



بررسی رفتار ماشین کاری پلی اتراترکتون در آزمون تک دانه ساینده

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

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

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

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

* بیرجند، صندوق پستی ۹۷۱۷۵/۶۱۵، hamirabadi@Birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی کامل دریافت: ۷ فروردین ۱۳۹۸ پذیرش: ۱ تیر ۱۳۹۸ ارائه در سایت: بهمن ۱۳۹۸	آزمون تک دانه ساینده یکی از آزمایش‌های اولیه برای شناخت بنیادی رفتار ماده و مکانیزم شکل‌گیری براده تحت فرایند سنگ‌زنی است. در این آزمایش یک دانه به نمایندگی از دانه‌های موجود در چرخ سنگ، با قطعه‌کار درگیر خواهد شد و تفسیر نتایج آن کمک قابل توجهی در شناخت رفتار سنگ‌زنی این ماده می‌کند و مکانیزم براده برداری ماده را تعیین خواهد نمود. پلی‌اتراترکتون به دلیل خواص منحصر به فرد مکانیکی و شیمیایی‌اش در صنایع هوا و فضا و مهندسی پزشکی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از کاربردهای این ماده ساخت ایمپلنت‌ها در صنایع پزشکی است. در این آزمایش تأثیر ضخامت براده برداشته نشده بر روی مکانیزم شکل‌گیری براده پلی‌اتراترکتون مطالعه گردیده است. آزمایش‌های متعددی در عمق‌های برشی مختلف (شروع از ۱ میکرومتر) و سرعت‌های برشی متفاوت (۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه) انجام گرفت. مشخص شد نرخ برش با کاهش عمق براده، کاهش می‌یابد در حالی که میزان شخم‌زنی با کاهش عمق براده، افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت برشی، به انرژی مخصوص بالاتری نیاز است و مقدار انرژی مخصوص در حداکثر عمق برش به مقدار 2.5 j/mm^3 میل می‌کند.
کلیدواژگان: سنگ‌زنی آزمون تک دانه ساینده پلی‌اتراترکتون سرعت برشی انرژی مخصوص سنگ‌زنی	

Investigation of machining behavior of Polyether Ether Ketone in Single grit scratch test

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

1- Mechanical Engineering, Birjand University, Birjand, Iran.

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

* P.O.B. 97175/615 Birjand, Iran, hamirabadi@Birjand.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 27 March 2019
Accepted 22 June 2019
Available February 2020

Keywords:

Grinding
Single Grit Scratch Test
Polyether Ether Ketone
Cutting Speed
Specific Energy

Abstract

The Single grit scratch test is one of the first experiments for the fundamental recognition of the behavior of the material and the mechanism of chip formation under the grinding process. In this Test, a grit as an agent of the grinding wheel, is involved with the workpiece. The interpretation of its results makes a significant contribution to the understanding of the grinding behavior of this material, and the mechanism of cutting. Polyether ether ketone has been considered for its unique mechanical and chemical properties in aerospace and medical engineering. One of its applications is the construction of implants in the medical industry. In this study, the effect of uncut chip thickness has been studied on the mechanism of chip formation of the Polyether ether ketone. Several tests were carried out at different depths (starting from $1 \mu\text{m}$) and different cutting speed (5, 10 and 15 m/s). By increasing the cutting speed, a higher specific energy is required and the amount of energy at a maximum depth would be 2.5 j/mm^3 .

۱- مقدمه

نیستند. همچنین زاویه براده دانه‌ها معمولاً منفی بوده و ضخامت براده نسبت به فرایندهای ماشین‌کاری دیگر (براده برداری با لبه برنده با هندسه منظم) مانند تراش‌کاری و فرز‌کاری بسیار کوچکتر است [۱]. به همین دلایل شناخت و بررسی دقیق این فرایند نسبت به فرایندهای دیگر ماشین‌کاری دشوارتر است. پلی اتراترکتون به دلیل خواص منحصر به فرد مکانیکی و شیمیایی‌اش در صنایع هوافضا و مهندسی پزشکی مورد توجه قرار گرفته است [۲]. از این ماده امروزه بطور فزاینده‌ای در

امروزه کیفیت سطح و دقت ابعادی تنها خواسته‌های فرایند سنگ‌زنی نمی‌باشد. برای تشخیص شرایط بهینه سنگ‌زنی هر قطعه (و با توجه به ماده آن)، داشتن دانش در مورد فرایند سنگ‌زنی ضروری است. در فرایند سنگ‌زنی از ابزاری به نام چرخ سنگ استفاده می‌شود که دارای سه بخش دانه ساینده، چسب و خلل و فرج است. دانه‌ها در پیرامون چرخ سنگ بصورت تصادفی توزیع شده و دارای قاعده خاصی در اندازه و هندسه

Please cite this article using:

M. Khoran, H. Amirabadi, B. Azarhoushang, Investigation of machining behavior of Polyether Ether Ketone in Single grit scratch test, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 9, pp. 54- 62, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

به حالت واقعی سنگ زنی از دانه‌های با اشکال نامنظم استفاده نمود. اثبات شد شکل دانه ساینده تأثیر زیادی بر مکانیزم براده برداری دارد.

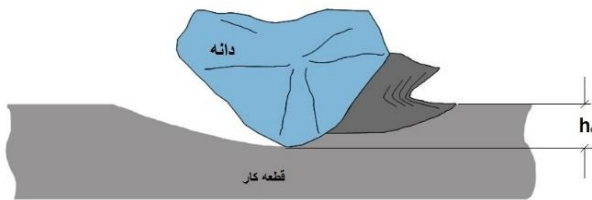


Fig. 1 Single grit scratch test schematic [16]

شکل ۱ شماتیک آزمون تک دانه ساینده [۱۶]

سیتی [۱۳] و همکاران یک مدل تحلیلی برای پیش بینی رفتار تغییر شکل مواد در فرایند سنگ زنی با توجه به اطلاعات تست تک دانه ساینده استخراج نمود. دومن [۱۴] یک مدل المان محدود سه بعدی برای شبیه سازی سر خوردن و شخم زنی در آزمون تک دانه ساینده ارائه داد. کلوکه [۱۵] از نرم افزار دفرم در حالت دو بعدی برای شبیه سازی المان محدود ابزار آزمون تک دانه ساینده استفاده نمود. او تأثیر دانه‌های ساینده بر فرایند سنگ زنی را به طور کامل مورد مطالعه قرار داد و مشخص نمود می توان نتایج آزمون تک دانه ساینده را به فرایند سنگ زنی تعمیم داد [۱۶].

همدی [۱۷] آزمون تک دانه ساینده را در حالت سرعت بالا مورد مطالعه قرار داد تا رفتار دانه و شرایط سایشی آن را مورد مطالعه قرار دهد. آنها بیان نمودند که آزمون سرعت بالا بسیار نزدیک به واقعیت است. عناند و همکاران [۱۸] رفتار سنگ زنی بایوسرامیک Y-TZP را با انجام تست تک دانه ساینده مورد تحلیل قرار دادند. آنها از چندین دانه با زاویه براده مشخص (۰، ۲، ۴-) برای انجام تست و مطالعه رفتار براده برداری این سرامیک استفاده نمود و برای تحلیل نتایج از نیرو سنجی و آکوستیک امیشن بهره گرفتند. مشخص شد عمق‌های بالاتر از ۵ میکرومتر منجر به شکست ترد می شود. زاهدی [۱۹] آزمون تک لبه ساینده را به منظور تعمیم اثر دانه‌های ساینده در حالت استاتیک (تئوری جسم فرو رونده تیز در مواد ترد) به اثر واقعی براده برداری آنها و نیز در نظر گرفتن سرعت برشی و مؤلفه‌های نیرو بر روی سرامیک آلومینا-زیرکونیا بکار گرفت. زانگ و همکاران [۲۰] اثر تست تک دانه ساینده بر آلیاژ مس را مورد مطالعه قرار دادند و نتایج آن را با شبیه سازی صورت گرفته با نرم افزار ادونت ادج^۶ مقایسه نمود. پس از تأیید مدل توسط

ایمپلنت‌های پزشکی، ارتوپدی و ستون فقرات بعلت خواص ضد آلرژیکی که دارد، به عنوان یک زیست ماده^۱ پیشرفته استفاده می گردد [۳]. بسیاری از ایمپلنت‌های پزشکی نیاز به عملیات سطحی برای یکپارچگی با استخوان^۲ دارند ولی در بعضی از ایمپلنت‌ها مانند مفاصل بندگاهی و گردنی نیاز به زبری سطح بسیار پایین است (سایش و اصطکاک حداقل) [۴]. ایزاماشا و همکاران [۵] فرایند فرزکاری پلی اتراکتون را مورد مطالعه قرار دادند. آنها از روش طراحی آزمایش سطوح پاسخ برای بررسی تأثیر ورودی‌های چون سرعت برشی، پیشروی و عمق برش استفاده کردند. پیشروی، سرعت برشی و عمق برش محوری به ترتیب حداکثر تأثیر را بر زبری سطح داشتند.

یکی از روش‌های شناخت فرایند سنگ زنی یک ماده انجام آزمون تک دانه ساینده است. در این آزمایش یک دانه به نمایندگی از دانه‌های موجود چرخ سنگ، با قطعه کار درگیر خواهد شد. اگر رفتار دانه‌ای بر روی خصوصیات برش ماده و فیزیک آن شناخته شود، مسلماً شناخت فرایند سنگ زنی نیز دقیق تر خواهد شد. از آزمایش تک دانه ساینده جهت مطالعه قابلیت برداشت ماده توسط دانه‌های ساینده به منظور درک فرایند سنگ زنی و تأثیر آن بر سطح ماشین کاری شده استفاده می شود [۶]. در شکل ۱ شماتیک حرکت دانه نمایش داده شده است. اولین بررسی فرایند سنگ زنی توسط آزمون تک دانه ساینده توسط تاکاناکا انجام گرفت و فرضیه سر خوردن مطرح شده توسط محققین قبلی را به کمک این آزمایش اثبات نمود [۷]. در پژوهش‌های صورت گرفته مشخص شد با انجام آزمون تک دانه ساینده، هر سه فرضیه سر خوردن^۳، شخم زدن^۴ و برش^۵ که پیش تر معرفی شده بود، کاملاً مشهود می باشد. آنها با کمک شبیه سازی المان محدود این آزمایش را تحلیل نمودند و تأثیر این آزمایش بر سطح ایجاد شده قطعه کار را مورد مطالعه قرار دادند (چن و همکاران [۸، ۹]). گیفن [۱۰] با استفاده از روش اکوستیک امیشن، تست تک دانه ساینده را تحلیل دینامیکی نمود. چای و همکاران [۱۱] ضرایب اصطکاک مواد مختلف در فرایند سنگ زنی با بکارگیری محاسبات ریاضی و آزمایش تجربی تک دانه ساینده را محاسبه نمود. عزیزی [۱۲] بررسی فرایند سنگ زنی به کمک خراش ایجاد شده توسط یک دانه ساینده از جنس آلومینا بر روی فولاد تندبر را بصورت تجربی مورد مطالعه قرار داد. وی برای نزدیک شدن این آزمایش

¹ Biomaterial

² Osseointegration

³ Rubbing

⁴ Plowing

⁵ Cutting

⁶ Advant Edge

آزمون‌ها در موسسه KS⁸ دانشگاه فورت وانگن انجام گرفت.

جدول ۱ خواص پلی اتر اترکتون [۲۱]

Table 1 Specifications of Polyether Ether Ketone

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

۳-۲-۳- دینامومتر

برای سنجش نیروی ایجاد شده در برداشت براده توسط یک دانه ساینده از دینامومتر مینیاتوری ۹۲۵۶ شرکت کیستلر استفاده شده است. این دینامومتر برای اندازه‌گیری نیروهای بسیار پایین با دقت بالا استفاده می‌شود. رنج اندازه‌گیری نیروی این دینامومتر از ۲۵۰- تا ۲۵۰ نیوتن است. یکی از مهمترین تجهیزات دینامومتری در تست تک دانه ساینده علاوه بر دینامومتر، کارت آنالوگ به دیجیتال با نرخ داده برداری بسیار بالا است. چرا که مقدار نیرو پایین و زمان تماس چند هزارم ثانیه است. این کارت دارای نرخ داده برداری ۳۰۰۰۰۰ داده بر ثانیه بود.

۴-۲-۴- میکروسکوپ کونفوکال

برای بررسی اندازه و میزان نفوذ و همچنین طول هر شیار، از شیار ایجاد شده توسط میکروسکوپ کونفوکال نانو فکوس (میکروسرف) تصویر سه بعدی با بزرگنمایی 50x تهیه گردید تا بتوان این فرایند را تحلیل نمود. این میکروسکوپ در

مقدار نیروی اندازه‌گیری شده، مقادیر تنش پسماند، کرنش پلاستیک و جریان ماده توسط نتایج نرم‌افزار مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

با توجه به بررسی پیشینه پژوهش، مشخص شد مطالعه‌ای در مورد سنگ‌زنی و یا آزمون تک دانه‌ساینده پلی اتر اترکتون انجام نگرفته است. این تحقیق قسمتی از مطالعه جامع فرایند سنگ‌زنی پلی اتر اترکتون است، اولین گام انجام آزمایش‌های تک دانه ساینده است. لذا لزوم انجام این پژوهش احساس می‌گردد. در این آزمایش تأثیر ضخامت براده برداشته نشده بر روی مکانیزم شکل‌گیری براده پلی اتر اترکتون مطالعه گردیده است. آزمایش‌های متعددی در عمق‌های برشی مختلف (شروع از ۱ میکرومتر) و سرعت‌های برشی متفاوت (۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه) انجام گرفت.

۲- آزمایش‌های تجربی

۲-۱- مواد

پلی اتر اترکتون^۷ یک ترموپلاستیک حلقوی و نیمه بلوری است که دارای مقاومت بسیار بالایی در گرما (در دمای بالای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد)، عوامل شیمیایی و الکتریسیته بوده و از استحکام مکانیکی، مقاومت خمشی، مقاومت به خزش، استحکام پیچشی، چقرمگی و سفتی بالا برخوردار است. قطعه‌کار از ورقی به ضخامت ۶/۵ میلی‌متر به ابعاد ۳۰*۸۰ میلی‌متر آماده و بر روی سطح ۳۰*۸۰ آن شیارها ایجاد گردید. در جدول ۱ خواص این ماده آورده شده است.

۲-۲- ابزار

برای انجام آزمایش‌های تجربی تک دانه ساینده از دیسکی کمک گرفته شد که بر روی سطح جانبی آن (محیط دیسک) دانه‌ای از جنس CBN و اندازه حدوداً ۶۰۰ میکرومتر با کد B 602 چسبانده شده بود. فاصله نوک دانه تا مرکز دیسک ۵۴/۱ میلی-متر بوده که باتوجه به مقدار بسیار کوچک اعشار، در محاسبات همان ۵۴ میلی‌متر لحاظ شده است. تمامی تست‌ها با یک ابزار انجام گرفت. دانه ساینده پس از انجام تست‌ها مجدداً زیر میکروسکوپ مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد دانه ساینده دچار هیچ نوع خوردگی و سایشی نشده است.

چیدمان تجهیزات در شکل ۲- الف آورده شده است. تصویر دانه ساینده در شکل ۲- ب آورده شده است. برای انجام آزمایش‌ها از ماشین سی ان سی Muga بهره گرفته شد. تمامی

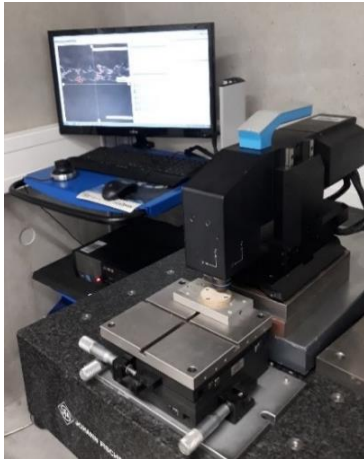
⁸ Kompetenzzentrum für Spanende Fertigung (Institute of Grinding and Precision Technology (KSF-Germany))

⁹ Nanofocus Mobile (usurf)

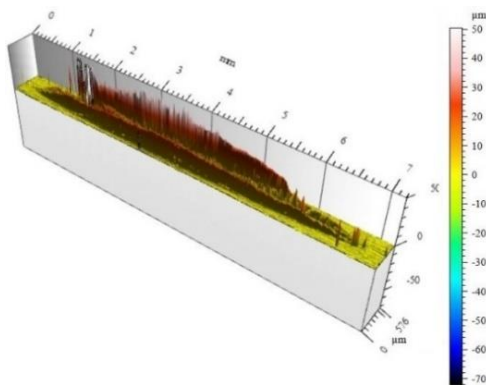
⁷ Polyether Ether ketone (PEEK)

تمامی آزمایش‌ها یکسان بود. تنظیمات به گونه‌ای انجام گرفت که در هر ردیف شیارهای با عمق برش یکسان ایجاد گردد و با حرکت در جهت عمودی مجدد شیارهای با عمق برش بیشتر ایجاد شود.

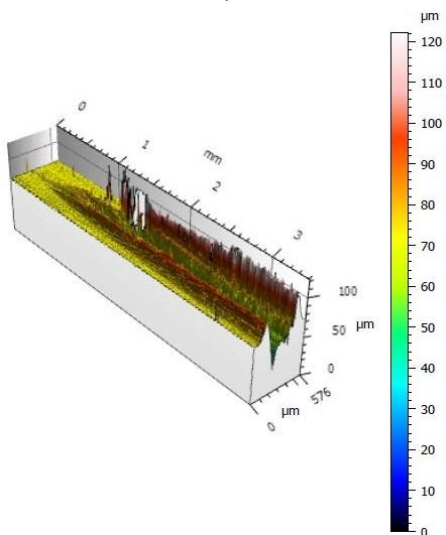
شکل ۳- الف و تصویر تهیه شده توسط آن در شکل‌های ۳- ب و ج نمایش داده شده است. در این تصویر مواد جریان یافته به اطراف به وضوح قابل دیدن است. شکل ۴ تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری را نشان می‌دهد.



(الف)

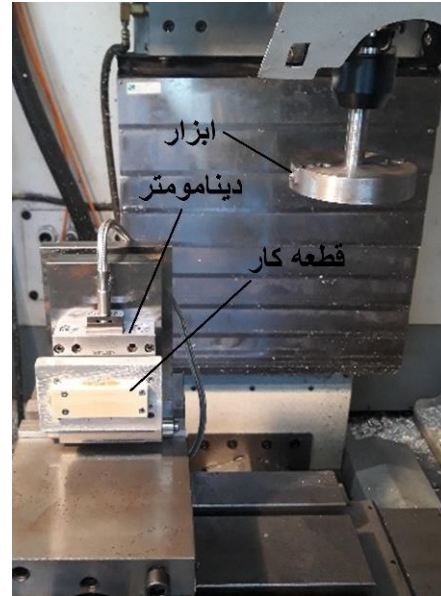


(ب)

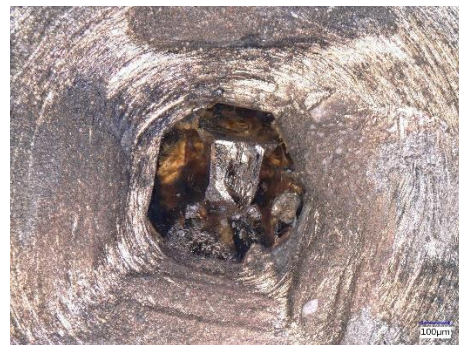


(ج)

Fig. 3 A) Confocal Microscope **B and G)** 3D Image of a scratch
 شکل ۳ الف) تصویر میکروسکوپ کونفوکال ب و ج) تصویر سه بعدی تهیه شده از یک شیار
 با توجه به پارامترهای ورودی آزمایش، تعداد ۱۹ ردیف شیار



(الف)



(ب)

Fig. 2 A) Set up of experimental tests **B)**Grit

شکل ۲ الف) چیدمان انجام آزمایش ب) دانه ساینده

۲-۵- شرایط انجام آزمایش

این مقاله قسمتی از یک پژوهش جامع در مورد مطالعه فرایند سنگ‌زنی پلیمر پلی اترکتون می‌باشد، لذا این پژوهش راهنمایی برای ادامه کار است. ورودی‌های آزمایش، سرعت برشی با سه سطح ۵، ۱۰، و ۱۵ متر بر ثانیه و عمق‌های شیار متفاوت (شروع از ۱ میکرومتر) انتخاب گردید. در عمق‌های برشی کمتر از ۶ میکرومتر، ۲ میکرومتر اختلاف عمق برش هر شیار بود و برای عمق‌های برش بیشتر از ۱۰ میکرومتر اختلاف‌ها بسیار بالا در نظر گرفته شد تا بتوان گستره وسیعی از عمق‌های برشی مختلف را مورد مطالعه قرار داد. پارامترهای دیگر برای

و این تصویرها مورد تحلیل قرار گرفت. مواردی چون طول شیار، حداکثر عمق شیار، حجم براده برداشته شده، حجم ماده جریان یافته به اطراف شیار محاسبه گردید. همان طوری که در شکل ۵ دیده می شود، تصویر مقطع عرضی یک شیار نمایش داده شده است که ماده جریان یافته به اطراف و شیار ایجاد شده کاملاً مشخص شده است. در این شکل A_p سطح مقطع ماده جریان یافته و A_{ch} سطح شیار ایجاد شده است.

شکل ۶ مقطع طولی شیار را نشان می دهد. همان طوری که گفته شد شعاع ابزار ۵۴ میلی متر است، ولی دیده می شود که این شعاع به ۱۴۶ میلی متر افزایش پیدا کرده است.

با سرعت های مختلف و عمق های برشی مختلف ایجاد گردید. از هر ردیف شیار به نمایندگی تعدادی شیار (در عمق های برش کم تعداد بیشتر و در عمق های برش بالا تعداد کمتر) انتخاب و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. چرا که رفتار ماده در عمق های کم بیشتر مد نظر است (تغییرات لغزش و شخم زنی در عمق کم نمایان تر است). در عمق های کم تعداد شیار با عمق یکسان بیشتری مورد تحلیل قرار گرفت. کل شیارهای مورد بررسی قرار گرفته ۵۸ شیار بوده است.

۳- نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش و اندازه گیری نیرو، از شیارهای موجود توسط میکروسکوپ کونفوکال تصویرهای سه بعدی تهیه گردید



Fig. 4 Image of optical microscope

شکل ۴ تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری

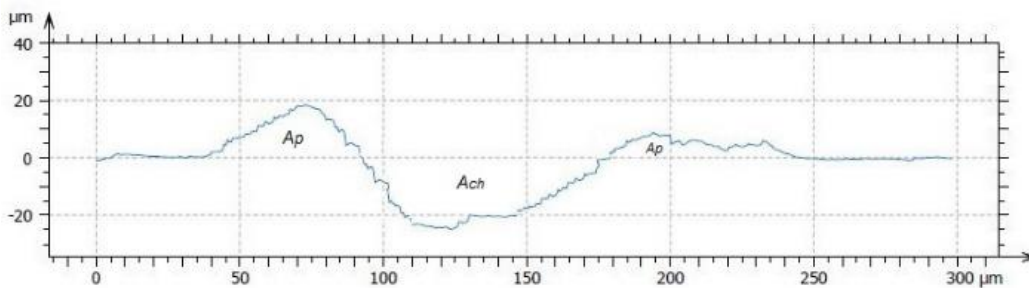


Fig. 5 Cross section of Scratch

شکل ۵ تصویر مقطع عرضی شیار

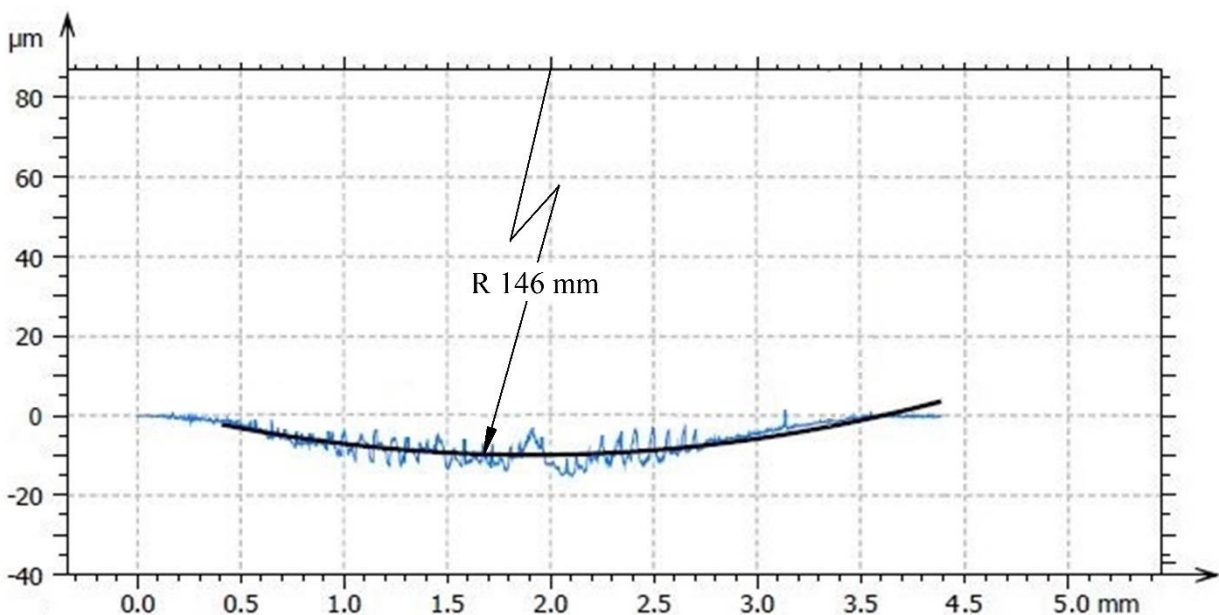


Fig. 6 Longitudinal section of Scratch

شکل ۶ تصویر مقطع طولی شیار

نسبت نیرو به ۱ نزدیک می‌شود. زیرا عمق برشی بالاتر به معنی افزایش برش و کاهش سرخوردن و شخم‌زنی است و هر چه عمق برش بیشتر شود، نیروی مورد نیاز برای نفوذ ذره به درون قطعه کار به نیروی برش ماده نزدیک‌تر می‌شود.

از سوی دیگر مشخص است با افزایش سرعت برشی، نسبت نیرو کاسته می‌شود. این کاهش بدلیل این است که با افزایش سرعت برشی بدلیل افزایش حرارت ناحیه شکل‌گیری براده، نیروی تشکیل براده کاهش خواهد یافت در نتیجه نسبت نیرو کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، هر چه مقدار عمق برش بیشتر شود، نسبت عمق برش که در رابطه (۳) تعریف شده است به عدد کمتری میل می‌کند.

این افزایش شعاع بدلیل برگشت فنری ماده و تغییر شکل کل قطعه کار است. هرچه درصد لغزش بالاتر باشد این شعاع بالاتر و هر چه مقدار لغزش کمتر باشد این شعاع به شعاع ابزار نزدیک خواهد شد. زیرا سهم لغزش و شخم زنی در عمق‌های برش کم بیشتر از سهم آن در عمق‌های برش بالا است، لذا در شیارهای با عمق‌های برش بالاتر (سهم برش بالاتر از لغزش و شخم‌زنی است) این شعاع به شعاع ابزار نزدیک‌تر است.

یکی از پارامترهای مورد تحلیل نسبت نیرو است. نسبت نیرو (رابطه ۱) از تقسیم نیروی مماسی به نیروی نرمال محاسبه می‌گردد.

$$Force\ ratio = \frac{F_t}{F_n} \quad (1)$$

که در آن F_t نیروی مماسی و F_n نیروی نرمال است. همان‌طوری که در شکل ۷ دیده می‌شود با افزایش عمق شیار،

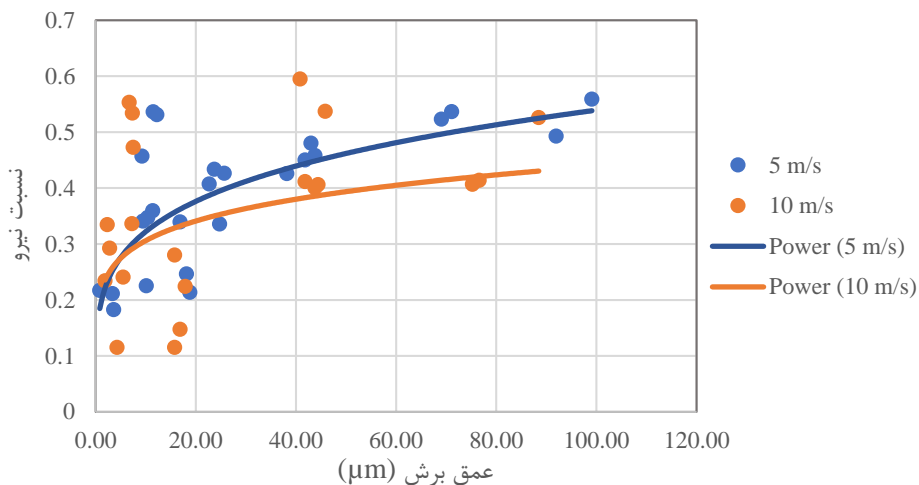


Fig. 7 The force ratio diagram at the different cutting speed and depth of cut of single grit scratch test

شکل ۷ نمودار نسبت نیرو در سرعت‌های برشی و عمق‌های برشی مختلف آزمون تک دانه ساینده

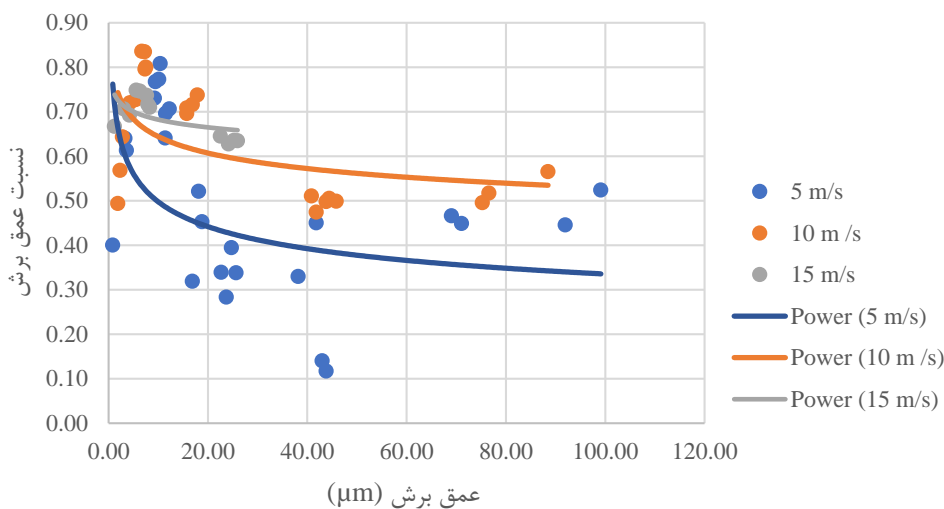


Fig. 8 The depth ratio diagram at the different cutting speed and depth of cut of single grit scratch test

شکل ۸ نمودار نسبت عمق برش در سرعت‌ها و عمق‌های برش مختلف آزمون تک دانه ساینده

$$f_{ab} = \frac{V_{ch} - V_p}{V_{ch}} \quad (4)$$

هر چه این نسبت به ۱ نزدیک تر شود یعنی حجم بیشتری از ماده توسط براده دور شده و میزان جریان ماده به اطراف کمتر است. شکل ۹ نشان می‌دهد که با بیشتر شدن عمق برش، میزان براده بیشتری تشکیل می‌شود و از میزان جریان ماده کاسته می‌شود. در عمق‌های برش کم، میزان سر خوردن ابزار بر روی قطعه کار منجر به جریان ماده به اطراف می‌شود.

انرژی مخصوص به عنوان انرژی لازم جهت برداشت واحد حجم ماده تعریف می‌شود. انرژی مخصوص سنگ‌زنی از فرایندهای ماشین کاری بیشتر است. یعنی برای برداشت حجم واحدی از براده توسط این فرایند انرژی بیشتری نسبت به دیگر فرایندهای ماشین کاری صرف می‌شود. انرژی مخصوص از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد.

$$e_c = \frac{v_c \cdot \int F_t dt}{V_c} \quad (5)$$

که در آن e_c انرژی مخصوص بر حسب (j/mm^3) ، v_c سرعت برشی بر حسب (mm/s) ، V_c حجم براده برداشته شده بر حسب (mm^3) و F_t نیروی مماسی بر حسب (N) و dt نشان دهنده انتگرال بر حسب تغییرات زمان است. با افزایش سرعت برشی، برای براده برداری به انرژی مخصوص بالاتری نیاز است زیرا سرعت برشی بالاتر به معنی ضخامت براده تغییر شکل نیافته کمتر است و ضخامت براده کمتر به معنی شخم‌زنی و لغزش بالاتر و نسبت کمتر براده برداری است. در عمق‌های برشی بالاتر، انرژی مخصوص هر سه سرعت به هم نزدیک شده و به مقدار $2/5 j/mm^3$ می‌رسد. از این نقطه به بعد هر چه عمق برش بیشتر شود، مقدار انرژی از این میزان کمتر نخواهد شد (شکل ۱۰).

این اتفاق به این معنی است که در عمق‌های برش بالاتر، عدد عمق برش عملی به عدد عمق برش تئوری نزدیک می‌شود. زیرا نسبت عمق برش به عنوان پارامتری جهت سنجش میزان برگشت فنری و انقباض مطرح می‌گردد و در عمق‌های برش کم، برگشت فنری درصد بالاتری از عمق برش را به خود اختصاص می‌دهد. از سوی دیگر سرعت برشی کمتر منجر به تولید عمق برش عملی بیشتری خواهد شد زیرا حرارت تولیدی کمتر و زمان کافی برای برداشت براده به نسبت سرعت‌های بالاتر وجود دارد. عمق برش تئوری با داشتن میزان طول ایجاد شده شیار (توسط میکروسکوپ کونفوکال اندازه‌گیری می‌شود) و قطر ابزار قابل محاسبه است.

$$D_{T,Max} = 54 * (1 - \cos(\text{ASin}(L/108))) \quad (2)$$

$$Depth_{ratio} = \frac{D_{T,Max} - D_{Exp,Max}}{D_{T,Max}} \quad (3)$$

که در آن L طول شیار عملی، $D_{T,Max}$ حداکثر عمق برش تئوری، $D_{Exp,Max}$ حداکثر عمق برش عملی است.

یکی دیگر از پارامترهای مهم که محاسبه آن ضرورت دارد، پارامتری به نام نسبت برداشت ماده است. نسبت برداشت ماده به عنوان ملاکی جهت سنجش میزان براده برداشت شده از یک شیار به میزان ماده جریان یافته به کناره‌های شیار تعریف می‌شود. یعنی چه میزان از این ماده در صورت مواجهه با دانه برنده، بصورت براده از منطقه ماشین کاری دور و چه میزانی از ماده به اطراف جریان یافته و تشکیل قله (در اطراف شیار) می‌دهد.

در شکل ۵ (نمای جانبی) و شکل ۳ (تصویرهای سه بعدی) می‌توان مواد جریان یافته به اطراف را بصورت کامل دید. مقدار این ماده را می‌توان بصورت یک نسبت از رابطه (۴) محاسبه نمود. f_{ab} نسبت برداشت ماده، V_{ch} میزان حجم براده برداشته شده و V_p میزان ماده رانده شده به اطراف است.

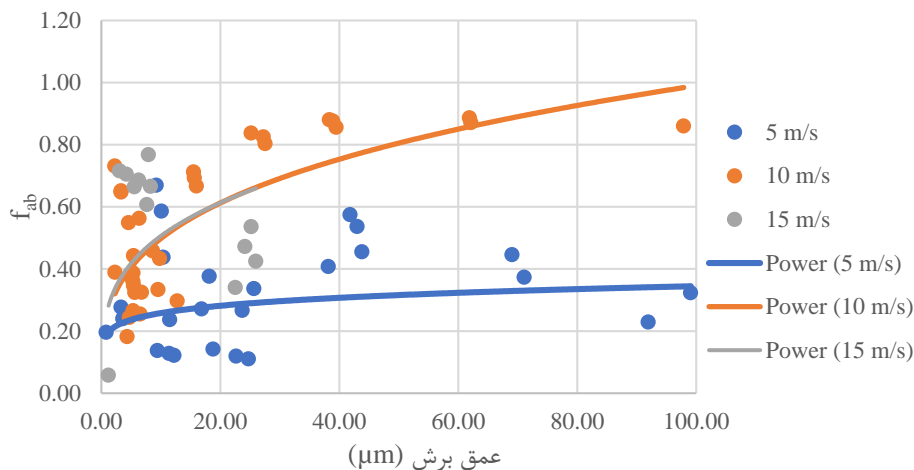


Fig. 9 The chip to pile up ratio diagram of single grit scratch test

شکل ۹ نمودار نسبت براده برداشته شده به ماده جریان یافته به اطراف در آزمون تک دانه ساینده

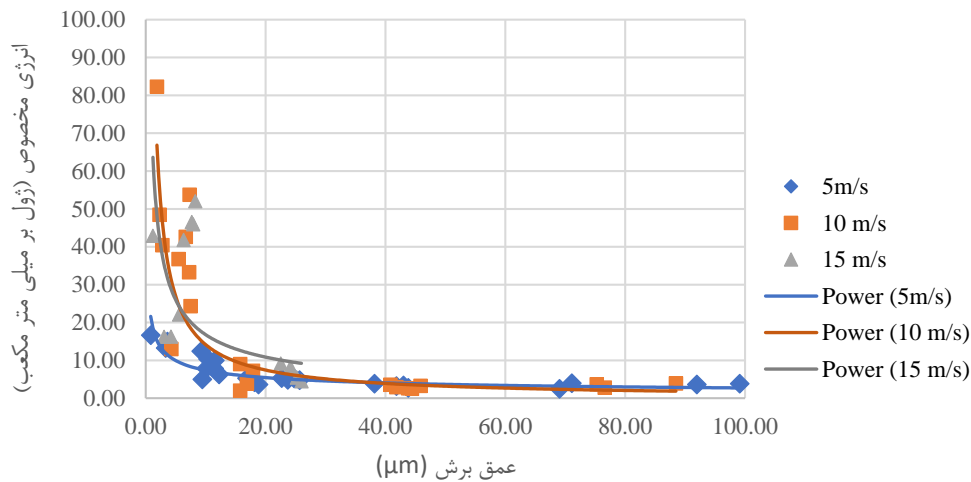


Fig. 10 Specific energy of single grit scratch test

شکل ۱۰ نمودار انرژی مخصوص آزمون تک دانه ساینده

که میزان شخم زنی با کاهش عمق براده، افزایش می یابد.

- عمق برش تأثیر قابل ملاحظه ای در شعاع کمان ایجاد شده دارد. با کاهش عمق برش، سهم لغزش بالاتر رفته در نتیجه شعاع کمان شیار ایجاد شده بسیار بالاتر از شعاع ابزار خواهد بود. با افزایش عمق برش، شعاع کمان به شعاع ابزار نزدیک خواهد شد.
- مکانیزم براده برداری حاکم، مکانیزم مواد داکتیل بود.
- حداقل انرژی مخصوص به $2/5 \text{ j/mm}^3$ میل می کند.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان از مؤسسه KSF و پرسنل آن جهت کمک به انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را دارند.

۶- مراجع

- [1] B. Azarhoushang, "Intermittent grinding of ceramic matrix composites " Ph.D, Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik, Stuttgart University, 2011.
- [2] 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].
- [3] S. M. Kurtz, "Chapter 1 - An Overview of PEEK Biomaterials," in *PEEK Biomaterials Handbook* Oxford: William Andrew Publishing, 2012, pp. 1-7.
- [4] R. Izamshah and R. Abdullah, "Optimisation of machining parameters for milling polyetheretherketones biomaterial," *Applied Mechanics and materials*, Vol. 699, pp. 198-203, 2014.

با توجه به بررسی های صورت گرفته از مقاطع عرضی شیارهای ایجاد شده و عدم مشاهده ترک در مقاطع عرضی و با در نظر گرفتن این بحث که مکانیزم براده برداری در مواد شکننده، مکانیزم ایجاد و گسترش ترک است، مشخص شد که رفتار براده برداری این ماده همانند مواد و فلزات ضربه پذیر (داکتیل) است یعنی مکانیزم براده برداری این ماده تغییر شکل پلاستیک است.

۴- نتیجه گیری

به منظور بررسی رفتار پلی اترکتون در فرایند سنگ زنی انجام آزمون تک دانه ساینده ضروری است. آزمایش ها در عمق های برشی مختلف (شروع از ۱ میکرومتر) و سرعت های برشی متفاوت (۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه) انجام گرفت. مشخص گردید که:

- با افزایش سرعت برشی و عمق برش، حجم ماده جریان یافته به اطراف کاسته می شود.
- با افزایش سرعت برشی به انرژی مخصوص بالاتری برای برداشت براده در عمق های برشی پایین نیاز است در صورتی که در عمق های برشی بالا، سرعت برشی تأثیر چندانی ندارد.
- در عمق های برشی پایین، نسبت نیروی مماسی به نیروی نرمال کم بوده که با افزایش عمق برش، این نسبت افزایش می یابد.
- در سرعت های برشی کمتر میزان عمق برشی بیشتری نسبت به سرعت های برشی بالاتر ایجاد می شود.
- نرخ برش با کاهش عمق براده، کاهش می یابد در حالی

- [13] D. Setti, B. Kirsch, and J. C. Aurich, "An Analytical Method for Prediction of Material Deformation Behavior in Grinding Using Single Grit Analogy," *Procedia CIRP*, Vol. 58, pp. 263-268, 2017/01/01/ 2017.
- [14] D. A. Doman, R. Bauer, and A. Warkentin, "Experimentally validated finite element model of the rubbing and ploughing phases in scratch tests," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 223, No. 12, pp. 1519-1527, 2009/12/01 2009.
- [15] F. Klocke *et al.*, "Examples of FEM application in manufacturing technology," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 120, No. 1, pp. 450-457, 2002/01/15/ 2002.
- [16] F. Klocke and A. Kuchle, *Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping*. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [17] H. Hamdi, M. Dursapt, and H. Zahouani, "Characterization of abrasive grain's behavior and wear mechanisms," *Wear*, Vol. 254, No. 12, pp. 1294-1298, 2003/11/01/ 2003.
- [18] S. P. A. P, A. N, and V. L, "Evaluation of grinding strategy for bioceramic material through a single grit scratch test using force and acoustic emission signals," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 37, pp. 457-469, 2019/01/01/ 2019.
- [19] A. Zahedi, "Improvement grinding condition of engineering ceramic by ultrasonic and laser dressing", Ph.D, Mechanical Engineering, Sharif university, 1394 (In Persian)
- [20] L. Zhang, T. Zhang, B. Guo, L. Yan, and F. Jiang, "Research on the Single Grit Scratching Process of Oxygen-Free Copper (OFC)," *Materials*, Vol. 11, No. 5, p. 676, 2018.
- [21] (2014). *PEEK Data sheet*.
- [5] R. Izamshah, M. A. Azam, M. Hadzley, M. A. M. Ali, M. S. Kasim, and M. S. A. Aziz, "Study of Surface Roughness on Milling Unfilled-polyetheretherketones Engineering Plastics," *Procedia Engineering*, Vol. 68, pp. 654-660, 2013.
- [6] T. Ö. Tahsin and C. Xun, "Experimental study on single grit grinding of Inconel 718," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 229, No. 5, pp. 713-726, 2015/05/01 2014.
- [7] T. T. Öpoz and C. Xun, "Process monitoring and metrology for single grit grinding test performance," in *The 17th International Conference on Automation and Computing*, 2011, pp. 143-148.
- [8] X. Chen, T. T. Öpöz, and A. Oluwajobi, "Analysis of Grinding Surface Creation by Single-Grit Approach," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 139, No. 12, pp. 121007-121007-10, 2017.
- [9] X. Chen and T. T. Öpöz, "Simulation of Grinding Surface Creation – A Single Grit Approach," (in English), *Advanced Materials Research*, Research Vol. 126, No. 126-128, pp. 23-28, 2010.
- [10] J. M. Griffin and F. Torres, "Dynamic precision control in single-grit scratch tests using acoustic emission signals," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, journal article Vol. 81, No. 5, pp. 935-953, November 01 2015.
- [11] G. Q. Cai, B. F. Feng, T. Jin, and Y. D. Gong, "Study on the friction coefficient in grinding," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, No. 1, pp. 25-29, 2002/10/11/ 2002.
- [12] A. Azizi, M. Mohamadyari, Grinding process investigation using creating scratch by an abrasive grit, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 245-250, 2015 (In Persian)