



تأثیر خنک کننده برودتی بر توپوگرافی سطح در فرایند سنگ زنی پلی اترکتون (PEEK)

محمد خوران^۱، بهمن آذرهوشنگ^۲، حسین امیرآبادی^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک-ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فورت وانگن، توتلینگن، آلمان

۳- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۴- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه نیشابور، نیشابور، ایران

* نیشابور، کد پستی ۹۳۱۹۷۷۴۴۴۶، hamirabadi@neyshabur.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

با توجه به رشد روز افزون استفاده از پلیمرهای مخصوص در صنایع، به ویژه صنایع پزشکی و هوایی، لزوم بررسی و مطالعه روز افزون تولید و ماشین کاری این مواد احساس می گردد. پلی اتر کتون (پیک) یک پلیمر مقاوم در برابر گرما است که امروزه در حال استفاده در صنایع پزشکی است. سنگ زنی یکی از فرایندهای مهم ماشین کاری این ماده محسوب می شود. استفاده از مایعات روان کار و خنک کننده در ماشین کاری پیک مطلوب نیست زیرا قطعات سنگ زده شده قبل از مصرف باید در چند مرحله تمیزکاری شوند. در این مقاله از فن آوری خنک کننده برودتی به عنوان یکی از خنک کنندهای نو ظهور در عرصه ماشین کاری که قابلیت بسیار بالای دارد، دارای اثرات منفی زیست محیطی نیست و نیاز به تمیزکاری قطعات ماشین کاری شده را شدیداً کاهش می دهد، جهت خنک کاری منطقه ماشین کاری استفاده شده است. یکی از موارد مهم خروجی ماشین کاری، یکپارچگی سطح است. یکپارچگی و زبری سطح اهمیت بالای در کارایی محصول نهایی دارند و پارامتر مهمی برای بررسی قابلیت ماشین کاری محسوب می شوند. مقایسه نتایج استفاده از هوای فشرده و خنک کننده برودتی بر زبری سطح و شرایط سطح ایجاد شده نشان دهنده تأثیر قابل توجه خنک کننده برودتی بر خروجی مورد مطالعه این پژوهش بوده است.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۸
پذیرش: ۱ تیر ۱۳۹۸
ارائه در سایت: فروردین ۱۳۹۹

کلیدواژه‌ها:

سنگ زنی
زبری سطح
خنک کننده برودتی
پلی اتر کتون

The effect of cryogenic cooling on surface topography in the PEEK grinding process

Mohammad Khoran¹, Bahman Azarhoushang², Hossain Amirabadi^{1,3*}

1- Mechanical Engineering, Birjand University, Birjand, Iran

2- Mechanical Engineering, Hochschule Furtwangen University, Tuttlingen, Germany

3- Mechanical Engineering, Neyshabur University, Neyshabur, Iran

* P.O.B. 9319774446 Neyshabur, Iran, hamirabadi@neyshabur.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 18 May 2019
Accepted 22 June 2019
Available March 2020

Keywords:

Grinding
Surface roughness
Cryogenic cooling
PEEK

Abstract

Due to the increasing applicant of special polymers in industries, especially in the medical and aerospace industries, it is necessary to study and investigate the production and machining of these materials. Polyether ether ketone is a heat resistant polymer that is used in the medical industry nowadays. Grinding is one of the important machining processes of this material. Using conventional lubricants and cooling liquids is not optimal in machining of PEEK, because grinded workpiece must be cleaned several steps before use. In this paper, cryogenic cooling technology, as one of the newly emerging cooling systems in the field of machining that have a very high ability, does not have a negative environmental impact, and greatly reduces need to clean machining parts, has been used for cooling of the machining zone. One of the important issues of machining output parameters is surface integrity. Surface Integrity and roughness have a high importance in the performance of the finished product and is an important parameter for investigation the machinability. Comparison of the results of using compressed air and cryogenic cooling on surface roughness and surface conditions indicate the significant effect of cryogenic cooling on the output of this study.

۱- مقدمه

صنایع شیمیایی و به عنوان یک زیست ماده^۲ پیشرفته در ایمپلنت های پزشکی استفاده می گردد [۲]. پیک یکی از معدود پلیمرهایی است که در کاربردهای خلاء سازی فوق العاده بالا قابل استفاده است. در کنار مزایای بالا، این پلیمر دارای معایبی چون

پلی اتر کتون^۱ (پیک) یک ترموپلاستیک حلقوی و نیمه بلوری است [۱] که دارای مقاومت بالایی به حرارت بوده در ساخت پمپ، کمپرسور، پیستون، قطعات فضا پیماها، اتومبیل،

^۱Biomaterial

^۲Polyether Ether ketone (PEEK)

Please cite this article using:

M. Khoran, B. Azarhoushang, H. Amirabadi, The effect of cryogenic cooling on surface topography in the PEEK grinding process, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 1- 12, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

قیمت بالا، مقاومت مداوم کم نسبت به اشعه UV و حساسیت به استون است.

یکی از مشکلات بزرگی که در سنگ‌زنی پلیمرها وجود دارد بحث دمای ذوب پایین این مواد، بارگیری چرخ سنگ در حین ماشین کاری و در نتیجه کاهش یکپارچگی سطح قطعه به دلیل افزایش نیروها و دمای ماشین کاری است.

زبری سطح یکی از نامنظمی‌های ذاتی قطعه کار است که از فرایندهای تولید منتج شده است. یکی از پارامترهای مهم کیفیت سطح قطعه کار بوده و تأثیر زیادی بر عملکرد نهایی و هزینه تولیدی قطعات دارد و بر خصوصیات مکانیکی مثل عمر خستگی، مقاومت به خوردگی، خزش، اصطکاک، روان کاری و غیره تأثیر دارد. راه‌های مختلفی برای شرح زبری سطح وجود دارد. یکی از آنها زبری متوسط است که معمولاً با R_a نشان داده می‌شود. R_a مقدار اختلاف محاسبه شده از خط متوسط می‌باشد.

سنگ‌زنی به فرایندی اطلاق می‌شود که در آن از ذرات ساینده به عنوان لبه های برشی در ابزار جهت براده برداری استفاده می‌شود. ابزار سنگ‌زنی (چرخ سنگ) معمولاً از سه بخش تشکیل شده است. دانه‌های ساینده که وظیفه براده برداری را بر عهده دارد، باند که نگهدارنده ذرات ساینده و وظیفه شکل‌دهی چرخ سنگ را داراست و تخلخل یا فضاهای خالی بین باند و دانه‌ها. تخلخل سنگ یا فضاهای خالی بین دانه‌های ساینده، نقش مهمی در انتقال مواد خنک کننده، انتقال براده، کاهش درجه حرارت و ... دارد. فرایند سنگ‌زنی معمولاً نسبت به فرایندهای دیگر ماشین کاری به دلیل زاویه براده منفی لبه‌های برشی، ضخامت براده بسیار پایین و تعداد لبه‌های برشی بسیار بالا که به افزایش سهم نیروهای اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک می‌انجامند، دارای انرژی مخصوص بالاتری است که این مهم منجر به تولید حرارت بالاتر در منطقه سنگ‌زنی می‌گردد. در صورت عدم کنترل دمای سنگ‌زنی عیوب مختلفی چون تنش پسماند کششی، سوختگی سطح، تغییر ساختار کریستالی ماده و ترک‌های سطحی اتفاق خواهد افتاد [۳] که به کاهش عمر قطعه کار منجر می‌گردند. عیب‌های دیگری چون بارگیری سنگ، فرسایش چرخ سنگ و همچنین عیوب زیر سطحی قطعه کار نیز متأثر از حرارت سنگ‌زنی هستند. قابلیت یک فرایند به شدت به خنک کننده آن باز می‌گردد چرا که خنک کننده بر روی عمر ابزار، اصطکاک، حرارت، دقت نهایی قطعه کار، یکپارچگی سطح تأثیر مستقیم دارد.

خنک کاری برودتی از گازهایی که دارای قدرت خنک کنندگی بالا و سازگاری مناسبی با محیط زیست هستند استفاده

می‌کند. تغییر در خواص قطعه کار (داکتیلیتی) و خنک کاری از مهمترین موارد استفاده خنک‌کننده‌های برودتی (که منجر به ایجاد درجه حرارت بسیار پایین در قطعه کار و یا ابزار می‌گردند) هستند [۴]. به علت نرخ براده برداری بالاتر که منجر به افزایش نرخ تولید می‌شود و عمر بالاتر ابزار در سال‌های اخیر گرایش به استفاده از روش خنک‌کننده برودتی در مقابل استفاده از خنک‌کننده‌های سنتی بیشتر شده است [۵].

در روش‌های ماشین کاری، خنک کننده‌های برودتی چون نیتروژن مایع، هلیوم مایع، دی اکسید کربن مایع جایگزین مناسبی برای خنک کننده‌های سنتی چون روغن، روغن‌های محلول در آب، امولسیون‌ها و غیره بوده‌اند. در بین موارد بالا، نیتروژن و دی اکسید کربن بیشتر مورد کاربرد قرار گرفته‌اند که در مقایسه با نیتروژن مایع، دی اکسید کربن استفاده ساده‌تر و اقتصادی‌تری دارد.

استفاده از دماهای بسیار پایین در فرایندهای تولید به سال ۱۸۸۲ در دانشگاه لیدن باز می‌گردد. در صورتی که دی اکسید کربن به عنوان اولین مایع خنک کننده برودتی در سال ۱۹۱۹ مورد استفاده قرار گرفت [۶]. تأثیر نیتروژن مایع بر نیرو، دما و تنش پسماند ماشین کاری ۵ نوع فولاد مختلف توسط پاول و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۷]. آنها مشخص نمودند که خنک کاری برودتی باعث نگه داشتن دمای منطقه سنگ‌زنی زیر دمای بحرانی فولادها خواهد شد. نیرو کاهش می‌یابد و در صورت استفاده از خنک کننده برودتی تنش پسماند کششی نیز کاهش خواهد یافت. اثر خنک کنندگی (از درون ابزار) با دی اکسید کربن در بهبود شرایط فرزکاری توسط کوردس و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۸]. آنها گزارش نمودند که استفاده از این روش باعث کاهش دما، بهبود نرخ براده برداری، انتخاب پارامترهای ورودی بالاتر و سایش کمتر ابزار خواهد شد. در این پژوهش که در مقایسه با روش حداقل مقدار روان کاری^۱ صورت پذیرفت، موثر بودن خنک کاری برودتی بیشتر مورد تأیید قرار گرفت. هیچ اثر جت برف دی اکسید کربن (چون دی اکسید کربن با سرعت به ناحیه ماشین کاری پاشیده می‌شود اصطلاح "جت" استفاده می‌شود) به عنوان خنک کننده در فرایند تراشکاری مطالعه نمود [۹]. هانگ [۱۰] نشان داد که استفاده از خنک کاری برودتی (نیتروژن مایع) می‌تواند باعث افزایش ۵ برابری عمر ابزار تراشکاری در مقابل استفاده از امولسیون رایج در ماشین کاری آلیاژ تیتانیوم (Ti6Al4V) گردد.

¹ MQL (minimum quantity lubrication)

مورد مطالعه این پژوهش صورت نگرفته است، لذا لزوم مطالعه، انجام این پژوهش و بررسی اثر سنگ زنی پلیمرها در دو حالت هوای فشرده و استفاده از خنک کننده برودتی احساس می گردد. لذا در این مقاله اثر خنک کننده برودتی بر زبری سطح حاصل از سنگ زنی پلی اترکتون در مقایسه با هوای فشرده مورد بررسی و تحقیق قرار خواهد گرفت.

۲- مواد و تجهیزات

۲-۱- ماشین

برای انجام آزمایش های تجربی این پژوهش از ماشین سنتر سه محوره Muga با کنترلر Mitsubishi M80 استفاده شد. حداکثر سرعت دورانی این ماشین 10000 RPM و حداکثر پیشروی ۱۲ m/min می باشد. درسینگ^۲ دورانی با ضخامت دیسک ۰/۸ و قطر ۱۰۸ میلی متر مورد استفاده قرار گرفت. تعداد درسینگ ۳ مرتبه و هر بار ۱۰ میکرومتر بوده است. نمایی از چیدمان تجهیزات انجام آزمایش های تجربی در شکل ۱ آورده شده است.

۲-۲- ابزار

با توجه به مطالعه پیشینه پژوهش و تجربه نویسندگان مقاله، چرخ سنگ مورد استفاده برای انجام آزمایش های تجربی این پژوهش، از جنس کاربید سیلیسیم (SiC) انتخاب گردید. کد ابزار 10C100H12VQ و قطر آن ۳۰ میلی متر بوده است.



Fig. 1 Set up of experimental tests

شکل ۱ چیدمان انجام آزمایش های تجربی

در پژوهشی دیگر اثر دی اکسید کربن بر عمر ابزار در فرزکاری Ti6Al4V مورد بررسی و بهبود عمر ابزار مورد تأیید قرار گرفت [۱۱]. آنها پژوهش خود را کامل تر نمودند و با ترکیب MQL با خنک کاری برودتی جهت حصول به حداکثر خنک کاری و روان کاری به این نتیجه رسیدند که ترکیب این دو روش خنک کاری بسیار مفیدتر از استفاده هر یک بصورت مجزا است. داوودی و همکاران [۱۲] اثر ترکیب MQL و خنک کاری برودتی بر خوردگی ابزار در تراشکاری سوپر آلیاژ A286 را مورد مطالعه قرار دادند و اثبات کردند که استفاده از این روش نسبت به روش خشک و تر بسیار سودمند است. رددی و همکاران [۱۳، ۱۴] اثر جریان نیتروژن به عنوان خنک کار فولاد AISI52100 در فرایند سنگ زنی توسط چرخ سنگ آلومینیم اکساید با باند شیشه ای را مورد مطالعه قرار داد. مشخص شد استفاده از روش خنک کاری برودتی به علت ظرفیت خنک کاری بالا، باعث بهبود نسبت جی^۱ (نسبت حجم براده برداشته شده به حجم فرسوده شده ابزار) در مقایسه با امولسیون های روغنی خواهد شد، در صورتی که کیفیت سطح و دقت ابعادی قطعه کار کاهش یافت. این روش خنک کاری منجر به استحکام بالاتر باند چرخ سنگ و عدم خروج دانه های ساییده شده و منجر به افزایش توان اسپیندل ماشین می شود. اثر چرخ سنگ سول-ژل کراندوم (آلومینیم اکساید با ساختار میکروکریستالی) بر سنگ زنی فولاد ضد زنگ 316 مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت [۱۵]. بر خلاف نظر رددی در این تحقیق مشخص گردید که خنک کاری برودتی منجر به بهبود زبری سطح می گردد.

سنگ زنی برای تولید قطعات پلیمری چون تخته های اسکی، میله های چاپ پرینتر و ... استفاده می گردد. امروزه از قابلیت پلی اتر کتون به عنوان یک پلیمر در ساخت قطعات پزشکی بهره می گیرند. سنگ زنی به عنوان یک روش ماشین کاری که اثر ماشین کاری خاصی (جهت براده برداری) بر روی قطعات باقی نمی گذارد و در عین حال منجر به تولید کیفیت سطح بالا بدون ایجاد پلیسه دارد، می تواند روش بسیار مناسبی در تولید ایمپلنت های پلیمری باشد.

همان طور که در بالا ذکر گردید، تاکنون تحقیقات متنوعی در مورد نقش خنک کننده برودتی صورت گرفته است. در تمامی تحقیقات توانایی خنک کننده برودتی بر بهبود شرایط خروجی ماشین کاری تأیید شده است. با توجه به بررسی پیشینه پژوهش مشخص گردید که تاکنون تحقیقاتی بر روی سنگ زنی ماده

² Dressing

¹ G-ratio

۲-۳- قطعه کار

نمونه‌های آزمایش از ورقی به ضخامت ۶/۵ میلی‌متر به ابعاد ۴۰*۴۰ میلی‌متر آماده گردید. خواص پلی اتر اتر کتون و ساختار شیمیایی آن در جدول ۱ و شکل ۲ آورده شده است.

جدول ۱ خواص پلی اتر اتر کتون [۱۶، ۱۷]

Table 1 Specifications of Polyether Ether Ketone

خصوصیات فیزیکی	
دانسیته (gr/cm ³)	۱/۳۱ تا ۱/۳۲
جذب آب در حالت اشباع	۰/۱۵
خصوصیات مکانیکی	
سختی (شور D)	۸۵
استحکام کششی (Mpa)	۱۱۰
تغییر طول تا شکست (درصد)	۴۰
مدول کششی (GPa)	۴/۳۴
استحکام فشاری (Mpa)	۱۳۸
مدول فشاری (GPa)	۳/۴۵
استحکام برشی (Mpa)	۵۵/۲
ضربه (ایزود-ناچ دار) (J/Cm)	۰/۳۲
ضریب اصطکاک	۰/۳۲
خصوصیات حرارتی	
ضریب انتقال حرارت (W/M-K)	۰/۲۵۲
دمای ذوب (سانتی‌گراد)	۳۴۰ تا ۳۳۵
دمای انتقال شیشه‌ای (سانتی‌گراد)	۱۴۰

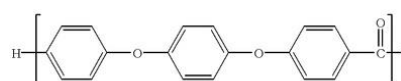


Fig. 2 Chemical Structure of PEEK [17]

شکل ۲ ساختار شیمیایی پیک [۱۷]

۲-۶- تجهیزات خنک‌کاری

تجهیزات تأمین برف دی اکسید کربن شرکت aCP برای تأمین خنک‌کنندگی ناحیه سنگ‌زنی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳). تمام پارامترهای دیگر، برای تمام آزمایش‌ها یکسان بوده است. برای تأمین هوای فشرده نیز از کمپرسور استفاده شد. فشار خروجی هوا و برف دی اکسید کربن در هر دو روش خنک‌کاری ۵ بار بود. از کاپیلری استاندارد نوک نازل دستگاه به قطر ۰/۳۵ mm استفاده گردید. در این صورت می‌توان ۰/۱۸ لیتر بر دقیقه دی اکسید کربن در ناحیه سنگ‌زنی داشت. در صورتی که به مقدار خنک‌کننده بیشتری در ناحیه ماشین‌کاری باشد باید از قطر کاپیلری بیشتر استفاده گردد. دما در خروجی نازل دستگاه نزدیک ۸۰- درجه سانتی‌گراد بود.

۲-۳- طراحی آزمایش

فرایند سنگ‌زنی دارای ورودی‌های زیادی است که در بین آنها سرعت برشی و نسبت سرعت درسینگ که تأثیر زیادی بر حرارت تولیدی و ایجاد زبری سطح دارند انتخاب گردید. بدین منظور هر یک از ورودی‌ها در سه سطح مطابق جدول ۲ تغییر و مورد بررسی قرار گرفت، لذا کل آزمایش‌ها برابر ۳^۲=۹ آزمایش طراحی و بصورت سنگ‌زنی موافق اجرا شد. جهت بهبود امکان برآورد خطای تجربی در سیستم، تعدادی از آزمایش‌ها تکرار گردید. پارامترهای دیگر سنگ‌زنی بصورت ثابت برای تمام آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. ترتیب انجام آزمایش‌ها کاملاً بصورت تصادفی شده (CRD) بوده است. بدین ترتیب تخصیص هر عاملی که خارج از کنترل آزمونگر است (مثل مواد، انسان‌ها، ترتیب انجام آزمایش‌ها و ...) بصورت تصادفی انجام می‌شود. در روش‌های آماری نیاز است که مشاهدات بصورت تصادفی و مستقل از یکدیگر باشند. تصادفی‌سازی باعث میانگین‌گیری اثر عوامل خارجی و کاهش خطاهای سیستمی موجود در آزمایش می‌گردد [۱۸]

جدول ۲ پارامترهای طراحی آزمایش

Table 2 Design of experimental parameters

مقادیر	پارامترها
۱۵ و ۱۰ و ۵	سرعت برشی (m/s)
۲۰۰۰	سرعت میز (mm/min)
۳۰	عمق برش (μm)
۵	نسبت هم پوشانی درسینگ U _d
۰/۳- و ۰/۳ و ۰/۹	نسبت سرعت درسینگ Q _d

۲-۴- زبری سنج

برای زبری سنجی از زبری سنج Hommel-Etamic T 8000 بهره گرفته شد. جهت اطمینان، از سه ناحیه قطعه‌کار زبری سنجی صورت گرفت و مقدار میانگین آن به عنوان پاسخ نهایی آورده شده است.

۲-۵- میکروسکوپ

از تجهیزاتی چون میکروسکوپ نوری^۱ و کونفوکال^۲ برای تهیه عکس از سطح قطعه کار و بررسی شرایط ایجاد شده استفاده گردید.

² Confocal Microscope³ Capillary diameter⁴ Completely Randomized Design¹ Optical Microscope

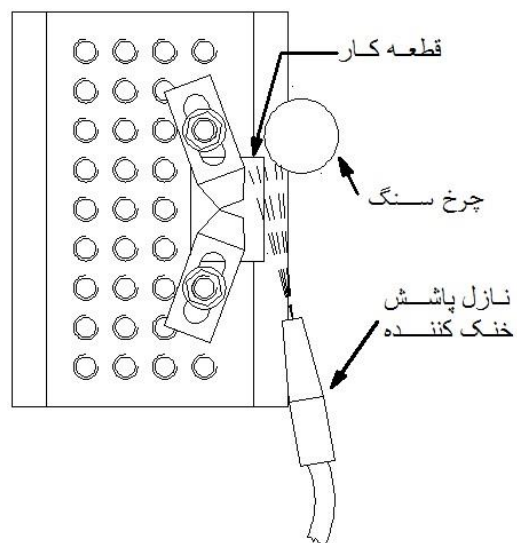
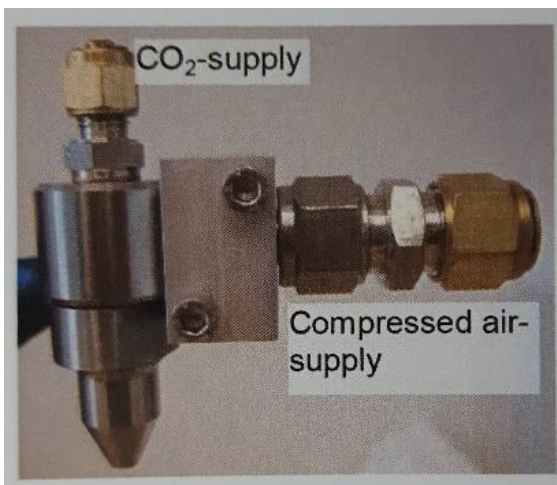
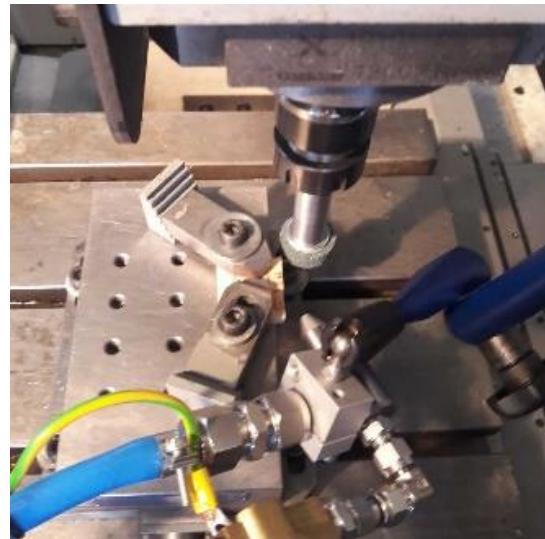


Fig. 3 Equipment of cryogenic cooling

شکل ۳ تجهیزات خنک کاری برودتی

سمت راست این تصویر نشان دهنده تابش نور بصورت مستقیم بر قطعه و ستون سمت چپ نشان دهنده تابش نور از دور رینگ به قطعه کار در هنگام تصویر برداری توسط میکروسکوپ نوری بوده است.

شکل های ۵ تا ۷ نمودارهای تأثیر نسبت سرعت درسینگ بر تغییرات زبری سطح با توجه به تغییر در سرعت برشی می باشند. همان طوری که در شکل های ۵ تا ۷ دیده می شود، در تمامی سرعت های برشی، روند تغییرات زبری با تغییر در نسبت سرعت درسینگ یکسان است. در نسبت سرعت درسینگ $0/3-$ به علت اینکه دانه های چرخ سنگ صاف تر (کندتر) شده است انتظار می رود که زبری سطح پایین تری نسبت به حالت مثبت داشته باشیم ولی مشاهده می گردد که این اتفاق نمی افتد. علت آن را می توان تولید حرارت بالا در نسبت سرعت درسینگ $0/3-$ در ناحیه سنگ زنی دانست. در نتیجه سطحی خشن با توجه به

۴- بحث

آزمایش های تجربی بر اساس تغییر در پارامترهای سرعت برشی و نسبت سرعت درسینگ بر اساس جدول ۲ انجام شد. پس از انجام آزمایش ها، از سه ناحیه قطعه کار زبری سنجی صورت گرفت. نتایج متوسط آن گزارش گردید.

همان گونه که در جدول ۳ دیده می شود خنک کاری برودتی توسط برف دی اکسید کربن نسبت به حالتی که از هوای فشرده برای خنک کاری استفاده گردیده است در تمام آزمایش ها دارای زبری سطح پایین تری بوده است. همان طوری که در شکل ۴- الف مشخص شده است، به علت نقطه ذوب پایین پلیمرها در تصویرهای تهیه شده از سطح قطعه کار نقاط ذوب شدگی و چسبیدگی مجدد پلیمر مشاهده می گردد، در صورتی که این مشکل در شکل ۴- ب به علت اینکه از خنک کننده برودتی در انجام تست بهره گرفته شده است، بسیار کمتر می باشد. ستون

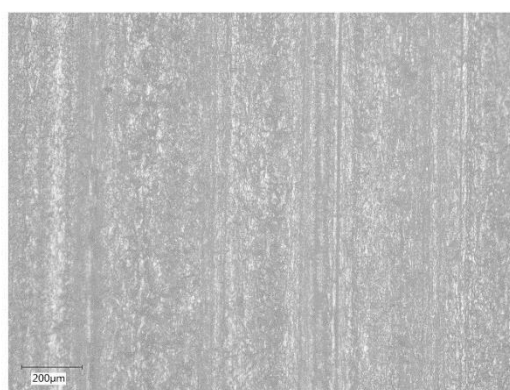
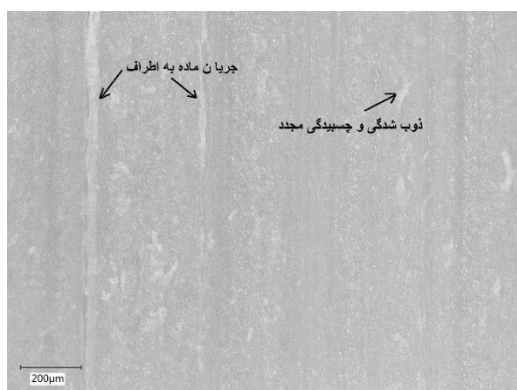
تیزترمی‌گردند، حرارت تولیدی کمتر خواهد شد ولی تیز شدن زیاد دانه‌ها و خشن شدن سطح چرخ سنگ منجر به القا زبری به قطعه کار می‌شود. این امر بر کاهش حرارت تولیدی بر اثر تغییر در شرایط درسینگ فایق آمده و زبری سطح مجدد شروع به افزایش کرده و کیفیت سطح نامطلوبی را به همراه خواهد داشت. شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان دهنده تأثیر تغییر سرعت برشی بر زبری سطح هستند.

ذوب‌شدگی و حرکت ماده به اطراف دیده خواهد شد. از آنجا که دمای ذوب پیک بسیار پایین‌تر از فلزات است، تأثیر دمای سنگ‌زنی بر کیفیت سطح قطعه کار به نسبت بالاتر است. با افزایش نسبت سرعت درسینگ از $0/3$ به $0/3$ دانه‌های چرخ سنگ کمی تیزتر می‌شوند، در نتیجه حرارت تولیدی کمتر شده و زبری سطح شرایط بهتری نسبت به حالت قبل خواهد داشت. با افزایش نسبت سرعت درسینگ از $0/3$ به $0/9$ دانه‌ها بسیار

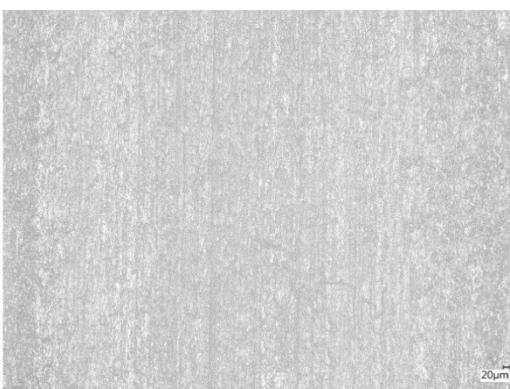
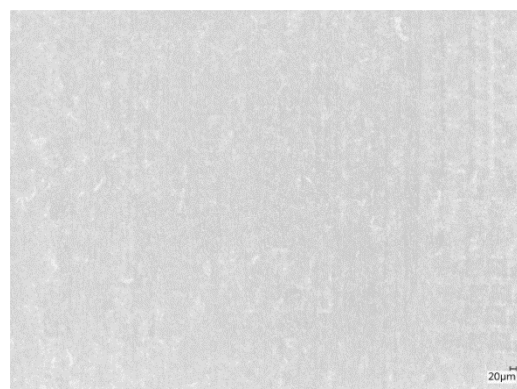
جدول ۳ نتایج آزمایش‌های تجربی

Table 3 Result of experimental Tests

آزمایش	سرعت برشی (m/s)	پیشروی (mm/min)	عمق برش (μm)	U_d	q_d	زبری سطح (μm)		درصد کاهش زبری سطح
						هوای فشرده	خنک کننده برودتی	
۱	۵	۲۰۰۰	۳۰	۵	$-0/3$	۲/۳۹	۱/۶	۳۳
۲	۵	۲۰۰۰	۳۰	۵	$0/3$	۱/۸	۱/۶۶	۷/۷
۳	۵	۲۰۰۰	۳۰	۵	$0/9$	۲/۵۶	۱/۸۸	۲۶/۵
۴	۱۰	۲۰۰۰	۳۰	۵	$-0/3$	۱/۹۱	۱/۵۶	۱۸/۳
۵	۱۰	۲۰۰۰	۳۰	۵	$0/3$	۱/۶۵	۱/۶۳	۱/۲۱
۶	۱۰	۲۰۰۰	۳۰	۵	$0/9$	۲/۶۵	۲/۱۲	۲۰
۷	۱۵	۲۰۰۰	۳۰	۵	$-0/3$	۲/۷۵	۱/۸۶	۳۲/۳۶
۸	۱۵	۲۰۰۰	۳۰	۵	$0/3$	۲/۵۷	۱/۹۵	۲۴/۱۲
۹	۱۵	۲۰۰۰	۳۰	۵	$0/9$	۴/۰۳	۱/۹۸	۵۰/۸۶



(الف)



(ب)

(تابش نور از اطراف رینگ)

(تابش نور بصورت مستقیم)

Fig. 4 The Image of workpiece surface in No. 9 test A) Compressed air B) Cryogenic cooling

شکل ۴ تصویر سطح قطعه کار در آزمایش تجربی شماره ۹ (الف) هوای فشرده (ب) خنک کننده برودتی

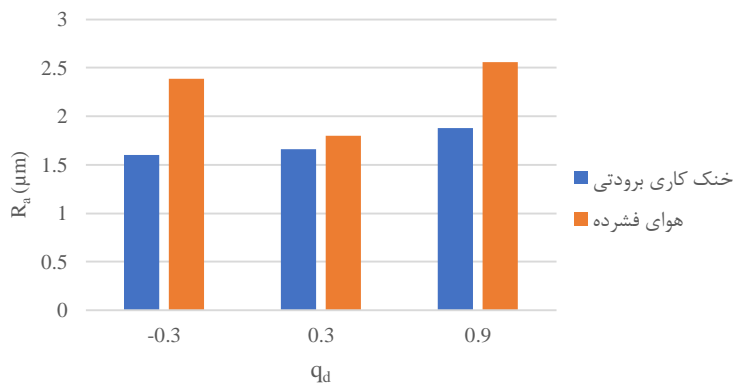


Fig. 5 The effect of changes in the dressing speed ratio at cutting speed 5 m/s

شکل ۵ اثر تغییرات نسبت سرعت درسینگ در سرعت برشی ۵ متر بر ثانیه

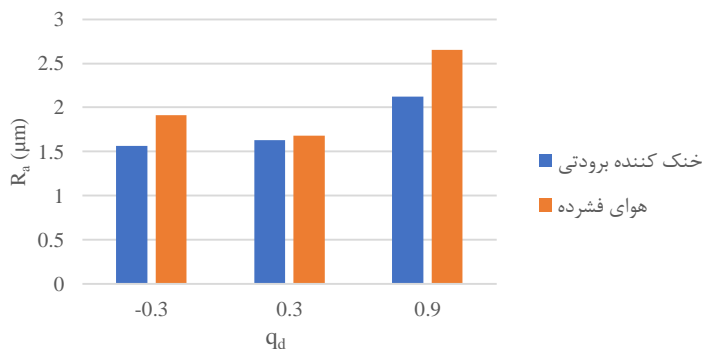


Fig. 6 The effect of changes in the dressing speed ratio at cutting speed 10 m/s

شکل ۶ اثر تغییرات نسبت سرعت درسینگ در سرعت برشی ۱۰ متر بر ثانیه

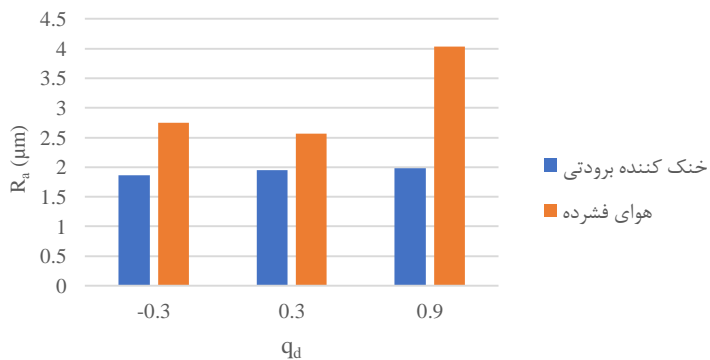


Fig. 7 The effect of changes in the dressing speed ratio at cutting speed 15 m/s

شکل ۷ اثر تغییرات نسبت سرعت درسینگ در سرعت برشی ۱۵ متر بر ثانیه

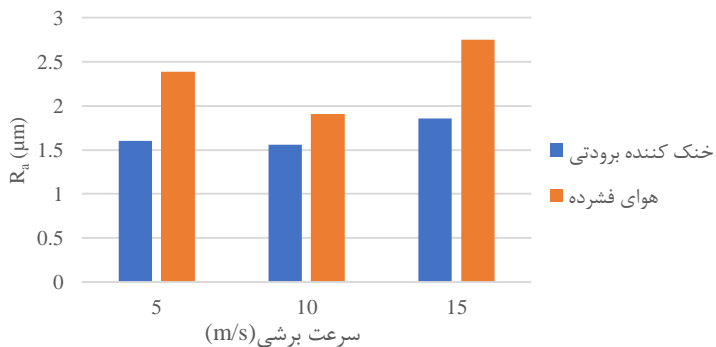


Fig. 8 The effect of changes in the cutting speed at dressing speed ratio -0.3

شکل ۸ اثر تغییرات سرعت برشی در نسبت سرعت درسینگ -۰,۳

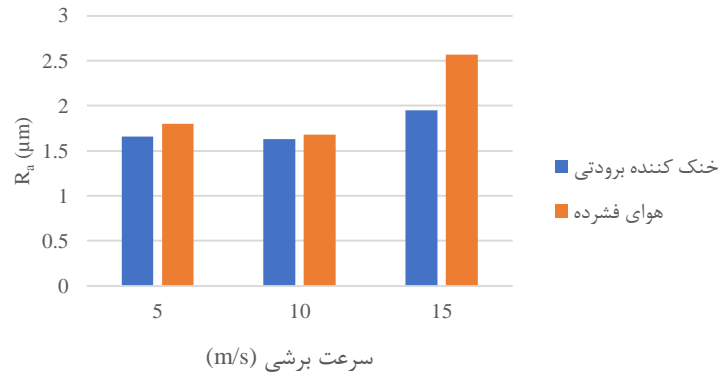


Fig. 9 The effect of changes in the cutting speed at dressing speed ratio 0.3

شکل ۹ اثر تغییرات سرعت برشی در نسبت سرعت درسینگ ۰/۳

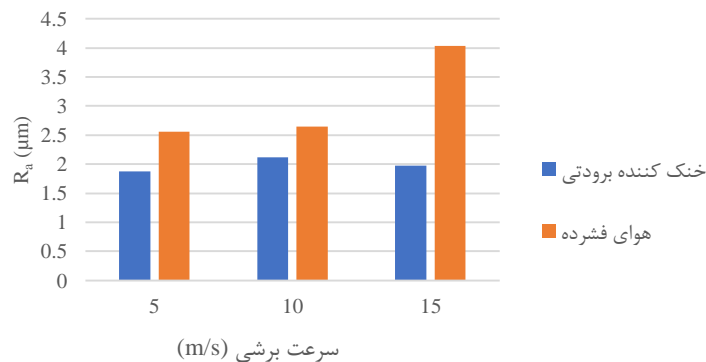


Fig. 10 The effect of changes in the cutting speed at dressing speed ratio 0.9

شکل ۱۰ اثر تغییرات سرعت برشی در نسبت سرعت درسینگ ۰/۹

ماشین کاری پایین نگه داشته شده است و ذوب شدگی موضعی در ماده یا رخ نداده و یا بسیار پایین (در مقایسه با عدم استفاده از خنک کننده برودتی) بوده است.

در آزمایش‌های سنگ‌زنی با خنک کاری برودتی به علت اینکه حرارت تولیدی کنترل شده است، اثر تغییرات زبری سطح با تغییر در نسبت سرعت درسینگ کاملاً قابل مشاهده است و با افزایش نسبت سرعت درسینگ از سمت منفی به مثبت، افزایش زبری سطح مشاهده می‌گردد.

با توجه به اینکه زبری سنجی، روشی خطی است، لذا شاید بصورت قطع نتوان با بررسی زبری سطح به تنهایی نتیجه‌گیری مشخصی از خروجی سنگ‌زنی داشت. همان‌طوری که در جدول ۳ آورده شده است، کمترین بهبود زبری سطح در آزمایش شماره ۵ دیده شد. در صورتی که در شکل ۱۱ (تصویر سطح قطعه‌کار در آزمایش شماره ۵) کاملاً تأثیر خنک کاری برودتی تأیید شده است. شکل ۱۱-الف آزمایش شماره ۵ در حالت استفاده از خنک کننده برودتی و شکل ۱۱-ب همان آزمایش در صورت استفاده از هوای فشرده است. مقایسه شکل‌های ۱۱-الف و ب نشان دهنده تأثیر مفید خنک کننده برودتی در کاهش چسبیدگی ذوب به سطح قطعه‌کار (افزایش زبری) است. ولی

همان‌طوری که در شکل‌های ۸ تا ۱۰ دیده می‌شود، در سنگ‌زنی بدون استفاده از خنک کننده برودتی با افزایش سرعت برشی زبری سطح افزایش یافته است. این رفتار که کاملاً متفاوت از تأثیر شناخته شده بهبود کیفیت سطح با افزایش سرعت برشی در فلزات (به دلیل کاهش ضخامت براده برداشته نشده) است می‌تواند به علت افزایش حرارت تولیدی در ناحیه سنگ‌زنی در سرعت‌های برشی بالاتر و افزایش پلاستیستی و میزان ذوب شدگی موضعی قطعه‌کار باشد.

تغییر قابل ملاحظه‌ای در کیفیت سطح با افزایش سرعت برشی از ۵ به ۱۰ متر بر ثانیه مشهود نیست در صورتی که با افزایش سرعت برشی از ۱۰ به ۱۵ متر بر ثانیه میزان افزایش زبری سطح بیشتر شده است. این افزایش زبری را همان‌گونه که ذکر شد می‌توان به علت افزایش دمای ماشین کاری و ذوب شدگی موضعی و جریان بیشتر ماده در سرعت برشی ۱۵ متر بر ثانیه نسبت به سرعت برشی‌های ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه دانست. ولی در سنگ‌زنی با استفاده از خنک کننده برودتی مشاهده می‌گردد که در تمامی آزمایش‌ها زبری سطح در شرایط یکسانی قرار دارد و به علت استفاده از خنک کننده برودتی دمای ناحیه

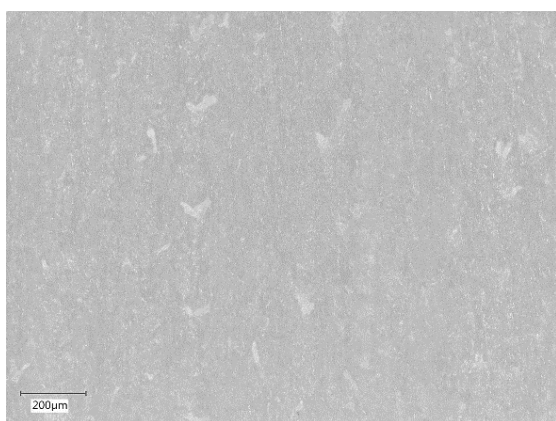
کونفوکال تهیه گردید تا نتایج خروجی اثر خنک کننده‌ها با هم مقایسه گردد. با توجه به آزمایش‌های انجام گرفته، بدترین شرایط آزمایش و بهترین بهبود در استفاده از خنک کننده برودتی مربوط به آزمایش شماره ۹ است. لذا این آزمایش انتخاب گردید تا تصویرهای تهیه شده توسط این میکروسکوپ در دو حالت خنک کننده برودتی (شکل ۱۳- الف) و هوای فشرده (شکل ۱۳- ب) مورد مقایسه قرار گیرد.

همان‌گونه که در شکل ۱۳ دیده می‌شود، تصویرهای دو بعدی و سه بعدی تهیه شده از سطح قطعه کار تأیید بر بهبود شرایط سطح در صورت استفاده از خنک کننده برودتی است. در نهایت می‌توان بیان نمود بهبود کیفیت سطح در صورت استفاده از خنک کننده برودتی به دلیل روان کاری (بسیار کم) این روش، کاهش نرم شدگی حرارتی و سیلان کمتر ماده به اطراف، تشکیل کمتر لبه انباشته و کاهش قابل توجه بارگیری چرخ سنگ است.

وقتی اثر خنک کننده برودتی بصورت زبری فقط گزارش شود، این عدد نشان دهنده بی اثر یا کم اثر بودن این روش خنک کاری است در صورتی که شکل ۱۱ خلاف این را اثبات می‌کند. از این موضوع می‌توان به این نتیجه رسید که تهیه تصویرهای سه بعدی و یا سطحی از قطعه سنگ‌زنی شده پلیمری می‌تواند تحلیل دقیق تری نسبت به زبری سنجی تماسی داشته باشد.

با بررسی تصویرهای سطح قطعه کار در شرایط تغییر در نسبت سرعت درسینگ (شکل ۱۲) ذوب شدگی موضعی موضعی قطعه کار و جسیبیدگی مجدد و جریان ماده کاملاً مشهود است و ادعای صورت گرفته در مورد ذوب شدگی موضعی سطح قطعه کار با تغییر در نسبت سرعت درسینگ (تغییرات میزان حرارت تولیدی در شرایط متفاوت) که در پاراگراف‌های قبلی بیان شد، تأیید می‌گردد.

از سوی دیگر برای بررسی بهتر و کامل تر سلامت سطح، تصویرهای سه بعدی از سطح قطعه کار توسط میکروسکوپ



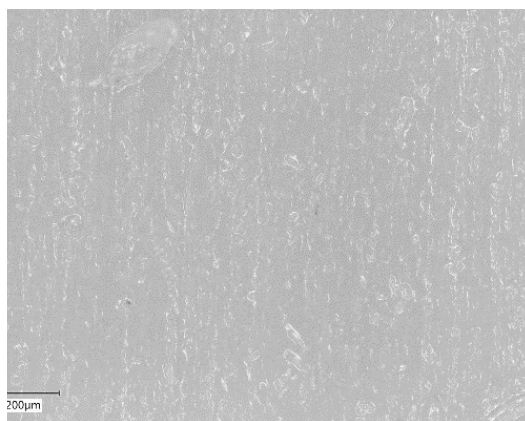
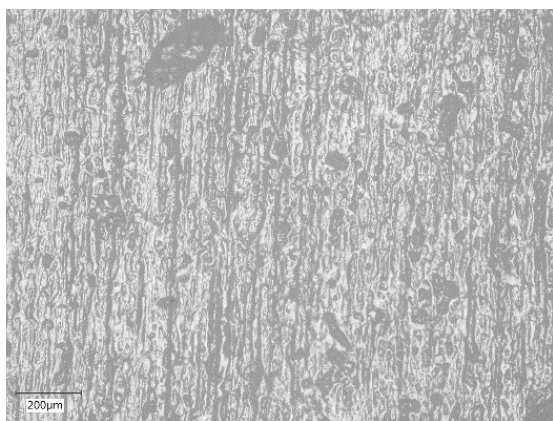
(ب)



(الف)

Fig. 11 Workpiece surface image in test No. 5 a) Cryogenic cooling b) Compressed air

شکل ۱۱ تصویر سطح قطعه کار در آزمایش شماره ۵ الف) خنک کننده برودتی ب) هوای فشرده



(آزمایش ۱)

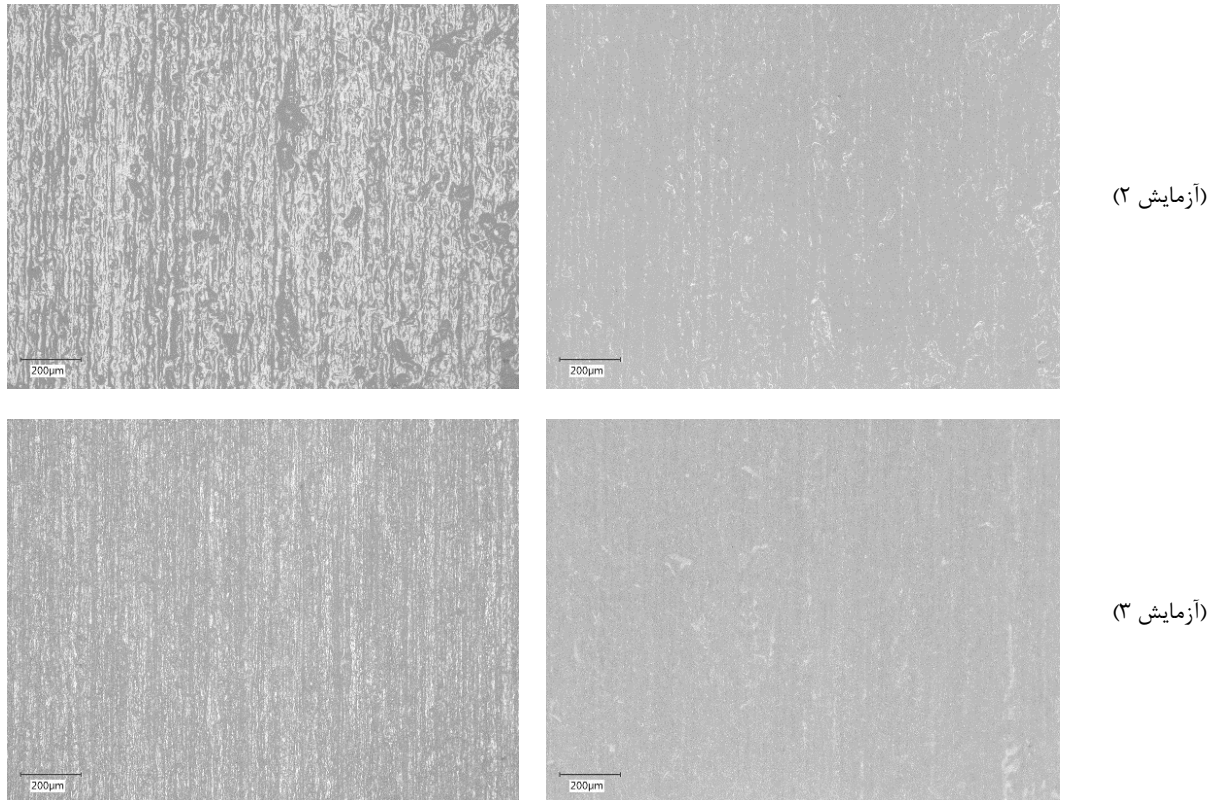
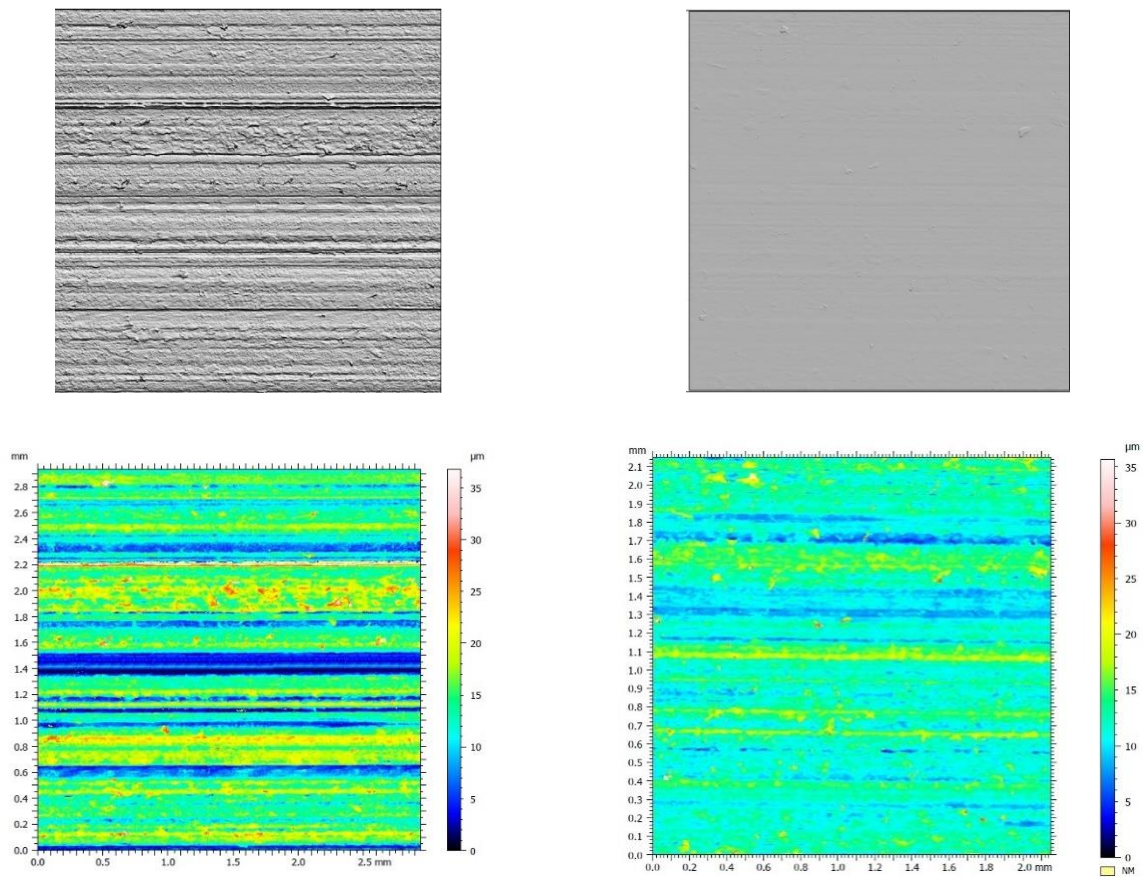


Fig. 12 The effect of changes in dressing speed ratio at cutting speed 5 m/s on the surface of workpiece (compressed air)

شکل ۱۲ اثر تغییرات نسبت سرعت درسینگ در سرعت برشی ۵ متر بر ثانیه بر سطح قطعه کار (هوای فشرده)



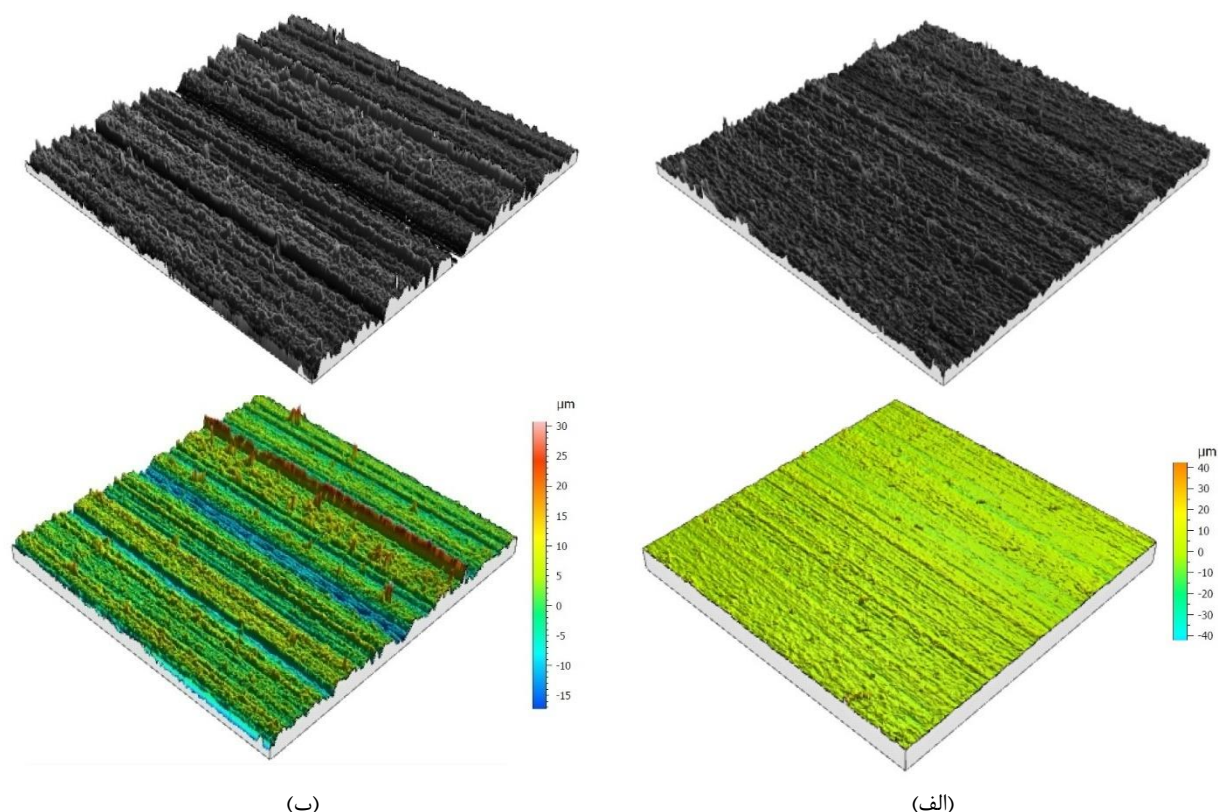


Fig. 13 Topology of grinded surface (Test No. 9) a) Cryogenic cooling b) Compressed air

شکل ۱۳ توپوگرافی سطح سنگ زده شده (آزمایش شماره ۹) الف) خنک کننده برودتی ب) هوای فشرده

۵- نتیجه گیری

به علت پایین بودن استحکام و نقطه ذوب پلیمرها، تغییرات زبری سطح در پلیمرها بسیار متأثر از حرارت تولیدی در ناحیه سنگ‌زنی می‌باشد. در هنگام سنگ‌زنی بدون خنک کننده برودتی با افزایش نسبت سرعت درسینگ از منفی به مثبت ابتدا زبری سطح کاهش یافته ولی مجدد افزایش می‌یابد. زبری سطح نامناسب در نسبت سرعت درسینگ منفی به علت تولید حرارت بالاتر و ذوب شدگی موضعی قطعه کار است. در صورتی که در نسبت سرعت درسینگ ۰/۹ به علت تیز بودن زیاد دانه‌های چرخ سنگ، زبری سطح قطعه کار نامطلوب است. با افزایش سرعت برشی از ۵ به ۱۰ تغییر قابل ملاحظه‌ای در کیفیت سطح وجود ندارد ولی با افزایش بیشتر سرعت برشی، حرارت تولیدی بالاتر رفته و در نتیجه زبری سطح نامطلوبی را در پی دارد. استفاده از خنک کننده برودتی باعث بهبود شرایط سطح با کاهش درجه حرارت منطقه سنگ‌زنی و کمک به حفظ استحکام پلیمر و جلوگیری از جریان ویسکوز آن در تمامی آزمایش‌های تجربی گردید. این روش توانست تا ۵۰ درصد زبری سطح را در تست شماره ۹ (سرعت برشی ۱۵ متر بر ثانیه و نسبت سرعت درسینگ ۰/۹) کاهش دهد.

۶- مراجع

- [1] R. J. Crawford, *Plastics Engineering*. Butterworth-Heinemann, 1981, p. 352.
- [2] S. M. Kurtz, "Chapter 1 - An Overview of PEEK Biomaterials," in *PEEK Biomaterials Handbook* Oxford: William Andrew Publishing, 2012, pp. 1-7.
- [3] S. Malkin and C. Guo, *Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives*. Industrial Press, 2008.
- [4] Y. Yildiz and M. Nalbant, "A review of cryogenic cooling in machining processes," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 9, pp. 947-964, 2008.
- [5] A. Shokrani, V. Dhokia, P. Muñoz-Escalona, and S. T. Newman, "State-of-the-art cryogenic machining and processing," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 26, No. 7, pp. 616-648, 2013.
- [6] I. S. Jawahir *et al.*, "Cryogenic manufacturing processes," *CIRP Annals*, Vol. 65, No. 2, pp. 713-736, 2016/01/01/ 2016.
- [7] S. Paul and A. B. Chattopadhyay, "Effects of cryogenic cooling by liquid nitrogen jet on forces, temperature and surface residual stresses in grinding steels," (in English), *Cryogenics*, Vol. 35, No. 8, pp. 515-523, 1995.
- [8] S. Cordes, F. Hübner, and T. Schaarschmidt, "Next Generation High Performance Cutting by Use of

- using liquid nitrogen jet," (in English), *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 229, pp. 329-337, 2016.
- [14] P. P. Reddy and A. Ghosh, "Effect of cryogenic cooling on spindle power and G-ratio in grinding of hardened bearing steel," *Procedia Materials Science*, Vol. 5, pp. 2622-2628, 2014.
- [15] G. Manimaran and M. PradeepKumar, "Effect of cryogenic cooling and sol-gel aluminawheel on grinding performance of AISI 316 stainless steel," *archives of civil and mechanical engineering*, Vol. 13, pp. 304-312, 2013.
- [16] Petronet.
http://www.petronet.ir/encyclopedia/asset_published/iYSVyd0iQZFE/content/id/2242645?title=%D9%BE%D9%84%DB%8C%D8%A7%D8%AA%D8%B1%D8%A7%D8%AA%D8%B1%DA%A9%D8%AA%D9%88%D9%86 [Online].
- [17] (2014). *PEEK Data sheet*.
- [18] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments, 6th Edition Set*. John Wiley & Sons, Limited, 2007.
- Carbon Dioxide as Cryogenics," *Procedia CIRP*, Vol. 14, pp. 401-405, 2014.
- [9] T. Heep, C. Bickert, and E. Abele, "Application of Carbon Dioxide Snow in Machining of CGI using an Additively Manufactured Turning Tool," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 3, No. 1, p. 15, 2019.
- [10] S. Y. Hong, I. Markus, and W.-c. Jeong, "New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, No. 15, pp. 2245-2260, 2001/12/01/ 2001.
- [11] N. Tapoglou, M. I. A. Lopez, I. Cook, and C. M. Taylor, "Investigation of the Influence of CO₂ Cryogenic Coolant Application on Tool Wear," *Procedia CIRP*, Vol. 63, pp. 745-749, 2017.
- [12] S. H. Musavi, B. Davoodi, "On the Effects of Cryogenic Cooling and Lubrication with Nanofluid on Surface Roughness and Tool Wear in A286 Superalloys Turning", *Journal of Mechanical Structures and Fluid*, Vol. 7, No. 4, pp. 73-85, 1396. (In Persian)
- [13] P. P. Reddy and A. Ghosh, "Some critical issues in cryo-grinding by a vitrified bonded aluminawheel