مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، مهر ۱۳۹۹، دوره ۷، شماره ۷، ص‌ص. ۵۱- ۵۸

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

مطالعه و بررسی انرژی برش و تشکیل براده در فرایند سنگ‌زنی پلیمر پلی اتراترکتون

محمد خوران[۱]، بهمن آذرهوشنگ[۲]، حسین امیرآبادی[۳*]

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی اسفراین، اسفراین، ایران

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

۳-دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه نیشابور، نیشابور، ایران

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۸ بهمن ۱۳۹۸

داوری اولیه ۱۰ اسفند ۱۳۹۸

پذیرش: ۱۸ اسفند ۱۳۹۸

کلیدواژگان:

پلی اتر اتر کتون

انرژی مخصوص

سنگ‌زنی

انرژی تشکیل براده

چکیده

پلی اتراترکتون به دلیل خواص منحصر به فرد مکانیکی و شیمیایی‌اش در صنایع هوا-فضا و مهندسی پزشکی مورد توجه ویژه قرار گرفته است. یکی از کاربردهای این ماده ساخت ایمپلنت‌ها در صنایع پزشکی و جایگزینی آن با فلزات در صنایع هوا-فضا است. فرایند سنگ‌زنی به عنوان یکی از مهمترین فرایندهای براده برداری دارای انرژی مخصوص بالایی در بین روش‌های سنتی براده برداری می‌باشد. انرژی مخصوص به عنوان انرژی لازم جهت برداشت حجم واحدی از ماده تعریف می‌شود. با محاسبه انرژی برش و مقایسه آن با انرژی مخصوص سنگ‌زنی بصورت تجربی، می‌توان سهم انرژی تشکیل براده در مقابل انرژی شخم‌زنی و اصطکاک را مشخص نمود. با انجام آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی و محاسبات تئوری، مقدار انرژی تشکیل براده برابر ۰/۱۲ ژول بر میلی‌مترمکعب بدست آمد. در صورتی که نتایج تجربی سنگ‌زنی نشان دهنده حداقل انرژی مخصوص ۱/۹ ژول بر میلی‌متر مکعب بود. این اختلاف نشان دهنده سهم بسیار بالای انرژی شخم‌زنی در سنگ‌زنی این ماده است. سهم انرژی تشکیل براده که در قالب حرارت وارد قطعه‌کار می‌شود ۳۶ درصد محاسبه گردید. لذا می‌توان بیان نمود همه انرژی به جز ۶۴ درصد از انرژی تشکیل براده وارد قطعه‌کار می‌شود.

Study and investigation of cutting energy and chip formation in the grinding process of polyether ether ketone

Mohammad Khoran[1], Bahman Azarhoushang[2], Hossain Amirabadi[3*]

1- Mechanical Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran

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

3- University of Neyshabur, Neyshabur, Iran

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

Article Information

Original Research Paper

Received: 16 February 2020

First Decision: 28 February 2020

Accepted: 8 March 2020

Keywords:

Polyether Ether Ketone

Specific Energy

Grinding

Chip Formation Energy

Abstract

Polyether ether ketone has special attention due to its unique mechanical and chemical properties in the aerospace and medical engineering industries. One of the uses of this material is the manufacture of implants in the medical industry and its replacement with metals in the aerospace industry. The grinding process as one of the most important cutting process has high specific energy among the traditional methods. Specific energy is defined as the energy required to cut a unite volume of material. By calculating the cutting energy and comparing with the specific grinding energy (experimental), can determine the contribution of the chip formation energy to the plowing and frictional energy. The Differential scanning calorimetry (DSC) test and theoretical calculations showed that the amount of chip formation energy was 0.12 (J/mm^3) while the experimental results showed that the grinding energy was 1.9 (J/mm^3). This difference reflects the very high contribution of plowing energy in the grinding of this material. The ratio of heat of chip formation energy that enters the workpiece was calculated as 36%. Therefore, it can be stated that all the energy except 64% of the chip formation energy enters the workpiece.

۱- مقدمه

پلی‌اتراترکتون[۱](پیک) به عنوان ترموپلاستیکی که توانایی حفظ استحکام خود تا دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و مقاوم در مقابل عوامل شیمیایی، در ساخت پمپ، کمپرسور، پیستون، قطعات فضا پیماها، اتومبیل، صنایع شیمیایی و به عنوان یک زیست ماده[۲]پیشرفته در ایمپلنت‌های پزشکی استفاده می‌گردد [۱]. امروزه پیک در حال جایگزینی با آلومینیم در صنایع هوایی به‌دلیل توانایی عملکرد بالا در دمای بالا است [۲].

سنگ‌زنی به عنوان یکی از مهمترین روش‌های ماشین‌کاری، از ابزاری به نام چرخ سنگ برای براده برداری استفاده می‌کند.

[1] Polyether Ether ketone (PEEK)

[2] Biomaterial

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Khoran, B. Azarhoushang, H. Amirabadi, Study and investigation of cutting energy and chip formation in the grinding process of polyether ether ketone, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 7, pp. 51- 58, 2020 (in Persian)

چرخ سنگ دارای سه بخش است. دانه‌های ساینده که وظیفه براده برداری را بر عهده دارد، چسب که نگهدارنده این ذرات ساینده و وظیفه شکل‌دهی به چرخ سنگ را داراست. خلل و فرج که وظیفه انتقال مواد خنک‌کننده به منطقه برش و نیز انتقال براده را دارد. در سنگ‌زنی نه تنها شکل، اندازه و توزیع لبه برنده بلکه شرایط خلل و فرج سطح نیز نقش مهمی را ایفا می‌کند. کاملاً بدیهی است که دانستن میزان حرارت ورودی به قطعه‌کار در حین تشکیل براده و درصد آن در مدلسازی‌های حرارتی و نیز انرژی برداشت بسیار قابل اهمیت است. چرا که به علت پایین بودن درجه حرارت ذوب پلیمرها حرارت تولیدی تأثیر قابل ملاحضه‌ی بر زبری سطح و پر شدن خلل و فرج چرخ سنگ (بارگیری) خواهد داست. یک نمونه از سطح سنگ‌زنی شده پلیمر پیک در شکل ۱ قابل مشاهده است. در این شکل ذوب شدگی پلیمر زمینه کاملاً مشهود است.

ایزاماشا و همکاران [۳] مشخص نمودند به علت بالا رفتن حرارت از دمای شیشه‌ای پلیمر در ناحیه ماشین‌کاری، در سطح ماشین‌کاری شده بعضی از نقاط سوختگی و نرم شدگی مشاهده می‌شود. تأثیر هندسه ابزار توسط ایزاماشا [۴] مورد مطالعه قرار گرفت. نرمی پلیمرها شرایط ماشین‌کاری، ایجاد پلیسه و تمیز کردن سطح را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ابزار تیزتر، ایجاد تنش برشی بهینه در پلاستیک می‌کند که این موضوع اجازه می‌دهد بتوان از نرخ پیشروی بالاتری استفاده کرد. تنش برشی بالا، نرخ کرنش پلیمر را (به علت داشتن کرنش الاستیک بالا و رفتار ترموپلاستیک) بالا می‌برد. اشورث و همکاران [۵] به مطالعه رفتار حرارتی کامپوزیت با الیاف کربن حین ماشین‌کاری پرداخت. مشخص شد عیب‌های حرارتی منجربه جهت گیری الیاف، تغییر رنگ ماتریس، افزایش بیرون زدگی الیاف و عیب‌های نهفته خواهد شد.

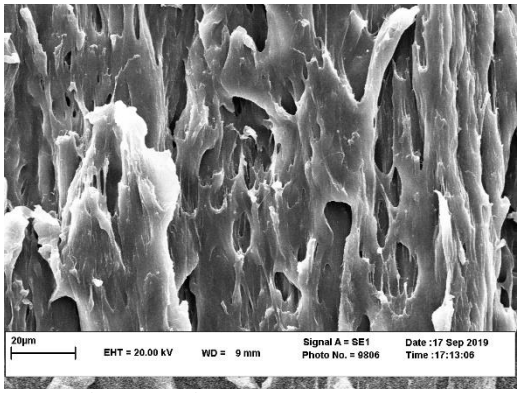

Fig. 1 Melted of ground surface

شکل ۱ ذوب سطح قطعه‌کار

خوران و همکاران [۶] آزمون تک دانه ساینده پلیمر چیک را مورد مطالعه قرار دادند. مشخص شد در آزمون تک دانه ساینده مکانیزم براده برداری حاکم، مکانیزم مواد داکتیل بود. حداقل انرژی مخصوص در آزمون تک دانه ساینده به مقدار ۲/۵ (J/mm^3) میل می‌کند.

کامپلاد و بیرمن [۷] با انجام آزمون تک دانه ساینده بر روی پلیمر پیک به این نتیجه رسیدند که مطالعات حرارتی برای این ماده ضروری است.

داویم [۸] تأثیر کربن موجود در پلیمر پلی اتر اتر کتون بر نسبت ضخامت براده (R)، تغییر شکل براده (ε)، زاویه اصطکاک (ρ)، زاویه برش (ϕ)، تنش نرمال (σ) و تنش برشی (τ) در صفحه برش در حالت برش متعامد را مورد بررسی قرار داد و با فرمول مرچنت مقایسه کرد. نسبت ضخامت براده یا نسبت تراش همیشه به‌دلیل تغییر شکل پلاستیک براده و وجود اصطکاک، کمتر از یک است. وجود ذرات کربن در پلیمر باعث می‌شود تمام موارد ذکر شده، بالاتر از پلیمر بدون کربن باشد به غیر از تنش برشی و تغییر شکل براده. مقایسه اعداد محاسبه شده و فرمول، نشان دهنده تطابق خوب آن با معادلات مرچنت بود. شی جان جی و همکاران [۹، ۱۰] بر روی خواص مکانیکی و قابلیت ماشین‌کاری پیک مطالعه کردند. آنها از تجهیزات اندازه‌گیری میکروسختی، میکرو پروفایل برای سنجش و مقایسه استفاده کردند. بدلیل کم بودن استحکام پلیمرها و تغییر شکل آنها حین فرایند، اسپارک اوت[1] نقش بسیار مهمی در سنگ‌زنی پلیمرها نسبت به فلزات دارد زیرا تغییر شکل‌های الاستیک آزاد شده در این مواد بسیار بیشتر از فلزات است [۱۱].

مالکین مقدار انرژی که فقط صرف تغییر شکل براده می‌شود را برای فولاد محاسبه نمود [۱۲]. مالکین اثبات نمود ۰/۴۵ درصد انرژی تشکیل براده صرف تغییر شکل پلاستیک ماده و شکل‌گیری براده می‌شود و مابقی آن به حرارت تبدیل می‌شود. بیشتر انرژی تولید شده در اثر اصطکاک، سایش و همچنین مقدار انرژی صرف شده در اثر پدیده شخم‌زنی به صورت حرارت وارد قطعه‌کار می‌شود [۱۳]. باید در نظر داشت که مدلسازی حرارت بدون دانستن انرژی تشکیل براده قابل انجام نیست. با توجه به اینکه ماده مورد مطالعه این پژوهش پلیمر بوده لذا با در نظر گرفتن استحکام پایین آن، بدیهی است که مقدار شخم‌زنی و لغزش دانه ساینده بر روی قطعه‌کار بالا می‌باشد.

این تحقیق، پیش‌زمینه مطالعه جامع سنگ‌زنی پلیمر پیک می‌باشد. با مطالعه پیشینه پژوهش انجام شده مشخص شد

[1] spark-out

تحقیقاتی بر روی سنگ‌زنی این ماده، مدلسازی حرارت و بدست آوردن انرژی‌های تشکیل براده صورت نگرفته است. با در نظر گرفتن نیاز به مدلسازی حرارت سنگ‌زنی پیک، بدون داشتن انرژی تشکیل براده، این کار امکان پذیر نیست. لذا لزوم مطالعه و محاسبه انرژی تشکیل براده در فرایند سنگ‌زنی این ماده احساس می‌گردد. برای این هدف، سنگ‌زنی ماده بصورت تجربی انجام شد. محاسبه انرژی مخصوص سنگ‌زنی، محاسبه انرژی مورد نیاز تا نقطه ذوب، محاسبه انرژی تشکیل براده و سهم حرارت ورودی به قطعه‌کار (پلیمر پیک) از مواردی است که تا کنون بررسی نگردیده و در این مقاله به آن پرداخته می‌شود.

۲- مواد و تجهیزات

۲-۱- تجهیزات و ابزارها

برای انجام آزمون‌های تجربی از ماشین سنتر سه محوره Muga با کنترلر Mitsubishi M80 استفاده شد. حداکثر سرعت دورانی این ماشین ۱۰۰۰۰RPM و حداکثر پیشروی ۱۲m/min می‌باشد. برای انجام فرم‌دهی[1] دستگاه تیزکاری دورانی[2] به ضخامت دیسک ۰/۸ و قطر ۱۰۸ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. تعداد پاس تیزکاری ۳ مرتبه و هر بار ۱۰ میکرومتر بوده است. نمایی از تنظیمات آزمون‌های تجربی در شکل ۲ آورده شده است.

Fig. 2 Set up of grinding

شکل ۲ چیدمان انجام آزمایش

ابزاری به قطر ۳۰ میلی‌متر از جنس کاربید سیلیسیم (SIC) با کد 10C100H12VQ استفاده گردید. سنگ‌زنی در حالت موافق و به تعداد ۲ پاس انجام گرفت. برای سنجش نیروی سنگ‌زنی از دینامومتر کیستلر 9257B با توان اندازه گیری ۵± کیلونیوتن در جهت x و y و ۵- تا ۱۰+ کیلونیوتن در جهت z استفاده گردید. از میکروسکوپ الکترونی مدل LEO 1450VP برای بررسی سطح قطعه کار استفاده گردید. برای بررسی‌های حرارتی پلیمر و محاسبه تغییرات آنتالپی از دستگاه گرماسنج روبشی تفاضلی METTLER TOLEDO کشور سویس با سرعت دمادهی ۲۰ درجه سانتی گراد بر دقیقه در اتمسفر هوا استفاده گردیده است.

۲-۲- ماده

برای انجام آزمون‌ها تجربی، نمونه‌های آزمایش از ورقی بزرگ به ضخامت ۶/۵ میلی‌متر بریده و به ابعاد ۴۰*۴۰ میلی‌متر آماده گردید. خواص این ماده در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۳- طراحی آزمایش

فرایند سنگ‌زنی یکی از روش‌های ماشین‌کاری می‌باشد که دارای پارامترهای ورودی قابل تنظیم زیادی است. در بین آنها سرعت برشی، پیشروی، عمق برش، نسبت سرعت درسینگ و نسبت همپوشانی درسینگ انتخاب گردید. بدین منظور هر یک از ورودی‌ها در سه سطح مطابق جدول ۲ مورد بررسی قرار گرفت و در نتیجه 3^5=۲۴۳ آزمایش باید اجرا گردد. با توجه به قابلیت روش سطوح پاسخ تعداد آزمایش‌ها به ۵۲ آزمون کاهش یافت. لذا این تعداد آزمون طراحی و بصورت سنگ‌زنی موافق اجرا شد. پارامترهای دیگر سنگ‌زنی برای تمامی آزمایش‌ها ثابت بود. سطوح پارامترهای سنگ‌زنی به گونه‌ی انتخاب شد تا بتوان نرخ‌های براده برداری مختلفی ایجاد گردد. در روش‌های طراحی آزمایش ترتیب انجام آزمایش‌ها کاملاً بصورت تصادفی شدهٔ (CRD) خواهد بود.

جدول ۱ خواص پلی اتراترکتون [۱۵]

Table 1 PEEK Mechanical Properties

خصوصیات مکانیکی	
سختی (شور D)	۸۸
تنش تسلیم (MPa)	۱۱۰
تغییر طول تا شکست (٪)	۲۰
مدول الاستسیته (MPa)	۴۰۰۰
ضریب انتقال حرارت (W/M-K)	۰/۲۵
دمای ذوب (°C)	۳۴۰

[1] Conditioning
[2] Rotary Dressing
[3] Completely Randomized Design

جدول ۲ پارامترهای طراحی آزمایش

Table 2 Design of experimental parameters

پارامترها	مقادیر
سرعت برشی (m/s)	۵، ۱۰، ۱۵
سرعت پیشروی (mm/min)	۱۰۰۰،۲۰۰۰،۳۰۰۰
عمق برش (µm)	۱۰، ۳۰، ۵۰
نسبت هم پوشانی درسینگ U_d	۲، ۵، ۸
نسبت سرعت درسینگ q_d	۰/۳-، ۰/۳، ۰/۹

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. تصادفی سازی باعث میانگین‌گیری اثر عوامل خارجی و کاهش خطاهای سیستمی موجود در آزمایش می‌گردد [۱۴].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- انرژی مخصوص

انرژی مخصوص به عنوان انرژی لازم جهت برداشت حجم واحد ماده تعریف می‌شود. انرژی مخصوص سنگ‌زنی از دیگر فرایندهای ماشین‌کاری سنتی بیشتر است. یعنی برای برداشت حجم واحدی از براده توسط این فرایند، انرژی بیشتری نسبت به دیگر فرایندهای ماشین‌کاری صرف می‌شود. از سوی دیگر فرایند سنگ‌زنی نسبت فرانیدهای دیگر ماشین‌کاری در سرعت برشی بالاتری انجام می‌گیرد لذا این فرایند به یک فرایند بی دررو[1]در نظر گرفته می‌شود. انرژی مخصوص از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد[۱۳].

$$e_c = \frac{F_t . v_c}{Q_w} \qquad (۱)$$

که در آن e_c انرژی مخصوص بر حسب (j/mm^3)، v_c سرعت برشی بر حسب (mm/s)، Q_w نرخ براده‌برداری بر حسب (mm^3/s) و F_t نیروی مماسی بر حسب (N) است.

شکل ۳ نشان دهنده رابطه انرژی مخصوص به نرخ براده برداری مخصوص است. نرخ براده برداری مخصوص از تقسیم نرخ براده برداری به ضخامت چرخ سنگ محاسبه می‌گردد. در پژوهش حاضر چون ضخامت چرخ سنگ بیشتر از ضخامت قطعه‌کار می‌باشد، نرخ براده برداری مخصوص از تقسیم نرخ براده برداری به ضخامت قطعه‌کار محاسبه می‌گردد. هر چه نرخ براده برداری بالاتر رفته، انرژی مخصوص به مقدار کمتری میل می‌کند. در نرخ‌های براده برداری کم به انرژی مخصوص بالاتری نیاز است، زیرا نرخ براده برداری مخصوص کم به معنی ضخامت براده تغییر شکل نیافته کمتر است و ضخامت براده کمتر به معنی شخم‌زنی و لغزش بالاتر و نسبت کمتر برش است.

با توجه به اینکه نسبت همپوشانی درسینگ دارای تأثیر کمی نسبت به پارامترهای دیگر سنگ‌زنی انتخاب شده بر نیرو داشت، لذا نمودار انرژی مخصوص فقط در نسبت سرعت درسینگ‌های مختلف ترسیم گردیده است. مشخص است در نسبت سرعت درسینگ ۰/۹ کمترین مقدار انرژی مخصوص نیاز خواهد بود. این اختلاف در نرخ براده برداری‌های کم بسیار قابل ملاحظه است ولی در نرخ های براده برداری بالا تأثیر کمتری دارد. هر چه نسبت سرعت درسینگ منجربه تولید دانه‌های تیزتر گردد، انرژی مخصوص کمتری برای براده برداری نیاز است. چرا که ابزاری که بصورت موافق[2] تیز شده منجربه تولید نیروی سنگ‌زنی کمتری خواهد شد. انرژی مخصوص در عمق‌های برشی بالاتر به مقدار ۱/۹ J/mm^3 می‌رسد. از این نقطه به بعد هر چه نرخ براده برداری مخصوص بیشتر شود، مقدار انرژی از این میزان کمتر نخواهد شد.

۳-۲- محاسبه انرژی خالص برش

انرژی سنگ‌زنی کل شامل سه انرژی تشکیل براده، انرژی شخم‌زنی و انرژی لغزش است (معادله ۲). مجموع انرژی تشکیل براده و انرژی شخم‌زنی انرژی برش نامیده می‌شود. با افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته، انرژی شخم کاهش می‌یابد. مقدار انرژی شخم و لغزش به جنس قطعه‌کار نیز بستگی دارد. منظور از انرژی تشکیل براده، مفهموم کلاسیک انرژی در برش که شامل انرژی برای تشکیل براده و انرژی اصطکاک در سطح مشترک ابزار و قطعه‌کار می‌باشد. معمولاً حدود ۷۵ درصد از انرژی کل تشکیل براده را انرژی برشی و ۲۵ درصد باقی مانده را انرژی اصطکاک تشکیل می‌دهدو مجموع انرژی‌های سنگ‌زنی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۱۲].

$$e = e_{\mathrm{ch}} + e_{\mathrm{pl}} + e_{\mathrm{sl}} \qquad (۲)$$

طوری‌که e_{ch} انرژی تشکیل براده، e_{pl} انرژی شخم‌زنی و e_{sl} انرژی لغزش می‌باشد.

تحت شرایط بی دررو، میزان انرژی که صرف تغییر شکل پلاستیک می‌شود و به عنوان ورودی فرایند سنگ‌زنی است محدود به انرژی جذب شده برای تبدیل حجم واحد از براده از حالت جامد تا نقطه ذوب آن ماده است.

[1] Adiabatic

[2] down dressing

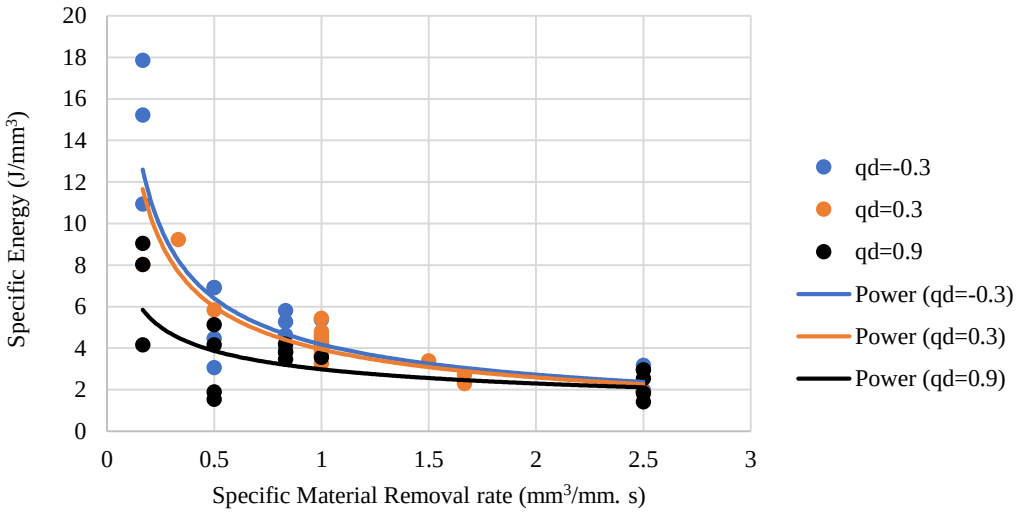

Fig. 3 The Chart of Specific energy variations with changes in specific material removal rate of PEEK

شکل ۳ نمودار تغییرات انرژی مخصوص سنگ‌زنی با تغییر در نرخ براده برداری ویژه پلی اتراتر کتون

برای محاسبه مقدار انرژی جذب شده توسط ماده تا نقطه ذوب، از تغییرات آنتالپی ماده از دمای محیط تا نقطه ذوب استفاده می‌شود. آنالیز حرارتی DSC[1] برای پلیمرها می‌تواند تغییرات آنتالپی این ماده را مشخص کند. شکل ۴ نمودار تغییرات آنتالپی پلیمر پیک که با انجام آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی بدست آمده را نشان می‌دهد.

از نمودار شکل ۴ مشخص است تغییرات آنتالپی ماده از دمای محیط تا نقطه ذوب برابر ۶۸(J/gr) است. با توجه به وزن مخصوص پلیمر که ۱/۳۲($\frac{gr}{cm^3}$) می‌باشد، میزان انرژی ۹۰(J/ cm³) یا به عبارت دیگر ۰/۰۹ (J/ mm³) خواهد بود.

از آنجایی که انرژی مخصوص برشی ۷۵ درصد انرژی مخصوص کل تشکیل براده را شامل می‌شود، بنابراین حداکثر انرژی مخصوص تشکیل براده برابر ۰/۱۲(J/ mm³) است. در صورتی که نتایج تجربی سنگ‌زنی نشان می‌دهد حداقل انرژی ویژه، ۱/۹ ژول بر میلی‌متر مکعب می‌باشد. لازم به ذکر است که حداقل انرژی در حداکثر نرخ براده برداری ویژه و شرایط تیزکاری دورانی موافق بدست خواهد آمد. مشخص است تنها مقدار بسیار کمی از انرژی ورودی صرف برش می‌شود و مکانیزم دیگری که انرژی بسیار بالای را به خود اختصاص داده است، شخم‌زنی می‌باشد. لذا می‌توان بیان نمود این اختلاف نشان دهنده سهم بسیار بالای انرژی شخم‌زنی در سنگ‌زنی این ماده است. لازم به ذکر است شخم‌زنی در تمام مراحل اول تا سوم سنگ‌زنی اتفاق خواهد افتاد. این اختلاف در شکل ۵ مشخص شده است. همان‌طوری که ذکر شد جنس مورد مطالعه یک پلیمر می‌باشد و با توجه به بالا بودن جریان ویسکوز این ماده و همچنین تغییر شکل ماده در اثر نیرو به‌جای تشکیل براده، مقادیر بدست آمده برای میزان انرژی شخم‌زنی منطقی است.

۳-۳- محاسبه درصد انرژی تشکیل براده

دمای ایجاد شده در حین فرایند سنگ‌زنی به طور مستقیم به میزان انرژی صرف شده در حین این فرایند در ارتباط است. از سوی دیگر در مدلسازی فرض می‌شود که کل انرژی به غیر از انرژی شکل‌گیری براده به حرارت تبدیل می‌شود (معادله ۲). اگر بصورت دقیق‌تر بررسی شود خود انرژی تشکیل براده نیز در خود شخم‌زنی و ... دارد لذا برای محاسبه مقدار انرژی که فقط صرف تغییر شکل براده شده بر اساس راه حل ارایه شده توسط مالکین عمل شده است [۱۲]. آوت واتر و شاو[2]برای محاسبه سهم انرژی ورودی به قطعه‌کار فرمول‌های تحلیلی زیر را ارایه دادند.

$$R = \frac{0.665\ \cot \emptyset}{\sqrt{L} + 0.665\ \cot \emptyset} \quad (۳)$$

$$L = \frac{v_c l}{2\alpha} \quad (۴)$$

$$\emptyset = \tan^{-1}\left(\frac{r\ \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha}\right) \quad (۵)$$

بطوری‌که R سهم حرارتی، $\emptyset$ زاویه صفحه برش، l طول منبع حرارتی، L که پارامتر بدون بعدی است که بستگی به هندسه و ضریب نفوذ حرارتی دارد. V_c سرعت برشی چرخ سنگ، α موجود در محاسبه L ضریب نفوذ حرارتی که برای پلیمر پیک برابر ۰/۱۴۵(mm²/s) و r نسبت ضخامت براده که با انجام آزمون تجربی، ۰/۵۵ به دست آمده است.

[1] Differential Scanning Analysis

[2] Outwater and Shaw

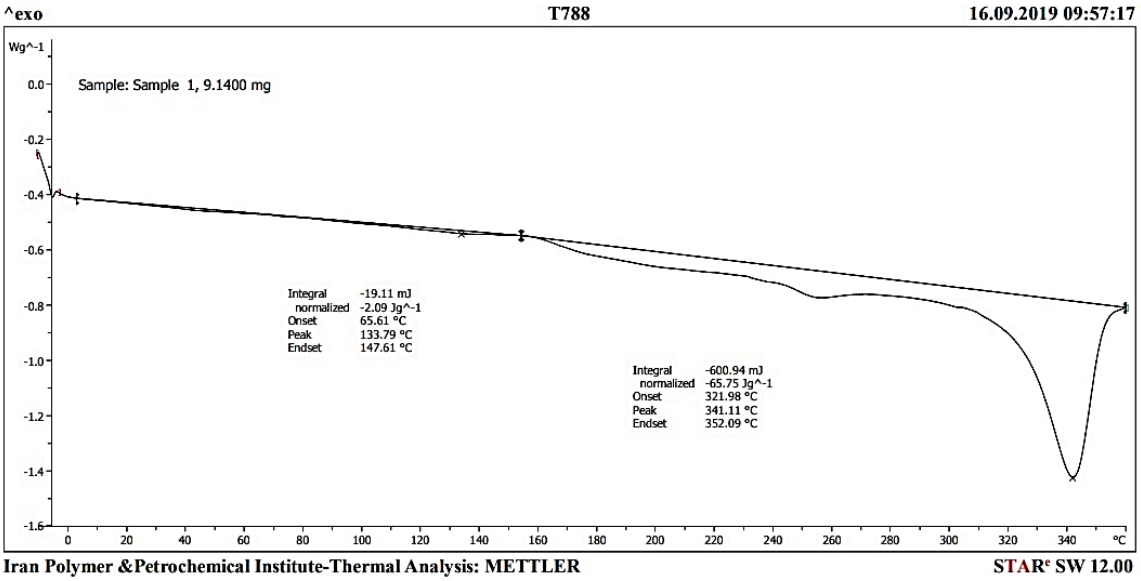

Fig. 4 The Enthalpy changes in DSC test of PEEK

شکل ۴ تغییرات آنتالپی در آزمون DSC پلی اتراتر کتون

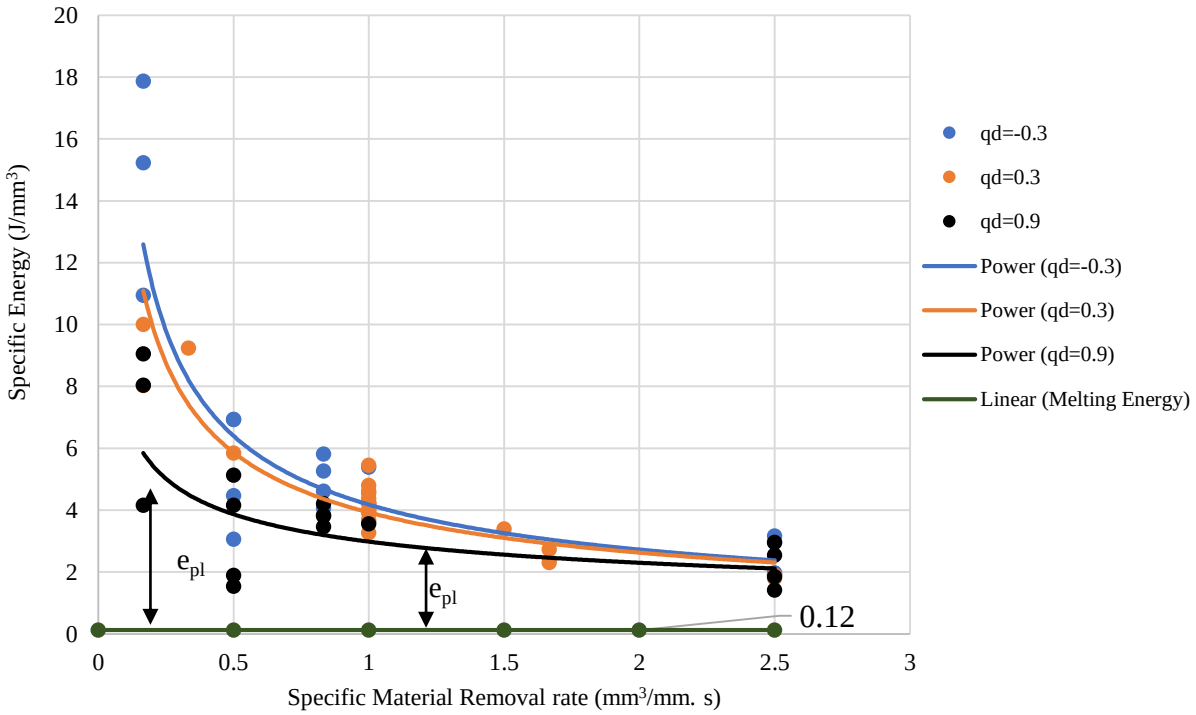

Fig. 5 The relation between Specific energy of grinding and plowing energy

شکل ۵ رابطه بین انرژی مخصوص سنگ‌زنی و انرژی شخم‌زنی

نسبت ضخامت براده از تقسیم ضخامت براده تغییر شکل نیافته به ضخامت براده تغییر شکل یافته بدست می‌آید. α موجود در محاسبه زاویه صفحه برش مقدار زاویه براده است. مقدار زاویه براده در سنگ‌زنی معمولاً ۶۰- درجه در نظر گرفته می‌شود[۱۲]. با جایگذاری مقادیر زاویه براده و نسبت ضخامت براده، زاویه صفحه برش (Ø) تقریباً ۱۰ درجه بدست می‌آید. مقدار طول منبع حرارتی را می‌توان با داشتن زاویه صفحه برش و مقدار ضخامت براده تغییر شکل نیافته از معادله (۶) محاسبه نمود.

$$l = \frac{h_{cu}}{2\sin\emptyset} \qquad (۶)$$

h_{cu} ضخامت براده است. مقدار ضخامت براده تغییر شکل نیافته حداکثر از رابطه (۷) محاسبه می‌گردد[۱۳].

$$h_{cu,max} = \left[\frac{4}{C \cdot r}\left(\frac{v_f}{v_s}\right)\left(\frac{a_e}{d_s}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^{1/2} \quad (۷)$$

جایی‌که v_f سرعت پیشروی، v_s سرعت چرخ سنگ، a_e عمق بار و d_s قطر معادل چرخ سنگ می‌باشد. C نشان دهنده تعداد دانه‌های فعال که با تهیه تصویر و ساده سازی بدست می‌آید و r نسبت پهنا به ضخامت میانگین براده است. در این پژوهش با مشاهده براده‌ها مقدار r، ۶ در نظر گرفته شده است.

با جایگذاری مقادیر ذکر شده در فرمول‌های (۴) تا (۷) جایگذاری در رابطه (۳)، مقدار R قابل محاسبه است. رابطه بین R و ضخامت براده تغییر شکل نیافته (سرعت برشی، پیشروی و عمق برش در آن لحاظ شده است) را می‌توان در شکل ۶ مشاهده کرد. سهم حرارت ورودی به قطعه‌کار تقریبا مقداری بین ۰/۳ تا ۰/۵ است. هرچه ضخامت براده تغییر شکل نیافته بیشتر شود این سهم به مقدار کمتری میل می‌کند.

مقدار R برابر مقدار متوسط آن یعنی ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر ۴۰ درصد از انرژی برشی در حین تشکیل براده وارد قطعه‌کار می‌شود (با توجه به کم بودن ضریب انتقال حرارت پلیمر منطقی به نظر می‌رسد). با فرض عدم انتقال انرژی اصطکاک بین ابزار و براده به قطعه‌کار و با در نظر گرفتن این نکته که انرژی برشی ۷۵ درصد از انرژی تشکیل براده را شامل می‌شود (۲۵ درصد صرف اصطکاک می‌شود)، سهم انرژی تشکیل براده که به صورت حرارت وارد قطعه‌کار می‌شود برابر ۰/۷۵×۴۰=۳۰ درصد است. برای در نظر گفتن خطاهای و افت‌های احتمالی، ضریب تصحیح ۱/۲ در محاسبات لحاظ می‌شود که عدد ۱/۲×۳۰=۳۶ بدست خواهد آمد و فرض بر ثابت بودن آن است. لذا همه انرژی ناحیه تماس به جز ۶۴ درصد از انرژی تشکیل براده وارد قطعه‌کار می‌شود.

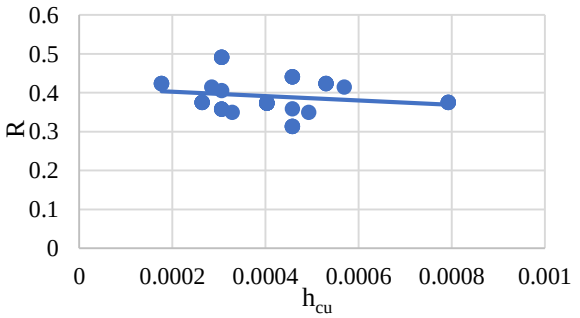

Fig. 6 Value of input energy variations in terms of changes in $h_{cu,max}$

شکل ۶ سهم انرژی ورودی بر حسب تغییرات در ضخامت براده تغییر شکل نیافته

باید در نظر داشت کل حرارتی که در ناحیه سنگ‌زنی تولید می‌شود، بین براده، قطعه‌کار و چرخ سنگ و سیال خنک کننده تقسیم می‌شود. کسر شار حرارتی هر یک از اجزای شرکت کننده در سنگ‌زنی برابر جمع میزان R_w (کسر شار حرارتی به قطعه‌کار)، R_s (کسر شار حرارتی به چرخ سنگ)، R_{ch} (کسر شار حرارتی به براده)، R_{kss} (کسر شار حرارتی به مایع خنک کننده) است که از رابطه (۸) محاسبه می‌گردد.

$$R_w + R_s + R_{ch} + R_{kss} = 1 \quad (۸)$$

$$R_w = \frac{q_w}{q_t} \quad (۹)$$

در رابطه بالا q_w شار حرارتی ورودی به قطعه‌کار و q_t شار حرارتی کل است.

با توجه به محاسبات انجام گرفته در این بخش، مشخص شد کل شار حرارتی ناحیه سنگ‌زنی به غیر از ۶۴ درصد از انرژی تشکیل براده وارد قطعه‌کار می‌گردد، لذا می‌توان سهم انرژی ورودی به قطعه‌کار را به صورت رابطه (۱۰) بیان کرد.

$$R_w = \frac{e - 0.64e_{ch}}{e} \quad (۱۰)$$

که در آن e انرژی کل سنگ‌زنی، e_{ch} انرژی تشکیل براده و R_w کسر شار حرارت ورودی به قطعه‌کار در اثر انجام فرایند سنگ‌زنی است. مقدار ۶۴ درصد برای فلزات (انواع مختلف فولاد) ۴۵ درصد محاسبه شده است. کم بودن مقدار حرارت ورودی به قطعه‌کار از محل تشکیل براده را می‌توان به دلیل پایین بودن ضریب انتقال حرارت پلیمر پیک و نیز زیاد بودن تغییر شکل‌های حین تشکیل براده باید دانست.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه حرارت نقش مهم و کلیدی در سنگ‌زنی مواد پلیمری دارد، لذا مدلسازی و بررسی بنیادی فرایند تشکیل براده در سنگ‌زنی بسیار مورد توجه است. لذا، سرعت برشی، پیشروی، عمق برش، نسبت سرعت درسینگ و نسبت همپوشانی درسینگ به عنوان ورودی‌های پژوهش انتخاب گردید تا بتوان با کمک روش‌های محاسباتی مقادیر انرژی برش خالص و درصد انرژی تشکیل براده را مورد بررسی قرار داد. حداقل انرژی مخصوص در حداکثر نرخ براده برداری و نسبت سرعت درسینگ ۰/۹ و نسبت همپوشانی پایین به مقدار ۱/۹ J/mm^3 بدست آمد. از این نقطه به بعد هر چه نرخ براده‌برداری مخصوص بیشتر شود، مقدار انرژی از این میزان کمتر نخواهد شد. با انجام آزمون کالری‌متری مشخص شد حداکثر انرژی مخصوص تشکیل براده برابر (J/mm^3) ۰/۱۲ است. اختلاف بین مقدار انرژی تشکیل براده

نشان دهنده سهم بسیار بالای انرژی شخم‌زنی در سنگ‌زنی این ماده است. سهم انرژی تشکیل براده که در قالب حرارت وارد قطعه‌کار می‌شود ۳۶ درصد است. لذا می‌توان بیان نمود همه انرژی به جز ۶۴ درصد از انرژی تشکیل براده وارد قطعه‌کار می‌شود.

۵- مراجع

[1] S. M. Kurtz, "Chapter 1 - An Overview of PEEK Biomaterials," In *PEEK Biomaterials Handbook*Oxford: William Andrew Publishing, pp. 1-7, 2012.

[2] G. Petropoulos, F. Mata, and J. P. Davim, "Statistical study of surface roughness in turning of peek composites," *Materials & Design*, Vol. 29, No. 1, pp. 218-223, 2008.

[3] 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.

[4] R. Izamshah, N. Husna, M. Hadzley, M. Amran, M. Shahir, and M. Amri, "Effects of Cutter Geometrical Features on Machining Polyetheretherketones (PEEK) Engineering Plastic," *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, Vol. 6, pp. 863-872, 2014.

[5] S. Ashworth *et al.*, "Varying CFRP workpiece temperature during slotting: Effects on surface metrics, cutting forces and chip geometry," *Procedia CIRP*, Vol. 85, pp. 36-41, 2019.

[6] M. Khoran, H. Amirabadi, and 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).

[7] K. Kamplade and D. Biermann, "Examination of the Material Removal of unreinforced, thermoplastic Polymers by Scratch Tests," *Production Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 713-719, 2019.

[8] J.P. Davim and F. Mata, "Physical cutting model of polyetheretherketone composites," *material & Design*, Vol. 27, pp. 847-852, 2006.

[9] S. Ji, C. Sun, J. Zhao, and F. Liang, "Comparison and Analysis on Mechanical Property and Machinability about Polyetheretherketone and Carbon-Fibers Reinforced Polyetheretherketone," *Materials*, Vol. 8, No. 7, pp. 4118-4130, 2015.

[10] S. Ji , H. Yu, J. Zhao, and F. Liang, "Comparison of mechanical property and machinability for polyetheretherketone and glass fiber–reinforced polyetheretherketone," *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 7, No. 4, p. 168781401557835, 2015.

[11] K. Y. Park, D .G. Lee, and T. Nakagawa, "Mirror surface grinding characteristics and mechanism of carbon fiber reinforced plastics," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 52, pp. 386-395, 1995.

[12] S. Malkin and R. B. Anderson, "Thermal Aspects of Grinding ,Part 1, Energyn Partition," *Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 96, p. 1177, 1974.

[13] S. Malkin and C. Guo, *Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives*. Industrial Press, 2008.

[14] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments, 6th Edition Set*. John Wiley & Sons, Limited, 2007.