌آوری نوین خنک‌کاری برودتی با استفاده از نیتروژن مایع LN2، منجر به افزایش طول عمر ابزار، بهبود سرعت برشی و نرخ برداشت مواد نسبت به سایر روش‌های متداول خنک‌کاری همچون سیال برشی و MQL می‌شود. در این تحقیق تاثیر فرایند ماشین‌کاری برودتی فولاد زنگ‌زن AISI 440C بر زبری سطح، سختی سطحی، پروفیل سختی در عمق، شکل‌شناسی براده و طول عمر ابزار در مقایسه با ماشین‌کاری خشک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با استفاده از ماشین‌کاری برودتی، زبری سطح فولاد زنگ‌زن AISI 440C حتی در سرعت پیشروی بالا به میزان قابل توجهی کاهش و صافی سطح بهبود یافته است. در مبحث شکل‌شناسی براده مشخص شد با تسهیل شرایط ماشین‌کاری در فرایند برودتی در یک سرعت برشی و سرعت پیشروی یکسان، میزان سوختگی سطحی براده و میزان چروکیدگی و انباشت مواد در سطح داخلی براده به طور قابل توجهی کاهش یافته است. همچنین نتایج تحقیق نشان داد الگوی سایش ابزار در ماشین‌کاری برودتی، گودال فرسایش در سطح براده بوده و باعث افزایش ۴۰۰ درصدی طول عمر ابزار در شرایط یکسان ماشین‌کاری نسبت به روش خشک شده است.

**کلیدواژه‌ها:** ماشین‌کاری برودتی، نیتروژن مایع، فولاد زنگ‌زن AISI 440C، زبری سطح، میکروسختی‌سنجی، سایش ابزار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۹

\*نویسنده مسئول: amini.s@kashanu.ac.ir

### ۱- مقدمه

یکی از مشکلات فرایند ماشین‌کاری، حرارت شدید ایجاد شده در منطقه برش است [1]. در ماشین‌کاری معمولی از سیال برشی به عنوان خنک‌کننده و روانکار به منظور کاهش دما و بهبود عمر ابزار استفاده می‌شود [2,3]. درجه حرارت بالای برش را می‌توان با استفاده از خنک‌کننده برودتی به جای خنک‌کننده‌های معمولی به خوبی کنترل کرد. در ماشین‌کاری برودتی برای از بین بردن حرارت ناحیه برش از نیتروژن مایع LN2 یا دی‌اکسید کربن CO2 استفاده می‌شود [4].

فولاد زنگ‌زن AISI 440C یکی از مواد متداول در ساخت انواع اسپول اسلیو [5]، بلبرینگ‌های دوران بالای فوق‌دقیق [6]، شیرهای خودکار با درجه هوایی (Electro Hydraulic Servo Valve)، قطعات

شیر توپی، ابزارهای اندازه‌گیری دقیق و بسیاری از قطعات مورد استفاده در صنایع تکنولوژی بالا که به دلیل سختی و مقاومت به سایش زیاد، تولید محصولاتی با کیفیت سطحی بالا که مشخصه اصلی این گروه از محصولات است، به روش ماشین‌کاری از آن بسیار مشکل است. به نظر می‌رسد یکی از بهترین روش‌ها برای رفع این مشکل، بهره‌گیری از عملیات ماشین‌کاری برودتی است؛ چرا که قابلیت دستیابی به یکپارچگی سطح مطلوب با کاهش دمای برش حین ماشین‌کاری فراهم شده و منجر به افزایش کیفیت و عملکرد محصولات می‌شود [7]. تحقیقات نشان می‌دهد قابلیت کارسختی فولاد زنگ‌زن به همراه خواص مکانیکی و حرارتی ویژه آن منجر به سایش شدید ابزار و کیفیت پایین سطح ماشین‌کاری می‌شود. در این حالت عمر ابزار به دلیل دمای بالای براده‌برداری در منطقه برش طی ماشین‌کاری به سرعت کاهش می‌یابد. بعلاوه ماشین‌کاری منجر به کیفیت سطحی نامطلوب با زبری سطح بسیار زیاد و تغییرات ریزساختاری شدید ناشی از شکستن لبه ابزار می‌شود. از این رو به نظر می‌رسد استفاده از ماشین‌کاری برودتی می‌تواند جهت رفع بسیاری از موانع موجود در عملیات ماشین‌کاری فولادهای زنگ‌زن موثر باشد. در ماشین‌کاری معمولی استفاده از سیال برشی به عنوان خنک‌کننده رایج به دلیل وجود ترکیبات شیمیایی خاص در سیال ممکن است منجر به آلودگی آب و خاک شده و سلامتی بشر را با چالش روبه‌رو سازد؛ در حالی که ماشین‌کاری برودتی با بهره‌گیری از گازهای خنک‌کننده بی‌اثر بدون ایجاد آلودگی برای محیط زیست، یک فن‌آوری نوظهور است که می‌تواند بر بسیاری از مشکلات خنک‌کننده‌های رایج غلبه نماید [8,9]. در ماشین‌کاری برودتی یک عامل فوق سرد همچون نیتروژن مایع جهت کاهش دمای برش و با هدف سرد کردن ابزار و قطعه‌کار به منطقه برش هدایت می‌شود [10,11]. عامل برودتی، گرمای منطقه برش را جذب کرده و در هوا تبخیر می‌شود. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های استفاده از ماشین‌کاری برودتی، کاهش زبری سطح و دستیابی به کیفیت سطحی مطلوب از طریق کاهش دمای منطقه برش است. اثر ماشین‌کاری برودتی بر پارامترهای سطحی مواد مختلف شامل یکپارچگی و زبری سطح توسط پژوهشگران مختلف از جمله ده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [12,13].

در فرایند ماشین‌کاری با افزایش سرعت برشی، مقدار زبری سطح کاهش می‌یابد؛ در حالی که افزایش سرعت پیشروی، منجر به افزایش زبری سطح می‌شود. از طرفی مشخصات ابزار مورد استفاده شامل شکل اینسرت، شعاع دماغه و نوع براده‌شکن اینسرت نیز بر میزان زبری سطح تاثیرگذار است؛ بطوری که با افزایش عمق سایش در سطح براده ابزار، صافی سطح محصول کاهش می‌یابد. همچنین عامل خنک‌کننده در ماشین‌کاری نیز با کنترل دمای منطقه برش، دمای ابزار و دمای قطعه‌کار به شدت بر میزان زبری سطح محصولات ماشین‌کاری شده تاثیرگذار است [14]. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که ماشین‌کاری برودتی نه تنها می‌تواند شرایط مورد نیاز برای بدست آوردن دقت ابعادی و هندسی مورد نظر را فراهم کند، بلکه قادر است ویژگی‌های سطحی مانند افزایش سختی و

جدول ۱) تعیین عناصر جزئی ناخالص (درصد وزنی) از آنالیز طیف سنجی

عنصر	S	P	Mo	Cr	Ni	Mn	Si	C
درصد وزنی	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۷۵	۱۸	۱	۱	۱	۱/۲

جدول ۲) خواص فیزیکی فولاد زنگ‌نزن AISI 440C [19]

مقاومت الکتریکی (nW.m)	۶۰۰
گرمای ویژه (J/Kg.K) (0-100°C)	۴۶۰
هدایت حرارتی (W/m.K)	۵۰۰°C
هدایت حرارتی (W/m.K)	۱۰۰°C
میانگین ضریب انبساط حرارتی (mm/m/C)	۱۱/۷
میانگین ضریب انبساط حرارتی (mm/m/C)	۱۰/۳
میانگین ضریب انبساط حرارتی (mm/m/C)	۱۰/۱
مدول الاستیک (GPa)	۲۰۰
دانسیته (Kg/m3)	۷۶۵۰

### ۲-۱-۲- دستگاه ماشین‌ابزار

جهت انجام عملیات ماشین‌کاری از ماشین‌تراش CNC مدل KIA TURN 28 محصول کشور کره جنوبی استفاده شد.

### ۲-۳-۱- مخزن نیتروژن

به دلیل برودت دمایی بسیار شدید نیتروژن مایع، لازم است از فلاسک مخصوص جهت نگهداری آن استفاده شود. بدین منظور طراحی و ساخت فلاسک نیتروژن مایع مجهز به سیستم انتقال سیال برودتی در دستور کار قرار گرفت. این مخزن به صورت دوجداره، طراحی و ساخته شد؛ بطوری که در ساخت جداره داخلی آن از فولادزنگ نزن AISI 316 و برای ساخت جداره خارجی آن از فولاد St37 استفاده گردید. جهت اتصال اجزاء مخزن از جوش آرگون با الکتروستیل استفاده شد. بر پایه مطالعات انجام شده جهت عایق‌بندی بین دو جداره، محیط خلا انتخاب گردید. برای این منظور فضای بین دو جداره با استفاده از پمپ خلا به مدت ۱۵ دقیقه با فشار 1-bar تخلیه شده و پس از آن جهت اطمینان از عدم شکست خلا به مدت ۱۵ دقیقه مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین جهت اتصال مخزن به پمپ خلا از سیستم ترکیبی شیر و کویلینگ مخصوص آب‌بندی استفاده شد. نمونه فلاسک ساخته شده جهت نگهداری نیتروژن مایع مجهز به مانومتر فشار در شکل ۱ و گزارش آزمون خلا انجام شده بر آن در پیوست ۱ ارائه شده است. یکی از چالش‌های اصلی در ماشین‌کاری برودتی، رساندن صحیح و مناسب نیتروژن مایع به منطقه براده‌برداری است. در این تحقیق از سیستم نشان داده شده در شکل ۲ جهت پمپاژ نیتروژن به منطقه برش استفاده شد. به دلیل محدودیت‌های فشار در کمپرسورهای متداول صنعتی در این پروژه در مواقع مورد نیاز، از کپسول هوای پرفشار جهت تامین فشار مورد نیاز برای پاشش نیتروژن استفاده گردید.

تصویر کپسول هوای فشرده مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۳-الف و نحوه تجهیز ماشین تراش به این مخزن در شکل ۳-ب نشان داده شده است.

کاهش ناهمواری سطح را نیز به همراه داشته باشد [15]. استفاده از ماشین‌کاری برودتی منجر به کاهش دمای برش می‌شود. همین امر میزان چسبندگی بین سطح قطعه کار و سطح آزاد جانبی ابزار را کاهش داده و منجر به سایش کمتر ابزار می‌شود. بدین ترتیب با کاهش سایش ابزار، زبری سطح پس از ماشین‌کاری نیز کاهش می‌یابد [16]. سیال معمول خنک‌کننده در ماشین‌کاری ممکن است تا حدی ابزار و قطعه کار را خنک کند، اما نمی‌تواند بطور موثری در فصل مشترک براده-ابزار که دما بالاست، وظایف خود را به خوبی انجام دهد؛ زیرا براده‌های بعدی با سطح براده ابزار تماس داشته و اجازه نفوذ مناسب در فصل مشترک را نمی‌دهند.

وانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۲ میلادی دریافتند که با استفاده از خنک‌کاری برودتی در تراشکاری می‌توان به میزان قابل‌توجهی عمر ابزار و کیفیت سطح را افزایش داد. بر اساس گزارش آن‌ها عمر ابزار تا ۳۰۰ درصد افزایش و کیفیت سطح تا ۲۰۰ درصد بهبود می‌یابد. سرمای نیتروژن مایع بر ابزار برشی حین تراشکاری اینکونل ۷۱۸، افزایش ۱۷۰ درصدی عمر ابزار و کاهش ۲۵۰ درصدی زبری سطح را به همراه داشته است [17]. ماشین‌کاری مواد سخت همچون فولادهای پرآلیاژ و AISI 304، معمولاً سطح نهایی ضعیف، سایش ابزار نامنظم، لبه انباشته و شکست زودرس ابزار را موجب می‌شود [18]. با بررسی پیشینه تحقیق مشخص شد که تاکنون پژوهشی در حوزه تاثیر ماشین‌کاری برودتی بر پارامترهای ماشین‌کاری فولاد زنگ‌نزن AISI 440C صورت نگرفته است. از این‌رو در پژوهش حاضر اثر ماشین‌کاری برودتی فولاد زنگ‌نزن AISI 440C تحت تاثیر نیتروژن مایع بر زبری، سختی سطح، پروفیل سختی در عمق، شکل‌شناسی براده و الگوی سایش ابزار به دقت مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در ابتدا آماده‌سازی فرآیند، شامل ساخت مخزن حمل و نگهداری نیتروژن مایع با تکیه بر طراحی و ساخت کاملاً بومی و داخلی انجام گرفت. اتصالات، سیستم ایمنی فشارشکن، سیستم پمپ نیتروژن از مخزن به محل ماشین‌کاری، اصلاح ابزارگیر، طراحی و ساخت و نصب نازل پاشش نیتروژن و لوله‌های انتقال سیال برودتی انجام و روی ماشین ابزار نصب شد. آزمون‌های تجربی با پارامترهای برشی مختلف انجام و در نهایت با انجام آزمون‌های زبری‌سنجی، میکروسختی‌سنجی در سطح و میکروسختی‌سنجی در عمق، مبحث شکل‌شناسی براده و طول عمر ابزار در ماشین‌کاری برودتی نسبت به ماشین‌کاری خشک مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با استخراج نمودارهای مربوطه، تحلیل و بررسی نتایج به طور دقیق انجام شد.

### ۲- روش آزمایش

#### ۲-۱-۲- مواد و تجهیزات مورد نیاز

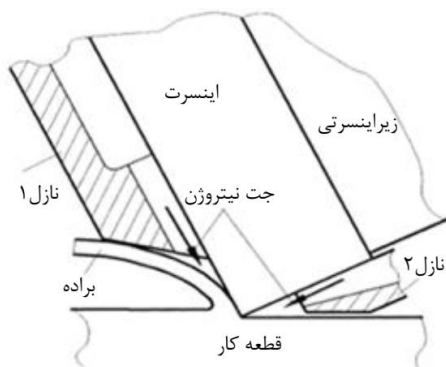
#### ۲-۱-۱- ماده قطعه کار

در این تحقیق از فولاد زنگ‌نزن AISI 440C به دلیل کاربرد بسیار زیاد آن در صنایع هوایی، استفاده شد. ترکیب شیمیایی فولاد AISI 440C در جدول ۱ و خواص فیزیکی آن در جدول ۲ ارائه شده است.



**شکل ۳ (الف)** کیسول هوا جهت تامین فشار هوای مورد نیاز در پمپ نیتروژن در فشارهای بالاتر از ۸ بار (ب) دستگاه تراش CNC مجهز به مخزن و پمپ نیتروژن مایع

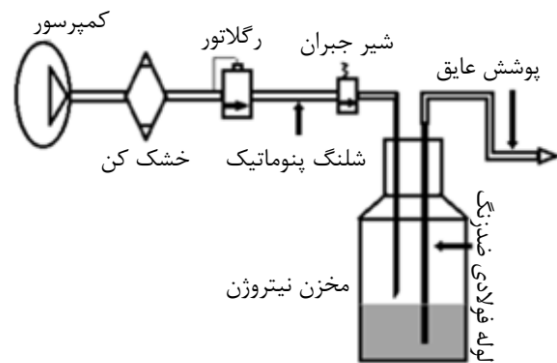
پاشش صحیح نیتروژن روی سطوح ابزار در منطقه برش بسیار حائز اهمیت است. بدین منظور می‌بایست با اعمال تغییراتی در هولدر ماشین‌کاری، تجهیزات لازم را برای اتصال لوله انتقال نیتروژن و هدایت صحیح سیال ایجاد نمود. از آنجا که مایع برودتی نمی‌تواند در ماشین ابزار تراشکاری کرده و دوباره استفاده شود؛ بنابراین کمینه کردن مصرف سیال برودتی از نظر اقتصادی بسیار مهم است. بر این اساس لازم است جذب و نفوذ سیال برودتی به طور دقیق در نقطه مورد نظر صورت گیرد. به منظور پاشش مایع برودتی به منطقه برش دو روش معمول وجود دارد: (۱) استفاده از یک نازل خروجی و (۲) تغییرات در ابزار برشی و هولدر [20]. در یک کار تحقیقاتی اکسیر یک سوراخ در سطح کناری ابزار کاربایدی برای اصلاح مسیر پاشش سیال برودتی به منطقه برش ایجاد کرد [21]. در پژوهشی دیگر هونگ یک براده‌شکن و یک نازل را یک‌پارچه کرد و دستگاه پاشش نوآورانه LN2 را برای انجام اهداف خود ایجاد نمود [22]. تحقیقات تجربی هونگ و دینگ نشان داد که موثرترین روش برای اسپری کردن سیال برودتی، پاشش همزمان روی هر دو سطح براده و جانبی مطابق شکل ۴ است تا سایش جانبی و گودال فرسایش سطح براده را پوشش دهد. تحقیقات آن‌ها نشان داد اثر خنک کننده بر سطح براده بیش‌تر از سطح جانبی است [23]. در



**شکل ۴** شماتیک نازل پاشش همزمان بر سطح براده و جانبی [23]



**شکل ۱** فلاسک ساخته شده در تحقیق حاضر مخصوص نگهداری نیتروژن مایع مجهز به مانومتر فشار



**شکل ۲** شماتیک سیستم پمپ مخزن برودتی جهت پاشش نیتروژن مایع به محل ماشین‌کاری

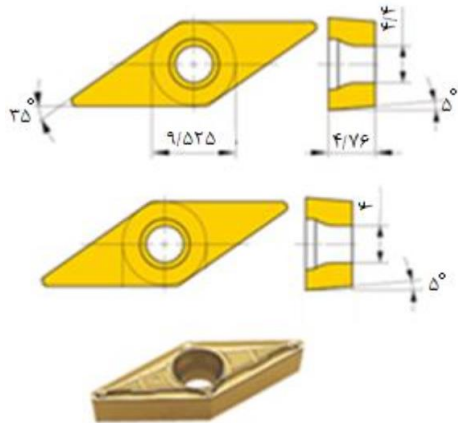
مطابق شکل ۲ پمپاژ سیال درون مخزن به منطقه برش با استفاده از ایجاد فشار هوا روی سطح سیال صورت می‌گیرد. این فشار از طریق لوله‌ای از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI 304 با قطر داخلی ۱۰ میلی‌متر که از یک طرف، خارج از سطح سیال و در داخل مخزن قرار دارد و از طرف دیگر به یک کمپرسور تامین فشار متصل است، ایجاد می‌شود. اجزائی مانند خشک‌کن و رگولاتور فشار، اجزاء استاندارد کمپرسور هستند. همچنین جهت حصول اطمینان از عدم ایجاد فشار زیاد درون مخزن، یک شیر تخلیه فشار روی درب مخزن تعبیه شده است. فشار هوای ایجاد شده روی سیال باعث هدایت آن به داخل لوله‌ای با مشخصات مذکور می‌شود.

مطابق شکل ۳ جهت انتقال نیتروژن مایع از مخزن تا محل براده‌برداری از لوله قطر ۱۰ میلی‌متر از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI 304 استفاده شد. مهم‌ترین نکته در این بخش، اتلاف نیتروژن مایع از طریق جداره لوله حین انتقال است. جهت جلوگیری از این اتلاف از عایق‌های حرارتی و لوله‌های دو جداره عایق شده توسط خلا استفاده شد.

#### ۱-۲-۴- ابزارگیر

به منظور نگهداشتن ابزار جهت عملیات تراشکاری از هولدر به عنوان ابزارگیر استفاده شد. در ماشین‌کاری برودتی





شکل ۶) اینسرت VBMT160408 مورد استفاده در فرایند ماشین کاری خشک و برودتی AISI 440C

### ۲-۲- روش انجام کار

در طراحی و انتخاب مقادیر سرعت برشی از نرم افزار "کوروگاید" (CoroGuide) ساخت شرکت "کرومانت سندویک" (SANDVIK Coromant) سوئد به عنوان سازنده ابزار برشی مورد استفاده در این تحقیق بهره گرفته شد. از طرفی چون نوع عملیات، پرداخت کاری در نظر گرفته شده و R نوک ابزار نیز ۰/۴ میلی متر پیشنهاد شده است، عمق برش در محدوده ماشین کاری پرداخت ثابت نگه داشته شد و دو پارامتر مهم دیگر ماشین کاری مورد آزمایش قرار گرفت (پیوست ۲).

از این میان با توجه به تاثیر بیش تر سرعت برشی بر زبری سطح، تمرکز اصلی طراحی آزمایشها بر تغییرات سرعت برشی متمرکز شده است. همچنین از آنجا که یکی از اهداف تحقیق بررسی زبری سطح و تاثیر خنک کاری برودتی بر آن بوده بطوری که در صنعت بیشترین تمرکز بر زبری سطح در مرحله پرداخت کاری است و عملاً در بیشتر مواقع زبری سطح پایین در مرحله پرداخت کاری مورد توجه قرار می گیرد، لذا نوع ابزار انتخابی نیز با هندسه براده شکن MF که در استاندارد ISO مخصوص براده برداری خانواده مواد M یعنی فولادهای زنگ نزن و نوع عملیات F یعنی پرداخت کاری (Finishing) است، در نظر گرفته شد و پارامترهای ماشین کاری نیز برای این منظور لحاظ گردید. از طرفی با تمرکز بر مقالات سایر پژوهشگران، دریافت می شود که اکثر تحقیقات در این حوزه معطوف به عملیات پرداخت کاری بوده است [24,25]. بنابراین شرایط برشی اتخاذ شده در تحقیق حاضر مطابق جدول ۳ انتخاب شد.

### ۲-۳- آنالیزها و آزمون های مورد نیاز

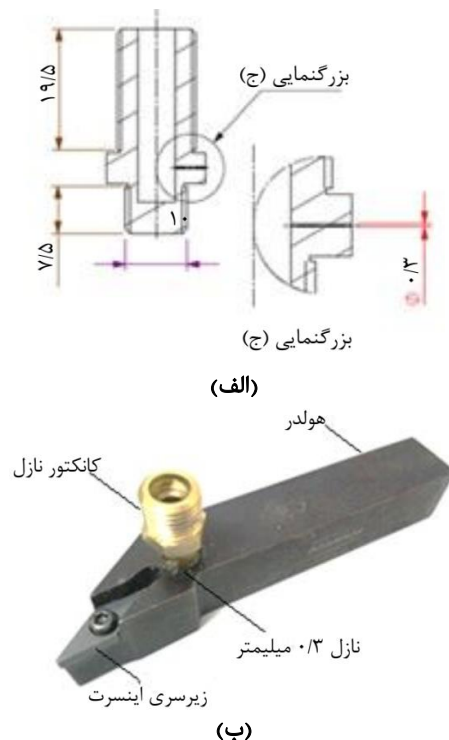
برای اندازه گیری مقادیر زبری، از دستگاه زبری سنج مدل MahrSurf PS1 ساخت شرکت Mahr آلمان استفاده گردید. جهت افزایش اطمینان از صحت نتایج، اندازه گیری زبری از سه منطقه روی سطح انجام و میانگین مقادیر حاصله گزارش شد. همچنین جهت تعیین سختی سطحی و بدست آوردن پروفیل سختی در

پژوهش حاضر جهت انتقال و پاشش دقیق نیتروژن مایع بر منطقه برش نیز نازل مخصوص بر سطح هولدر در امتداد لبه برش مطابق شکل ۵ طراحی و تعبیه شد. همان طور که در شکل ۵-الف نشان داده شده است، این سیستم برای اسپری نیتروژن مایع روی سطح براده و یا سطح جانبی ابزار برشی طراحی شده است. براده شکن کمک می کند تا براده ها را بالا ببرد و اجازه دهد که LN2 به طور موثر در محل تماس ابزار و براده نفوذ کند. بنابراین مطابق شکل ۵-ب از یک آداپتور برنجی و یک نازل جهت اتصال لوله حاوی نیتروژن و پاشش صحیح سیال به سطح براده استفاده شد.

این رابط برنجی از طریق پیچ انتهایی M10 روی بدنه هولدر نصب و با روزه ۱/۲ اینچ سمت مقابل به رابط انتهایی لوله استیل انتقال نیتروژن مایع متصل گردید. روی بدنه آداپتور سوراخی به قطر ۰/۳ میلی متر با استفاده از روش سوپر دریل ایجاد شد تا نیتروژن مایع از طریق آن روی سطح براده اسپری گردد. قطر کوچک تر در این نازل موجب کاهش دبی خروجی و قطر بزرگ تر باعث بوجود آمدن عدم تمرکز سیال روی سطح براده می شود. بدست آوردن قطر سوراخ نازل در این تحقیق بصورت تجربی صورت گرفت.

### ۲-۱-۵- اینسرت

جهت انجام این تحقیق از اینسرت VBMT160408 با پوشش TiN به عنوان ابزار ماشین کاری استفاده شد که مشخصات ابعادی و تصویر آن در شکل ۶ ارائه شده است. این نوع اینسرت با کد ۱۰۲۵ و براده شکن MF محصول شرکت سندویک کرومانت مخصوص عملیات پرداخت روی فولادهای زنگ نزن است.



شکل ۵) الف) نقشه اجرایی نازل ساخته شده جهت نصب روی هولدر، ب) هولدر SVJBR2020 مجهز شده به نازل مخصوص جهت انتقال و پاشش نیتروژن مایع در این تحقیق

ضخامت براده تغییر شکل یافته و براده تغییر شکل نیافته، نسبت برش (نسبت براده) جهت درک بهتر تحلیل‌های انجام شده ارائه گردید.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- زبری سطح

اندازه‌گیری زبری سطح در دو حالت Ra و Rz در شرایط مختلف صورت گرفت که نتایج حاصل از آن در جدول ۴ گزارش شده است. جهت حذف خطاهای احتمالی اندازه‌گیری، هر نمونه سه بار تحت آزمون زبری‌سنجی قرار گرفت و میانگین مقادیر حاصله گزارش شد. با مقایسه نتایج بدست آمده مشخص می‌شود، مقادیر زبری سطح در محصول ماشین‌کاری شده با استفاده از خنک‌کننده برودتی بسیار کمتر از شرایط مشابه در حالت خشک است. نتایج بدست آمده از آزمون زبری‌سنجی فولاد AISI 440C ماشین‌کاری شده به دو روش خشک و برودتی مورد مقایسه قرار گرفت. شکل‌های ۷-الف و ۷-ب مقادیر زبری سطح با نرخ پیشروی ۰/۰۹ میلی‌متر بر دور را بر اساس Ra و Rz مقایسه می‌کند. ویژگی‌های سطح از دو بخش، شامل دقت ابعادی یا هندسی و سطح پایانی تشکیل می‌شود. در حالی که دقت ابعادی یا هندسی از هندسه و حرکات ابزار تاثیر می‌گیرد، کیفیت سطح پایانی می‌تواند ناشی از ارتعاشات، سایش ابزار یا تشکیل لبه انباشته و غیره باشد [26]. انحراف یا عدم دقت ابعادی به عنوان تفاوت بین عمق برش اعمال شده و عمق برش بدست آمده تعیین می‌شود [27] و قطر کار تمام شده به طور کلی با پیشروی ماشین‌کاری از مقدار مورد نظر خود خارج می‌شود. دقت تحت تأثیر نیروهای برش و سختی ابزار برش، نگهدارنده ابزار و تجهیزات قید و بند قطعه است [28]. سطح نهایی نیز می‌تواند تحت تأثیر سختی و دقت ابزار قرار گیرد. در چنین شرایطی، مقادیر غیر ایده‌آل، با درجه حرارت برش بالا و خنک‌کننده ناکافی ارتباط دارد [29]. بسیاری از مطالعات قبلی گزارش می‌دهند که خنک‌سازی برودتی در فرآیندهای مختلف برداشت مواد از جمله تراشکاری، فرزکاری، سوراخکاری و سنگ‌زنی، کیفیت سطح قطعات ماشین‌کاری شده را در مقایسه با سایر روش‌های خنک‌کاری بهبود می‌دهد.

به طور کلی، بهبود کیفیت سطح با ماشین‌کاری برودتی را می‌توان به موارد زیر نسبت داد:

- ماشین‌کاری برودتی در مقایسه با ماشین‌کاری خشک در براده‌برداری مواد سخت برش، سایش ابزار را کاهش می‌دهد.
- ماشین‌کاری برودتی از ایجاد لبه انباشته جلوگیری کرده و یا آن را کاهش می‌دهد.
- خنک‌کننده برودتی اثر دما را کاهش داده، به طوری که منجر به کاهش اعوجاج حرارتی روی سطح ماشین‌کاری می‌شود [30].

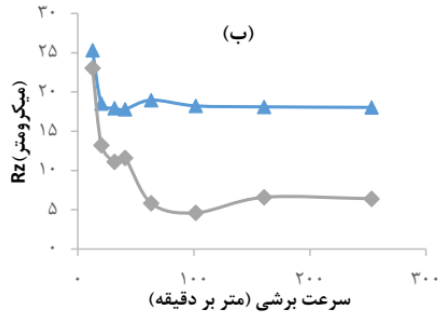
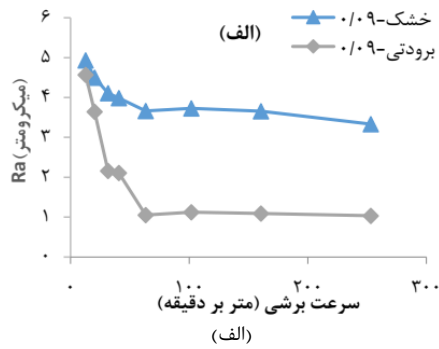
جدول ۳) شرایط برشی اتخاذ شده برای آزمایش در تحقیق حاضر

کد نمونه	نوع فرایند	سرعت برشی (متر بر دقیقه)	دوران (دور بر دقیقه)	پیشروی (میلی‌متر بر دور)
۱	خشک	۱۲/۶	۵۶	۰/۰۹
۲	خشک	۲۰/۳	۹۰	۰/۰۹
۳	خشک	۳۱/۶	۱۴۰	۰/۰۹
۴	خشک	۴۰/۷	۱۸۰	۰/۰۹
۵	خشک	۶۳/۳	۲۸۰	۰/۰۹
۶	خشک	۱۰۱/۷	۴۵۰	۰/۰۹
۷	خشک	۱۶۰/۵	۷۱۰	۰/۰۹
۸	خشک	۲۵۳/۲	۱۱۲۰	۰/۰۹
۹	برودتی	۱۲/۶	۵۶	۰/۰۹
۱۰	برودتی	۲۰/۳	۹۰	۰/۰۹
۱۱	برودتی	۳۱/۶	۱۴۰	۰/۰۹
۱۲	برودتی	۴۰/۷	۱۸۰	۰/۰۹
۱۳	برودتی	۶۳/۳	۲۸۰	۰/۰۹
۱۴	برودتی	۱۰۱/۷	۴۵۰	۰/۰۹
۱۵	برودتی	۱۶۰/۵	۷۱۰	۰/۰۹
۱۶	برودتی	۲۵۳/۲	۱۱۲۰	۰/۰۹
۱۷	خشک	۱۲/۶	۵۶	۰/۱۸
۱۸	خشک	۲۰/۳	۹۰	۰/۱۸
۱۹	خشک	۳۱/۶	۱۴۰	۰/۱۸
۲۰	خشک	۴۰/۷	۱۸۰	۰/۱۸
۲۱	خشک	۶۳/۳	۲۸۰	۰/۱۸
۲۲	خشک	۱۰۱/۷	۴۵۰	۰/۱۸
۲۳	خشک	۱۶۰/۵	۷۱۰	۰/۱۸
۲۴	خشک	۲۵۳/۲	۱۱۲۰	۰/۱۸
۲۵	برودتی	۱۲/۶	۵۶	۰/۱۸
۲۶	برودتی	۲۰/۳	۹۰	۰/۱۸
۲۷	برودتی	۳۱/۶	۱۴۰	۰/۱۸
۲۸	برودتی	۴۰/۷	۱۸۰	۰/۱۸
۲۹	برودتی	۶۳/۳	۲۸۰	۰/۱۸
۳۰	برودتی	۱۰۱/۷	۴۵۰	۰/۱۸
۳۱	برودتی	۱۶۰/۵	۷۱۰	۰/۱۸
۳۲	برودتی	۲۵۳/۲	۱۱۲۰	۰/۱۸

عمق نمونه از دستگاه میکروسختی‌سنجی مدل Mitutoyo MVK-H1 ساخت کشور ژاپن استفاده گردید. به منظور بدست آوردن پروفیل تغییرات سختی، انجام آزمون میکروسختی‌سنجی در عمق نمونه‌ها با استفاده از دستگاه مذکور در دستور کار قرار گرفت. بدین‌منظور ابتدا قطعات به روش گرم، مانع شده و پس از پولیش سطح ماشین‌کاری شده روی آن‌ها صورت گرفت. جهت مشاهده شکل براده‌ها و بررسی مقدماتی طول عمر ابزار از دستگاه اندازه‌گیری ویدیویی VMM مدل YF-3020T محصول شرکت Yihui چین بهره گرفته شد. بررسی مقدماتی طول عمر ابزار نیز با مقایسه وضعیت اینسرت، پس از ماشین‌کاری خشک و برودتی تحت شرایط یکسان (سرعت پیشروی ۰/۱۸ میلی‌متر بر دور و سرعت برشی متوسط ۱۰۱ متر بر دقیقه) روی فولاد زنگ‌نزن AISI 440C به قطر ۷۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با اندازه‌گیری

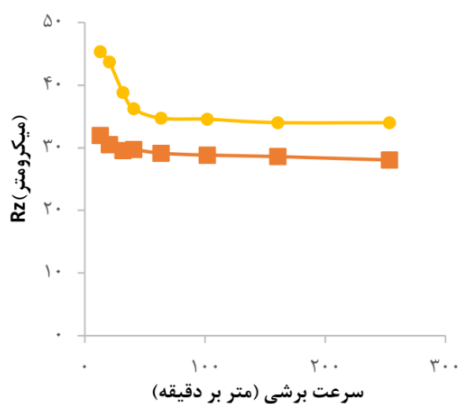
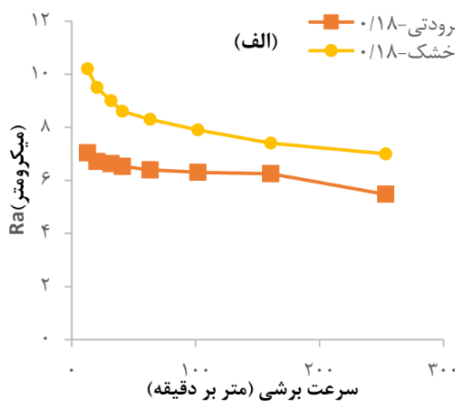
جدول ۴) گزارش زبری سطح از سطوح ماشین کاری شده فولاد زنگ نزن AISI 440C

کد نمونه	نوع فرایند	سرعت برشی (متر بر دقیقه)	دوران (دور بر دقیقه)	پیشروی (میلی متر بر دور)	R <sub>am</sub> (میکرومتر)	Rz <sub>m</sub> (میکرومتر)
۱	خشک	۱۲/۶	۵۶	۰/۰۹	۴/۹۳	۲۵/۳۳
۲	خشک	۲۰/۳	۹۰	۰/۰۹	۴/۵	۱۸/۵۳
۳	خشک	۳۱/۶	۱۴۰	۰/۰۹	۴/۱۱	۱۷/۹۳
۴	خشک	۴۰/۷	۱۸۰	۰/۰۹	۳/۹۹	۱۵/۲۶
۵	خشک	۶۳/۳	۲۸۰	۰/۰۹	۳/۶۶	۱۸/۹۶
۶	خشک	۱۰۱/۷	۴۵۰	۰/۰۹	۳/۷	۱۸/۲۳
۷	خشک	۱۶۰/۵	۷۱۰	۰/۰۹	۳/۶۵	۲۱/۸۳
۸	خشک	۲۵۳/۲	۱۱۲۰	۰/۰۹	۳/۳۳	۱۹/۵۶
۹	برودتی	۱۲/۶	۵۶	۰/۰۹	۴/۵۷	۲۳/۰۳
۱۰	برودتی	۲۰/۳	۹۰	۰/۰۹	۳/۶	۳/۷۴
۱۱	برودتی	۳۱/۶	۱۴۰	۰/۰۹	۲/۱۵	۱۱/۱۰
۱۲	برودتی	۴۰/۷	۱۸۰	۰/۰۹	۲/۱	۱۱/۶۰
۱۳	برودتی	۶۳/۳	۲۸۰	۰/۰۹	۱/۰۵	۵/۸۳
۱۴	برودتی	۱۰۱/۷	۴۵۰	۰/۰۹	۱/۱۲	۴/۶۱
۱۵	برودتی	۱۶۰/۵	۷۱۰	۰/۰۹	۱/۰۹	۶/۵۹
۱۶	برودتی	۲۵۳/۲	۱۱۲۰	۰/۰۹	۱/۰۳	۶/۴۱
۱۷	خشک	۱۲/۶	۵۶	۰/۱۸	۱۰/۲	۴۵/۳۳
۱۸	خشک	۲۰/۳	۹۰	۰/۱۸	۹/۵	۴۳/۶۷
۱۹	خشک	۳۱/۶	۱۴۰	۰/۱۸	۹	۳۵/۸۱
۲۰	خشک	۴۰/۷	۱۸۰	۰/۱۸	۸/۶	۲۸/۲۲
۲۱	خشک	۶۳/۳	۲۸۰	۰/۱۸	۸/۳	۲۶/۷۳
۲۲	خشک	۱۰۱/۷	۴۵۰	۰/۱۸	۷/۹	۲۴/۰۷
۲۳	خشک	۱۶۰/۵	۷۱۰	۰/۱۸	۷/۴	۲۳/۱۸۸
۲۴	خشک	۲۵۳/۲	۱۱۲۰	۰/۱۸	۷	۲۲/۱
۲۵	برودتی	۱۲/۶	۵۶	۰/۱۸	۷/۰۳	۳۱/۹۶
۲۶	برودتی	۲۰/۳	۹۰	۰/۱۸	۶/۷	۲۸/۵۳
۲۷	برودتی	۳۱/۶	۱۴۰	۰/۱۸	۶/۶	۲۹/۵۳
۲۸	برودتی	۴۰/۷	۱۸۰	۰/۱۸	۶/۵	۲۹/۷۰
۲۹	برودتی	۶۳/۳	۲۸۰	۰/۱۸	۶/۳۹	۲۹/۱۳
۳۰	برودتی	۱۰۱/۷	۴۵۰	۰/۱۸	۶/۳	۲۱/۵۵
۳۱	برودتی	۱۶۰/۵	۷۱۰	۰/۱۸	۶/۲۵	۳۱/۰۷
۳۲	برودتی	۲۵۳/۲	۱۱۲۰	۰/۱۸	۵/۴۷	۲۸/۸۰



(ب)

شکل ۷) تغییرات زبری الف (Ra و ب) Rz بر اساس Vc برای فولاد زنگ نزن AISI 440C ماشین کاری شده با دو روش خشک و برودتی با سرعت پیشروی ۰/۰۹ میلی متر بر دور



(ب)

شکل ۸) تغییرات زبری الف (Ra و ب) Rz بر اساس Vc برای فولاد زنگ نزن AISI 440C ماشین کاری شده با دو روش خشک و برودتی با سرعت پیشروی ۰/۱۸ میلی متر بر دور

بر این اساس و بر پایه نمودارهای به دست آمده از زبری سنجی، می توان نتیجه گرفت افزایش سرعت برشی تاثیر زیادی بر بهبود زبری سطح در ماشین کاری فولاد زنگ نزن AISI 440C دارد. مقایسه مقادیر زبری سطح در ماشین کاری خشک و برودتی با عمق برش ثابت (۰/۵ میلی متر) و سرعت پیشروی ۰/۰۹ میلی متر بر دور، بهبود قابل توجه زبری سطح در ماشین کاری برودتی نسبت به ماشین کاری خشک را نشان می دهد. در ماشین کاری برودتی با سرعت پیشروی ۰/۰۹ میلی متر بر دور با افزایش ۲۰ برابری سرعت برشی، زبری سطح حدود ۴۰ درصد بهبود یافت. مقادیر زبری سطح اندازه گیری شده بر اساس Ra و Rz با سرعت پیشروی ۰/۱۸ میلی متر بر دور به ترتیب در شکل های ۸-الف و ۸-ب نشان داده شده است.

این در حالی است که با نرخ پیشروی ۰/۱۸ میلی‌متر بر دور تغییر زیادی در مقدار سختی سطحی قطعه کار نسبت به ماشین‌کاری خشک دیده نمی‌شود. لوییس ویلفردو هرناندس و همکارانش نشان دادند که حرارت در فرآیند ماشین‌کاری موجب کاهش ۲۱ درصدی سختی در ماشین‌کاری خشک فولاد زنگ‌نزن AISI 304 شده است<sup>[31]</sup>. این بدان معناست که حرارت می‌تواند مکانیزم کارسختی در ماشین‌کاری را خنثی کرده و موجب کاهش سختی حتی نسبت به مواد اولیه قبل از ماشین‌کاری شود. این در حالی است که در ماشین‌کاری برودتی، نیتروژن مایع با کنترل و کاهش دمای منطقه برش موجب افزایش تاثیرات کارسختی و در نتیجه افزایش سختی می‌شود. کاهش نرخ پیشروی و سرعت برشی با کاهش حرارت در منطقه برش بر افزایش میزان سختی سطحی در فولادهای زنگ‌نزن تاثیر می‌گذارد<sup>[31]</sup>. همچنین با افزایش مدت زمان قرار گرفتن ماده در معرض برودت، زمان عملیات سرد (Cold Treatment) روی قطعه کار افزایش یافته و در نتیجه سختی سطحی نیز افزایش می‌یابد<sup>[32]</sup>. این نکته در پارامتر سرعت برشی نیز صادق است. با توجه به شکل ۹ میزان سختی سطحی در سرعت‌های برشی متوسط و پایین که بیش‌ترین زمان ماشین‌کاری را دارند، افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد.

شکل ۱۰ نتایج حاصل از آزمون میکروسختی‌سنجی در عمق و پروفیل تغییرات سختی بدست آمده از آن را ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد میزان سختی سطحی و سختی در عمق در ماشین‌کاری برودتی فولاد زنگ‌نزن AISI 440C نسبت به ماشین‌کاری خشک افزایش داشته است. در تحقیقاتی که روی ماشین‌کاری فولادهای زنگ‌نزن صورت گرفته، گزارش شده است افزایش دما در منطقه ماشین‌کاری باعث کاهش تاثیر کارسختی در مواد شده و در بسیاری از حالات منجر به کاهش سختی قطعه کار حتی نسبت به ماده اولیه قبل از ماشین‌کاری می‌شود<sup>[31]</sup>.

برودت حاصل از LN2 ضمن کنترل مناسب دما در ماشین‌کاری که تاثیرات مثبتی بر طول عمر ابزار و صافی سطح دارد، موجب افزایش کارسختی و در نتیجه افزایش سختی در سطح و عمق می‌شود<sup>[24,33]</sup>. نتایج تحقیق حاضر نیز نشان می‌دهد که پروفیل سختی در عمق، در ماشین‌کاری برودتی با سرعت پیشروی ۰/۰۹ میلی‌متر بر دور نسبت به سرعت پیشروی ۰/۱۸ میلی‌متر بر دور و همچنین در شرایط ماشین‌کاری خشک با سرعت پیشروی متناظر ۰/۰۹ میلی‌متر بر دور افزایش معناداری داشته است. همچنین نتایج حاصل از میکروسختی‌سنجی در سطح نشان می‌دهد وجود برودت در ماشین‌کاری موجب افزایش سختی سطحی نسبت به ماشین‌کاری خشک می‌شود. با بررسی این نتایج می‌توان نتیجه گرفت افزایش زمان ماشین‌کاری برودتی در سرعت پیشروی کمتر موجب شده سطح قطعه کار، مدت زمان بیش‌تری در معرض برودت حاصل از نیتروژن مایع قرار گیرد. این امر موجب انجام

افزایش سرعت پیشروی به مقدار ۰/۱۸ میلی‌متر بر دور به شدت موجب افزایش زبری سطح در ماشین‌کاری فولاد زنگ‌نزن AISI 440C با دو روش خشک و برودتی شده است. این تاثیر در سرعت‌های برشی پایین بیش‌تر بوده و با افزایش سرعت برشی کمتر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد افزایش نرخ پیشروی باعث افزایش زبری سطح در تمام شرایط برشی و محیط‌های خشک کاری می‌شود<sup>[9]</sup>. بر اساس این نتایج استفاده از ماشین‌کاری برودتی موجب بهبود ۱۷ درصدی زبری سطح در ماشین‌کاری فولاد زنگ‌نزن AISI 440C می‌شود. ماشین‌کاری برودتی با کنترل دمای منطقه برش و کاهش سایش ابزار در سطوح آزاد جانبی و براده باعث بهبود زبری سطح قطعات شده است. بهبود زبری سطح تا حد زیادی به نوع فرایند ماشین‌کاری که روی فلز صورت می‌گیرد، وابسته است. شرایط دستگاه و نوع فرایند از یک مرحله به بعد، بهینه‌سازی را محدود می‌سازد. به عنوان مثال بدست آوردن زبری سطح کمتر از  $Ra 1 \mu m$  در فرایند تراشکاری، هر اندازه که پارامترهای برشی و ماده خشک‌کاری موثر باشند، به دلیل ویژگی‌های اجزا دستگاه و اسپیندل ماشین تراش قابل دستیابی نیست و برای زبری سطح بهتر باید از روش‌های سنگ‌زنی و یا سایر فرایندهای پرداخت نهایی استفاده شود. به همین دلیل است که در سرعت‌های برشی بالاتر از ۶۵ متر بر دقیقه عملاً تاثیر چشمگیر خشک‌کننده و پارامترهای برشی به واسطه نوع عملیات و فرایند محدود شده و نمودار به تدریج خطی می‌شود.

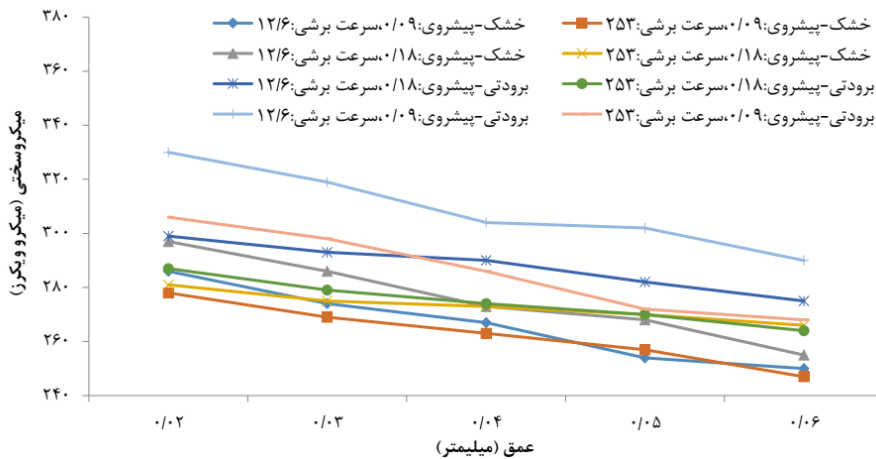
### ۳-۲- سختی سطح و پروفیل سختی در عمق

قطعات ماشین‌کاری شده به روش برودتی و خشک بر پایه پارامترهای برشی مندرج در جدول ۳ تحت آزمایش میکروسختی‌سنجی قرار گرفتند که نتایج حاصله در نمودار شکل ۹ ارائه شده است. بر اساس این نمودار، مقادیر سختی سطحی در ماشین‌کاری برودتی فولاد زنگ‌نزن AISI 440C با نرخ پیشروی ۰/۰۹ میلی‌متر بر دور و عمق برش ۰/۵ میلی‌متر نسبت به ماشین‌کاری خشک افزایش یافته است.



شکل ۹) نتایج میکروسختی‌سنجی فولاد زنگ‌نزن AISI 440C پس از ماشین‌کاری برای ۸ سرعت برشی مختلف و با نرخ پیشروی ۰/۰۹ و ۰/۱۸ میلی‌متر بر دور





شکل ۱۰) نتایج میکروسختی سنجی HV در عمق پس از ماشین کاری خشک و برودتی فولاد زنگ نزن AISI 440C

### ۳-۳- شکل شناسی براده

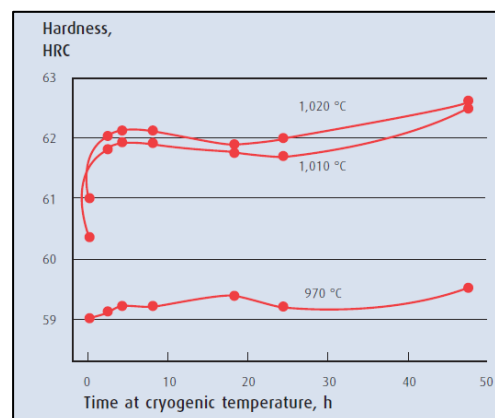
افزایش سرعت پیشروی باعث افزایش حرارت در منطقه تماس ابزار و براده می شود. یکی از مهم ترین وظایف سیال برشی خنک کردن منطقه برش است که تاثیر بسیار زیادی بر شکل شناسی براده، اعمال تنش های حرارتی و مکانیکی به براده و قطعه کار و همچنین طول عمر ابزار دارد. افزایش چشمگیر حرارت موجب سوختگی سطحی براده می شود. براده حاصل از ماشین کاری خشک و برودتی فولاد زنگ نزن AISI 440C با نرخ پیشروی ۰/۰۹ میلی متر بر دور و سرعت برشی ۲۵۳ متر بر دقیقه در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۲-الف در ماشین کاری خشک افزایش زیاد حرارت در سرعت برشی ۲۵۳ متر بر دقیقه و سرعت پیشروی ۰/۰۹ میلی متر بر دور به وضوح تاثیر خود را بر شکل شناسی براده نشان می دهد. سوختگی در سطح به رنگ طلایی و در لبه های براده به رنگ مایل به قهوه ای تیره دیده می شود. وجود لبه های دندان های همراه با ترک های ریز از ویژگی های این براده است. براده تولید شده از نوع پیوسته و با طول حدود ۵ سانتی متر است. در همین شرایط با استفاده از ماشین کاری برودتی، کاهش قابل توجهی در دمای منطقه برش رخ داده است. براده حاصل از این شرایط در شکل ۱۲-ب نشان داده شده است. همان گونه که در تصویر مشاهده می شود، کاهش تنش های حرارتی و مکانیکی و سهولت در شکل گیری براده موجب شکل گیری براده های منقطع با سوختگی سطحی بسیار کمتر با طول ۵ الی ۶ میلی متر شده است. این امر در بهبود سطح قطعه ماشین کاری تاثیر خواهد داشت.

سوختگی سطحی ناچیز است، رنگ براده ها تقریباً به رنگ ماده اولیه و نقره ای مات است. همچنین چین خوردگی و چروکیدگی حاصل از انباشت مواد به طور چشمگیر مشاهده نمی شود. این مسئله حاکی از قابلیت روانکاری LN2 است.

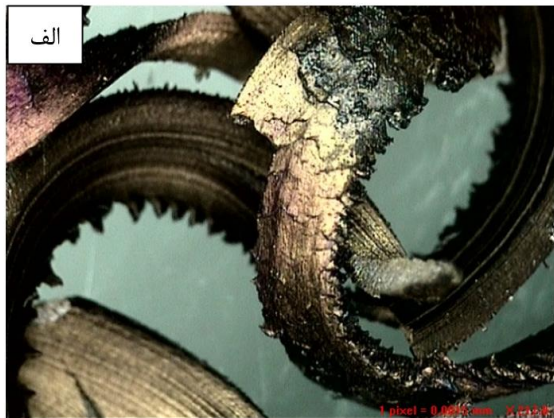
براده حاصل از ماشین کاری خشک و برودتی فولاد زنگ نزن AISI 440C با نرخ پیشروی ۰/۱۸ میلی متر بر دور و سرعت برشی ۲۵۳ متر بر دقیقه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۳-

عملیات سرد روی فولاد زنگ نزن AISI 440C شده و افزایش سختی در سطح و عمق را به همراه داشته است. بر پایه تحقیقات صورت گرفته مطابق شکل ۱۱ زمان به عنوان مهم ترین عامل در انحلال آستنیت باقی مانده در ساختار مارتنزیت بوده و انجام عملیات زیر صفر (Sub-Zero Treatment) خصوصاً در لحظات اولیه، نقش تعیین کننده ای در افزایش میزان سختی سطحی و نفوذ سختی در عمق دارد [34]. تحقیقات پژوهشگران در حوزه تاثیر میزان سختی بر زبری سطح مواد مختلف نشان می دهد افزایش سختی و بهبود زبری سطح تاثیرات متقابلی نسبت به هم دارند [35]. همچنین تجربیات صنعتی زیادی حاکی از این ارتباط است؛ به نحوی که همواره در صنعت عملیات پرداخت جهت دستیابی به زبری سطح بسیار پایین بعد از عملیات حرارتی سخت کاری انجام می شود و عملاً این هدف روی فولاد سخت نشده غیر قابل دستیابی است. عمده ترین دلایل آن تمایل مواد به چسبندگی روی سطح ابزار و تشکیل لبه انباشته و همچنین کنده شدن مواد از روی سطح قطعه کار به جای بریده شدن است.

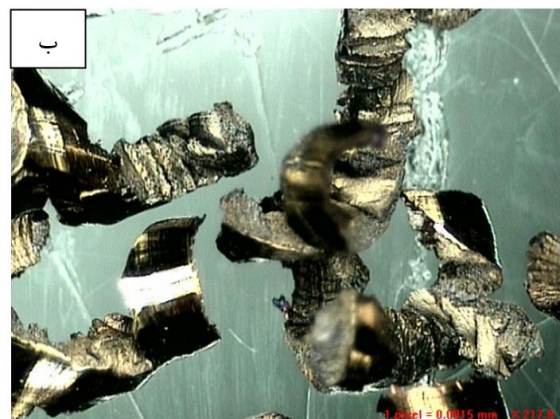
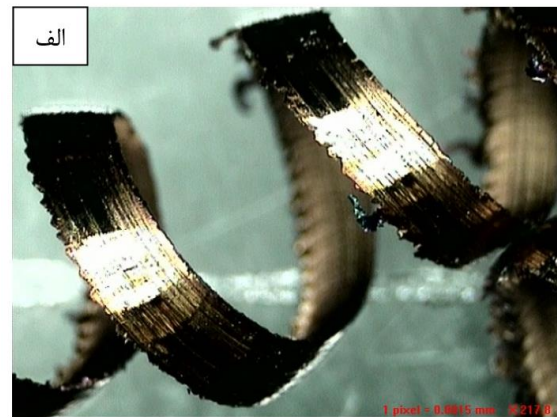
نتایج تحقیق حاضر نیز نشان می دهد افزایش سختی سطحی به مقدار مطلوب موجب بهبود زبری سطح در این شرایط شده است.



شکل ۱۱) تاثیر دمای برودتی و آستنیت شده بر سختی فولاد ابزار سردکار [34] D2



شکل ۱۳) براده حاصل از ماشین کاری الف) خشک و ب) برودتی فولاد زنگ‌زن AISI 440C با نرخ پیشروی ۰/۱۸ میلی‌متر بر دور



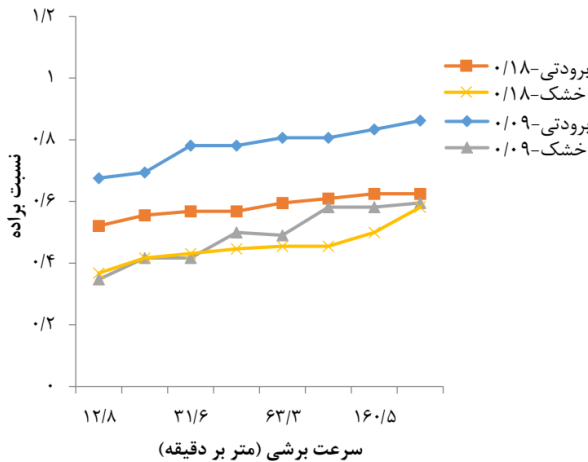
شکل ۱۲) براده حاصل از ماشین کاری الف) خشک و ب) برودتی فولاد زنگ‌زن AISI 440C با نرخ پیشروی ۰/۰۹ میلی‌متر بر دور

در این رابطه  $t_1$  ضخامت براده تغییر شکل نیافته،  $t_2$  ضخامت براده تغییر شکل یافته و  $r$  نسبت براده است. براده‌ها محصول جانبی فرآیندهای ماشین‌کاری هستند. بخش قابل توجهی از انرژی مصرف شده در منطقه برش صرف تغییر شکل دانه‌ها و تشکیل براده می‌شود. هنگام تشکیل براده، ضخامت براده تغییر شکل یافته در نتیجه جمع شدن لایه‌های فلزی افزایش می‌یابد. هرچه نسبت برش بیشتر باشد، انرژی کمتری برای تغییر شکل براده مصرف می‌شود و در نتیجه بازده برش بیشتر است [36]. یکی از راه‌های کاهش انرژی مصرفی در منطقه برش اولیه افزایش زاویه صفحه برشی ( $\Phi$ ) است. بین زاویه صفحه برش و نسبت برش رابطه مستقیمی وجود دارد [37]. با کاهش نسبت برش، علاوه بر کاهش زاویه صفحه برشی، سرعت حرکت براده روی سطح براده ابزار نیز کاهش می‌یابد [38]. برمنگام و همکارانش به طور تجربی نیروی برش و شکل براده را در تراشکاری آلیاژ Ti6Al4V در شرایط خشک و برودتی بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که طول تماس بین براده و ابزار در تراشکاری برودتی در مقایسه با تراشکاری خشک کاهش یافته است. مطالعات نشان می‌دهد که در تراشکاری برودتی، علاوه بر کاهش ضخامت براده تغییر شکل یافته، شکستگی براده نیز در مقایسه با تراشکاری خشک بهبود می‌یابد [39]. در مطالعه حاضر، از طریق اندازه‌گیری ضخامت براده تغییر شکل یافته و ضخامت براده

الف افزایش سرعت پیشروی به ۰/۱۸ میلی‌متر بر دور در شرایط ماشین‌کاری خشک شرایط شکل‌گیری براده را متحول کرده است. سوختگی شدید، رنگ براده را به قهوه‌ای تیره تغییر داده است. تنش‌های مکانیکی و حرارتی شدید باعث رشد ترک‌های عمیق و در بسیاری از نقاط، کندگی سطح داخلی براده شده است. براده‌ها از نوع پیوسته با طول تقریبی ۱۲ سانتی‌متر با شکل نامنظم هستند. با توجه به شکل ۱۳-ب ماشین‌کاری برودتی با شرایط برشی مشابه، موجب شکل‌گیری براده با سطح دندان‌دار می‌شود. افزایش حرارت باعث چروکیدگی و انباشت مواد در سطح داخلی براده شده است. سوختگی در سطح داخلی شدیدتر است و براده به رنگ بنفش دیده می‌شود. در عین حال سطح بیرونی براده که در تماس مستقیم با LN2 بوده، سوختگی بسیار کمتری را تجربه کرده و به رنگ مسی روشن ظاهر شده است. اعمال شرایط دشوار ماشین‌کاری با افزایش زبری در سطح به وضوح قابل مشاهده است.

در ادامه تحقیق، نسبت براده در دو حالت ماشین‌کاری برودتی و خشک برای پیشروی‌های ۰/۰۹ و ۰/۱۸ میلی‌متر بر دور مورد بررسی قرار گرفت. نسبت براده با استفاده از رابطه ۱ قابل محاسبه است:

$$r = \frac{t_1}{t_2} \quad (1)$$



**شکل ۱۴** مقایسه تاثیر سرعت برشی بر نسبت براده در ماشین کاری فولاد زنگ‌نزن AISI 440C به دو روش خشک و برودتی با سرعت پیشروی ۰/۰۹ و ۰/۱۸ میلی‌متر بر دور

همچنین بیش‌ترین میزان سایش در سطح براده ابزار بصورت گودال فرسایش اتفاق افتاده است. به نظر می‌رسد تجزیه و تحلیل عملکرد ماشین کاری برودتی بر الگوی سایش ابزار در ماشین کاری فولاد زنگ‌نزن AISI 440C در سرعت پیشروی بالا نتایج مشخص‌تری را ارائه می‌دهد. تصاویر نشان می‌دهد در ماشین کاری خشک (شکل ۱۵)، ابزار پس از ۱۰ سانتی‌متر ماشین کاری در راستای طول نمونه به طور کامل دچار تخریب و شکست شده است؛ در حالی که در روش برودتی (شکل ۱۶)، ابزار پس از ۴۰ سانتی‌متر ماشین کاری بر طول نمونه، با وجود ایجاد سایش در سطح براده و سطح جانبی  $VB=0.079$  mm، همچنان توان ادامه ماشین کاری را داراست. بر پایه مشاهدات صورت گرفته طول عمر ابزار در ماشین کاری برودتی فولاد زنگ‌نزن AISI 440C به میزان قابل توجهی در مقایسه با ماشین کاری خشک افزایش یافته است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر فرایند ماشین کاری برودتی فولاد زنگ‌نزن AISI 440C بر زبری، سختی سطح، پروفیل سختی در عمق، شکل شناسی براده و الگوی سایش ابزار در مقایسه با ماشین کاری خشک مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا مخزن، سیستم پمپ، اتصالات و مکانیزم انتقال و پاشش صحیح نیتروژن به منطقه برش طراحی و ساخته شد. سپس طراحی آزمایش‌ها در عمق برش ثابت ۰/۵ میلی‌متر و سرعت‌های برشی مختلف در دو سرعت پیشروی ۰/۰۹ و ۰/۱۸ میلی‌متر بر دور صورت گرفت. پس از انجام آزمایش‌ها، نتایج بدست آمده نشان داد با استفاده از ماشین کاری برودتی، زبری سطح فولاد زنگ‌نزن AISI 440C حتی در سرعت پیشروی بالا به میزان قابل توجهی کاهش و صافی سطح بهبود یافته است. افزایش نرخ پیشروی تاثیر منفی بر زبری سطح داشته، به نحوی که با

تغییر شکل نیافته، نسبت برش در هر دو حالت ماشین کاری برودتی و خشک با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد. مقادیر اندازه‌گیری شده نسبت براده در جدول ۵ ارائه شده است.

تاثیر سرعت برشی بر نسبت براده در ماشین کاری فولاد زنگ‌نزن AISI 440C به دو روش خشک و برودتی با سرعت پیشروی ۰/۰۹ و ۰/۱۸ میلی‌متر بر دور در شکل ۱۴ مقایسه شده است.

همان‌گونه که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، کاهش ضخامت براده تغییر شکل یافته در تراشکاری برودتی در مقایسه با تراشکاری خشک در تمام آزمایش‌ها منجر به افزایش نسبت برش در تراشکاری برودتی در مقایسه با تراشکاری خشک می‌شود. در هر دو روش ماشین کاری، با افزایش سرعت برش، نسبت برش افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، ضخامت براده تغییر شکل یافته کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت برش، ضخامت براده تغییر شکل یافته کاهش می‌یابد؛ زیرا طول تماس بین براده و ابزار کاهش یافته و زاویه صفحه برشی افزایش می‌یابد<sup>[40]</sup>. به نظر می‌رسد دلیل اصلی افزایش نسبت برش در خنک‌کننده برودتی در مقایسه با حالت برش خشک، کاهش اصطکاک در شرایط برودتی است. کاهش اصطکاک در فرایندهای ماشین کاری باعث افزایش زاویه برش و نسبت برش می‌شود<sup>[37]</sup>. افزایش نسبت برش در تراشکاری برودتی نشان‌دهنده شکل‌گیری آسان براده و کاهش نیروی برش مورد نیاز برای تغییر شکل براده است.

این کاهش نیروی برش باعث کاهش ارتعاشات ابزار در هنگام برداشت براده‌ها می‌شود<sup>[41]</sup> و در نتیجه زبری سطح در تراشکاری برودتی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، افزایش نسبت برش در تراشکاری برودتی می‌تواند یکی از دلایل اصلی کاهش زبری سطح در مقایسه با تراشکاری خشک باشد.

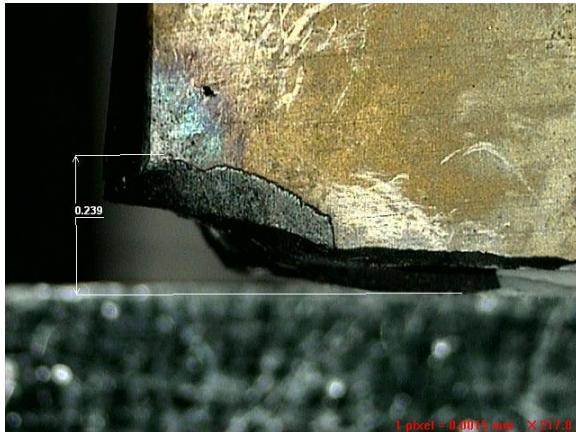
#### ۳-۴- بررسی اولیه طول عمر ابزار

بررسی دقیق اینسرت VBMT160404MF2015 به عنوان ابزار در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان می‌دهد در هر دو روش ماشین کاری خشک و برودتی (عمق بار ۰/۵ میلی‌متر، سرعت برشی ۲۵۳ متر بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۱۸ میلی‌متر بر دور)، سایش سطح جانبی VB نسبت به سایش در سطح براده کمتر صورت گرفته است.

**جدول ۵** نسبت براده در ماشین کاری برودتی و خشک فولاد زنگ‌نزن AISI 440C

سرعت برشی (متر بر دقیقه)	CRY 0.09	CRY 0.18	DRY 0.09	DRY 0.18
۱۲/۸	۰/۶۷	۰/۵۲	۰/۳۵	۰/۳۷
۲۰/۳	۰/۶۹	۰/۵۵	۰/۴۲	۰/۴۲
۳۱/۶	۰/۷۸	۰/۵۷	۰/۴۲	۰/۴۳
۴۰/۷	۰/۷۸	۰/۵۷	۰/۵	۰/۴۵
۶۳/۳	۰/۸۱	۰/۵۹	۰/۴۹	۰/۴۵
۱۰۱/۷	۰/۸۱	۰/۶۱	۰/۵۸	۰/۴۵
۱۶۰/۵	۰/۸۳	۰/۶۲	۰/۵۸	۰/۵
۲۵۳/۲	۰/۸۶	۰/۶۲	۰/۵۹	۰/۵۸



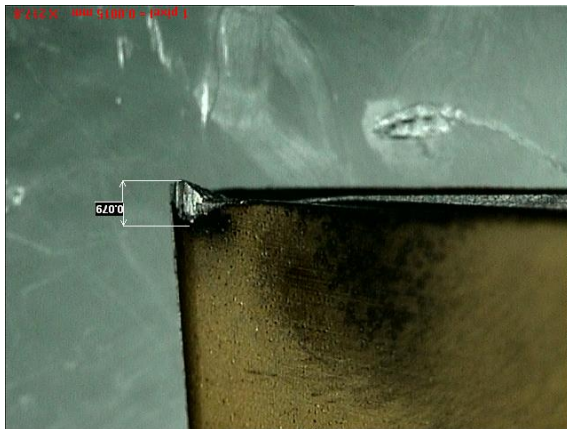


(ب)

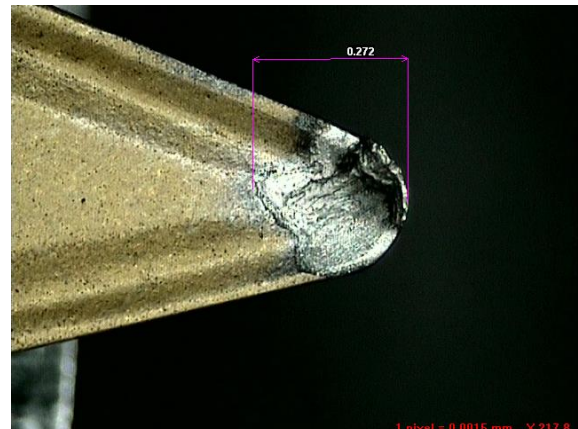


(الف)

شکل ۱۵ تصاویر میکروسکوپی از الف) شکست و ب) نمای جانبی شکست ابزار در ماشین‌کاری خشک فولاد زنگ‌نزن AISI 440C پس از ماشین‌کاری به طول ۱۰ سانتی‌متر



(ب)



(الف)

شکل ۱۶ تصاویر میکروسکوپی از الف) گودال فرسایش در سطح براده و ب) سایش جانبی VB=0.079 mm ابزار در ماشین‌کاری برودتی فولاد زنگ‌نزن AISI 440C پس از ماشین‌کاری به طول ۴۰ سانتی‌متر

درصدی طول عمر ابزار در شرایط یکسان ماشین‌کاری نسبت به روش ماشین‌کاری خشک شده است.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**تاییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان است.

**تعارض منافع:** مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

**سهم نویسندگان:** ابراهیم مظفری (نویسنده اول)، نگارنده مقاله/پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ سعید امینی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نویسنده مسئول (۵۰٪)  
**منابع مالی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

افزایش سرعت پیشروی از ۰/۰۹ به ۰/۱۸ میلی‌متر بر دور در ماشین‌کاری خشک، زبری سطح بیش از ۱۰۰ درصد افزایش یافته است. افزایش سرعت برشی در هر دو روش ماشین‌کاری خشک و برودتی تاثیر زیادی بر بهبود صافی سطح داشته است. استفاده از نیتروژن مایع و ماشین‌کاری برودتی به شدت موجب بهبود زبری سطح شد؛ بطوری‌که در ماشین‌کاری برودتی با سرعت پیشروی ۰/۰۹ میلی‌متر بر دور با افزایش ۲۰ برابری سرعت برشی، زبری سطح حدود ۴۰۰ درصد بهبود یافت و در سرعت پیشروی ۰/۱۸ میلی‌متر بر دور با همین مقدار افزایش سرعت برشی، بهبود ۱۷ درصدی صافی سطح حاصل گردید. در مبحث شکل‌شناسی براده مشخص شد که با تسهیل شرایط ماشین‌کاری در فرایند برودتی در یک سرعت برشی و سرعت پیشروی یکسان، میزان سوختگی سطحی براده و میزان چروکیدگی و انباشت مواد در سطح داخلی براده به طور قابل‌توجهی کاهش یافته است. همچنین الگوی سایش ابزار در ماشین‌کاری برودتی، گودال فرسایش در سطح براده بوده و باعث افزایش ۴۰۰



AISI 1060 steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;116(1):44-8.

15-Sun Y, Huang B, Puleo DA, Schoop J, Jawahir IS. Improved surface integrity from cryogenic machining of Ti-6Al-7Nb alloy for biomedical applications. *Procedia CIRP*. 2016;45:63-6.

16-Zahir M.R., Taheri A. and Omidakhjavani A., Investigation of machining parameters and its effect on tool wear and surface of work process in turning process, 1st Mechanic Conference, Natanz, 1993; <https://civilica.com/doc/370500> (Persian).

17-Wang Z.Y., Rajurkar K.P., Fan J., Lei S., Shin Y.C. and Petrescu G., Hybrid machining of Inconel 718. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2003; 43:1391-1396.

18-Khan AA, Ali MY, Haque MM. A New Approach of Applying Cryogenic Coolant in Turning AISI 304 Stainless Steel. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2010;5(2):171-4.

19-[www.astmsteel.com](http://www.astmsteel.com) [Internet]. [cited 2021 May 23]. Available from: <https://www.astmsteel.com/product/440c-stainless-steel-aisi>.

20-Hong SY, Ding Y, Jeong WC. Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2001;41(15):2271-85.

21- Shaw MC, Smith PA. Methods of applying cutting fluids. *American Society of Tool and Manufacturing Engineers (ASTME)*. 1956.

22-Hong S.Y., Cryogenic machining. *US Application* 5,901,623, 11 May 1999.

23-Hong SY, Ding Y. Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2001;41(10):1417-37.

24-Kopac J, Krolczyk G. Cryogenic machining, surface integrity and machining performance. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2015;71(2):83-93.

25-Akshaya T.P., Dharmik U.S., Tirth H.S., Akash M.P. and Rajesh N., Effect of Process Factors on Surface Roughness in Dip Cryogenic Machining of AISI 1040 Steel Using Taguchi's Approach. *International Journal of Research in Engineering and Technology* 2015; 4(9):424-429.

26-Stephenson D.A. and Agapiou J.S., *Metal Cutting Theory and Practice*, second ed., Taylor & Francis, CRC Press, Boca Raton, 2006; 551-559.

27-Risbood KA, Dixit US, Sahasrabudhe AD. Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;132(1-3):203-14.

28-Azouzi R, Guillot M. On-line prediction of surface finish and dimensional deviation in turning using neural network based sensor fusion. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1997 ;37(9):1201-17.

29-Dhar NR, Paul S, Chattopadhyay AB. On effect of cryogenic cooling on tool wear and job dimension and finish in turning Ni-Cr steel. In *International Conference on Manufacturing (ICM-2000)*. Organised by BUET, Dhaka, Bangladesh 2000; 301-310.

1-Fata A, Razfar MR. Determination of Tool Temperature in Orthogonal Metal Cutting by Finite Element Method and its Comparison with Experimental Work.

2-Banazade R., Riahi M. and Khosroabadi M., Experimental study of the effect of cryogenic cooling on tool life and power consumption for 304 steel turning. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 2017; 50(3):641-656. (Persian)

3-Rezaei H., Sadeghi M.H. and Khosroabadi H. Comparing Cooling and Lubricating Effects of Different Cutting Fluid Applications in Micromilling Process. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 2020; 52(3):51-60. (Persian)

4-Balaji V, Ravi S, Chandran PN, Damodaran KM. Review of the cryogenic machining in turning and milling process. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015;4(10):38-42.

5-Choopani Y, Razfar MR, Saraeian P, Farahnakian M. Experimental investigation of external surface finishing of AISI 440C stainless steel cylinders using the magnetic abrasive finishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016 ;83(9-12):1811-21.

6-Adiyanto O, Soo PI, Hermanto AS, Sik CW. Analysis of the vertical moving table type broaching machine. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2020 ;14(3):7152-69.

7-Razak M.S, Sulaiman M.A, Mat S.A, Ramle Z, Mohamad E and Salleh M.R. The effect of cryogenic cooling on surface roughness of titanium alloy: a review. *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)* 2017; 1-11.

8-Magadum S, Kumar S A, V.G Y and Srinivasa C.K. Cryogenic machining of SS304 steel. 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12th-14th, 2014, IIT Guwahati, Assam, India.

9-Dhar N.R and Kamruzzaman M. Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2007; 47:754-759.

10-Kale A and Khanna N. A review on cryogenic machining of super alloys used in aerospace industry. *Procedia Manufacturing* 2017; 7:191-197.

11-Putz M, Dix M, Neubert M, Schmidt G, Wertheim R. Investigation of turning elastomers assisted with cryogenic cooling. *Procedia CIRP*. 2016; 40:631-6.

12-Dhar NR, Paul S, Chattopadhyay AB. The influence of cryogenic cooling on tool wear, dimensional accuracy and surface finish in turning AISI 1040 and E4340C steels. *Wear*. 2001;249(10-11):932-42.

13-Dhar NR, Paul S, Chattopadhyay AB. Machining of AISI 4140 steel under cryogenic cooling—tool wear, surface roughness and dimensional deviation. *Journal of Materials processing technology*. 2002;123(3):483-9.

14-Paul S, Dhar NR, Chattopadhyay AB. Beneficial effects of cryogenic cooling over dry and wet machining on tool wear and surface finish in turning

- 30-Kaynak Y, Lu T, Jawahir IS. Cryogenic machining-induced surface integrity: a review and comparison with dry, MQL, and flood-cooled machining. *Machining Science and Technology*. 2014;18(2):149-98.
- 31-Hernández-González LW, Pérez-Rodríguez R, Quesada-Estrada AM, Dumitrescu L. Effects of cutting parameters on surface roughness and hardness in milling of AISI 304 steel. *Dyna*. 2018;85(205):57-63.
- 32-dokumen.tips [Intenet]. [cited 2021 May 23]. Available from: <https://dokumen.tips/documents/sub-zero-treatment-of-steels-technology-processes-equipment-final-artworkpdf.html>
- 33-Yildiz Y, Nalbant M. A review of cryogenic cooling in machining processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008;48(9):947-64.
- 34-Collins D.N. and Dormer J., Deep Cryogenic treatment of a D2 Cold-work Tool steel. *Heat Treatment of Metals* 1997; 3:71-74.
- 35-Munchow EA, Correa MB, Ogliari FA, Piva E, Zanchi CH. Correlation between surface roughness and microhardness of experimental composites with varying filler concentration. *J Contemp Dent Pract*. 2012;13(3):299-304.
- 36-Saliminia A, Abootorabi MM. Experimental investigation of surface roughness and cutting ratio in a spraying cryogenic turning process. *Machining Science and Technology*. 2019;23(5):779-93.
- 37-Boothroyd G. and Knight W.A. *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL, 2005.
- 38-Trent E.M. and Wright P.K. *Metal Cutting*, 4th ed. Butterworth-Heinemann, New York, NY, 2000.
- 39-Birmingham MJ, Kirsch J, Sun S, Palanisamy S, Dargusch MS. New observations on tool life, cutting forces and chip morphology in cryogenic machining Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2011;51(6):500-11.
- 40-Thakur DG, Ramamoorthy B, Vijayaraghavan L. Machinability investigation of Inconel 718 in high-speed turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009;45(5-6):421.
- 41-Dhananchezian M, Kumar MP, Sornakumar T. Cryogenic turning of AISI 304 stainless steel with modified tungsten carbide tool inserts. *Materials and Manufacturing Processes*. 2011;26(5):781-5.