



مطالعه سایش ابزار در فرزکاری کامپوزیت A356-10%SiC تحت شرایط خنک کاری برودتی

قاسم نجفی¹، سید علی نیکنام^{2*}، بهنام داودی³، ویکتور سانگمن⁴

1- دانشجوی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

4- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، اکول تکنولوژی مونترال، کانادا

* تهران، صندوق پستی 1311416846، saniknam@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

کامپوزیت‌ها موادی ترکیبی با حداقل دو ماده هستند که یکی به عنوان زمینه و دومی به منظور افزایش خواص مفید به ماده پایه افزوده می‌شود. این مطالعه نیز در مورد یکی از کامپوزیت‌های پرکاربرد تحت عنوان کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی به همراه مواد تقویت‌کننده افزودنی شامل سیلیکون کارباید SiC است. از جمله مزایای این کامپوزیت‌ها می‌توان به مواردی مثل سختی و استحکام بالا و همین‌طور سبکی اشاره نمود. همچنین معایب آن قابلیت ضعیف ماشین‌کاری و سایش بالا در ابزارهای ماشین‌کاری است. تاکنون مطالعات متعددی برای بهبود قابلیت ماشین‌کاری کامپوزیت‌های پایه فلزی انجام گرفته است. بر اساس پیشینه پژوهش انجام شده در این حوزه، تحقیقات محدودی در مورد تأثیر روش‌های مختلف خنک‌کاری، بخصوص خنک‌کاری برودتی و استراتژی‌های مرتبط بر سایش و عمر ابزار برشی در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های پایه فلزی صورت گرفته است. لذا در این مطالعه اثر پارامترهای برشی و خنک‌کاری برودتی بر سایش ابزار در ماشین‌کاری A356-10%SiC مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس تحلیل‌های آماری صورت گرفته مشاهده شد که اثر پارامترهای برشی و پارامترهای خنک‌کاری برودتی بر اندازه سایش ابزار محسوس بوده (R^2 برابر با 0.97) و رابطه ریاضیاتی قوی بین سایش ابزار و پارامترهای مطالعه شده وجود دارد. همچنین با مقایسه مطالعات پیشین، می‌توان اذعان نمود که عمر ابزار برشی نسبت به حالت خشک تا 26٪ افزایش یافته است.

دریافت: 1402/05/28

پذیرش: 1402/10/26

کلیدواژه‌ها

کامپوزیت پایه فلزی،

آلومینیوم،

ماشین‌کاری،

خنک‌کاری برودتی،

سایش ابزار

Study of the tool wear in cryogenic milling of A356-10%SiC

Ghasem Najafy¹, Seyed Ali Niknam^{1*}, Behnam Davoodi¹, Victor Songmene²

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, École de Technologie Supérieure, Montreal, Canada

* P.O.B. 1684613114, Tehran, Iran, saniknam@iust.ac.ir

Keywords

Metal matrix composite,
Aluminium alloys,
Machining,
Cryogenic cooling,
Tool wear

Abstract

Composites are combined with at least two materials; one is considered as the base material and later is used to improve the material properties. This study is also about one of the widely used composites so-called aluminium metal matrix composites (Al-MMC) and additional reinforcing particles, including silicon carbide (SiC). The main features of such composite are high hardness and strength, as well as lightweight. The main disadvantages are low machinability and high wear in cutting tools. Several studies have been conducted to improve the machinability of MMCs. The literature review in this domain denotes that limited studies have yet been conducted on the effects of different cooling methods, especially cryogenic cooling and related strategies, on the wear and tool life in the machining of MMCs. Therefore, in this study, the effects of cutting parameters and cryogenic cooling on the tool wear in the machining of A356-10%SiC were studied. Based on the statistical analysis, it was observed that the effects of cutting parameters and cryogenic cooling parameters on the tool wear was significant ($R^2=0.97$) and a robust mathematical relationship exists between tool wear and the studied parameters. Moreover, compared with previous studies, it was observed that tool life under cryogenic conditions was increased by around 26% compared to readings made under dry condition.

1- مقدمه

خنک‌کننده برودتی از طریق شیلنگ‌های برودتی از مخزن به ماشین ابزار منتقل می‌شود و از داخل یا خارج ابزار برش به منطقه ماشین‌کاری تزریق می‌شود. استفاده از خنک‌کننده برودتی با LN2 به کاهش دما، زبری سطح، سایش پهلوه‌ها و نیروهای برشی در مقایسه با خنک‌کننده معمولی کمک می‌کند. پژوهش مشابهی بر بروی آلیاژ AA 6061-T6 نیز منجر به کاهش 27 الی 44 درصدی دما شد [12].

2- ضرورت انجام پژوهش و اهداف طرح

در پایان جمع‌آوری اطلاعات و مطالعات مرتبط به کامپوزیت پایه آلومینیومی مشاهده گردید که میزان مطالعات در کامپوزیت‌ها همواره با بررسی افزودن مواد تقویت‌کننده SiC در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه بوده است. با این حال، مطالعات تکمیلی در خصوص بررسی روش‌های خنک‌کاری پایدار، بخصوص برودتی و پارامترهای آن و مقایسه عملکرد این روش با دیگر روش‌های خنک‌کاری محدود بوده و در مورد بررسی مستقیم پارامترهای برودتی در حین ماشین‌کاری اطلاعات چندانی برای کامپوزیت‌های پایه فلزی موجود نیست. از این رو هدف از پژوهش صورت‌گرفته بررسی اثرات پارامترهای مؤثر برشی بر قابلیت ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه آلومینیومی و بهبود عمر ابزار برشی و همچنین مقایسه روش خنک‌کاری برودتی جهت یافتن شرایط خنک‌کاری مناسب و بهینه در ماشین‌کاری این نوع مواد از دیگر اهداف متصور است. مطالعه به این شرح انجام شد. ابتدا پارامترهای مؤثر در ماشین‌کاری برودتی مشخص و طرح آزمایشی مناسب انتخاب گردید. سپس سیستم برودتی مطابق پارامترهای ورودی در طرح آزمایشی طراحی و ساخته شد سپس بهینه‌سازی در عملکرد سیستم تزریق نیتروژن مایع صورت پذیرفت و تنظیمات لازم مطابق طراحی آزمایش در محل ماشین‌کاری انجام شد. با توجه به این که روش برودتی یک روش پایدار است هیچ خطری برای اپراتور و محیط‌زیست ندارد. بررسی نتایج و کارآمدی روش برودتی برای افزایش عمر ابزار برشی نیز در بخش‌های آتی ارائه می‌شود.

3- روش تحقیق

با استفاده از روش ریخته‌گری همزنی، قطعه‌های مکعبی شکل کامپوزیتی A356 با 10% SiC با ابعاد $22 \times 11.5 \times 1.5$ سانتی‌متر ساخته و آماده شد که با نام تجاری 10%SiC-A356 نشان داده می‌شود. بعد از پایان عملیات ریخته‌گری، برای اطمینان از توزیع درست ذرات تقویت‌کننده و تولید کامپوزیت با کیفیت، مطابق شکل 1، یک قسمت از نمونه ریخته‌گری شده پولیش شده و با میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. به‌جز چند نقطه که این ذرات به هم چسبیده شده‌اند، تقریباً در بقیه نقاط نشست یکسان مشاهده شد. با توجه به این نکته که تولید کامپوزیتی که مقدار SiC به‌کاررفته در آن در هیچ منطقه‌ای به هم نچسبیده باشند تقریباً غیرممکن است، لذا جهت اطمینان بیشتر، از تصاویر تحلیل مپ قطعات کامپوزیتی با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. برای انجام آزمایش‌های فرزندکاری، پارامترهای برشی مطابق مشاوره‌های فنی با شرکت سازنده ابزار انتخاب گردید. برای روش برودتی² مؤثرترین پارامترهای یافت‌شده در ماشین‌کاری برودتی، انتخاب گردید. جدول شماره 1 و طرح آزمایشی تاگوچی L9 به همراه یک‌بار تکرار مطابق جدول شماره 2 استفاده شد.

از دیرباز تمام کشورهای صنعتی به دنبال موادی با نسبت استحکام به وزن بالا هستند که بتوانند علاوه بر کاهش هزینه مواد اولیه، باعث کاهش انرژی مصرفی و کاهش آلودگی زیست‌محیطی شوند. از این رو نیاز است تا با آزمایش‌ها و همچنین تحقیقات متنوع در مورد عناصر و افزودنی‌های مفید و تأثیر آن روی ماده پایه، کامپوزیت‌ها را هرچه بیشتر مورد بررسی قرارداد [1]. کامپوزیت‌های زمینه فلزی¹ با زمینه آلیاژهای سبک از قبیل منیزیم و آلومینیوم و تقویت‌شده با ذرات سرامیکی از قبیل کارباید سیلیسیوم، آلومینا و زیرکونیا را می‌توان به‌عنوان دسته‌ای از مواد پیشرفته در نظر گرفت که دارای وزن کم، استحکام بالا، مدول الاستیسیته زیاد، ضریب حرارتی کم و مقاومت به سایش خوب هستند. این مواد به دلیل خواص ویژه‌شان در سال‌های اخیر کاربرد بسیاری در صنایع هوایی، خودروسازی، نظامی و... پیدا کرده‌اند [2,3,4].

علی‌رغم افزایش تقاضا برای کامپوزیت زمینه فلزی در محصولات هوافضا و خودروسازی، کماکان مشکلات ماشین‌کاری آن‌ها حل نشده باقی‌مانده است [5]. ویژگی‌های خاص کامپوزیت‌های زمینه فلزی در طول ماشین‌کاری، منجر به توانایی پایین ماشین‌کاری آن‌ها شده است [6]. تحقیقات اولیه در بهبود کیفیت ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی از سال 1980 شروع شده است. اخیراً استفاده از کامپوزیت زمینه فلزی به امری عادی در صنایع هوافضا و خودروسازی تبدیل شده است [7] که با عنایت به مشکلات مرتبط با ماشین‌کاری این دسته از مواد، می‌تواند محل هزینه بالایی در ماشین‌کاری آن‌ها باشد [8]. از این رو تلاش‌های کمی به تولید مدل‌های پیش‌بینی عمر ابزار در ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه فلزی معطوف شده است. جهت درک بهتر و بیشتر رفتار این مواد، مطالعات بیشتری نیاز است [4]. با این حال و بر مبنای بعضی از مطالعات انجام‌یافته، ابزار کاربایدی یک جایگزین مناسب تحت شرایط خاص است [9].

در زمانی که سایش ابزار به سرعت شروع می‌شود، پارامترهای مختلف برای تعیین شرایط مناسب ابزار مورد بررسی قرار می‌گیرند، [9, 10]. تجزیه و تحلیل پدیده‌های حرارتی که در بین جت نیتروژن مایع با پاشش خارجی و قطعه کار رخ می‌دهد مورد مطالعه قرار گرفت [11]. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، نسبت فاز مایع/گاز نیتروژن تأثیر قابل توجهی بر انتقال حرارت دارد. در این تحقیق برای تعیین تأثیر پارامترهای جت LN2 بر ضریب انتقال حرارت همرفتی، مدلی بر اساس طراحی آزمایش بر روی قطعه کار مجهز به ترموکوپل پیشنهاد شد. بر اساس نتیجه حاصله، تأثیرگذارترین پارامترهای توزیع حرارتی و ضریب انتقال حرارت عبارت‌اند از فشار LN2، قطر نازل، زاویه تزریق مایع برشی و فاصله بین نازل و سطح قطعه. مضافاً قطر نازل بیشترین اثر را داشته به طور مستقیم با مقدار LN2 مرتبط است. با کاهش فاصله، LN2 پتانسیل کمتری برای انتقال گرما با محیط خود دارد و در نتیجه می‌تواند مدت بیشتری در فاز مایع خود باقی بماند [11].

سرمایش برودتی یک روش سازگار با محیط‌زیست است که برای از بین بردن اثرات منفی تولید گرما و دماهای بالا در منطقه برش استفاده می‌شود. در روش برودتی می‌توان از مایعات برودتی مختلف مانند نیتروژن و دی‌اکسید کربن در دماهای بسیار پایین (حدود 200-درجه سانتی‌گراد) استفاده کرد. این خنک‌کننده گرما را در ناحیه ماشین‌کاری جذب کرده و مانعی بین تراشه و ابزار ایجاد می‌کند. در یک فرآیند براده برداری، مایع

² cryogenic¹ Metal matrix composite

برش کاری، قطعه کار، فرز CNC، تشکیل شده است (شکل 2). برای اطمینان از فشار مخزن، یک سیستم تخلیه سریع نیز استفاده گردید و برای کنترل جریان خروجی و جلوگیری از هدررفت نیتروژن مایع یک شیر جریان قبل از نازل قرار گرفت.

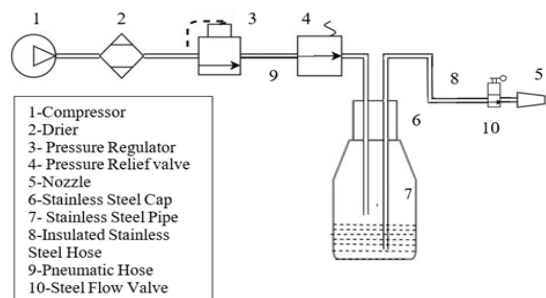


Fig. 2 Liquid nitrogen injection system

شکل 2 سیستم تزریق نیتروژن مایع

5- نحوه استقرار تجهیزات تزریق نیتروژن

نازل برودتی با استفاده از فیکسچر مناسب برای تنظیم موقعیت و زاویه 45 درجه مورد استفاده قرار گرفت. تمرکز تزریق نیتروژن مایع بر روی خنک سازی نوک ابزار است. نحوه قرارگیری نازل در شکل 3 مشاهده می شود.

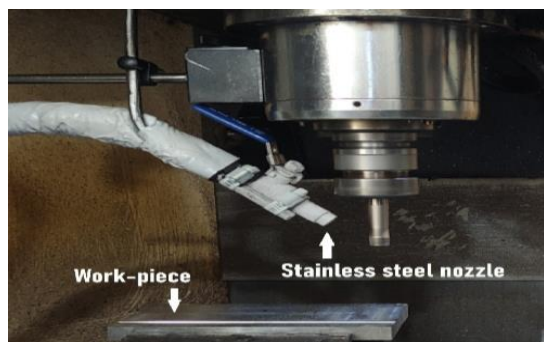


Fig. 3 How to place the nozzle in the milling machine

شکل 3 نحوه قرارگیری نازل در دستگاه فرزکاری

6- ابزار برشی

اینسرت مدل HM90 APKT 100304PDR در فرزکاری استفاده شد. مشخصات این اینسرت به همراه سه ناحیه اصلی برشی اصلی ابزار در شکل 4 نشان داده شده است. ناحیه اصلی برش در بررسی عمر ابزار مطابق استاندارد ISO3685:1993 در عمق سایش ابزار در زاویه پهلو ابزار (Flank wear) به میزان 300 میکرون برای سایش خراشیدگی (Abrasion) می باشد.

7- تجزیه و تحلیل

بیشترین سایش ابزار در بین مواد ارائه شده اندازه گیری و به صورت نمودار و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در انتهای این بخش آورده شده است. برای اطمینان از تحلیل درست، از نتایج آنالیز مپ و آنالیز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس¹ استفاده شد. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، مکانیسم اصلی سایش، پدیده خراشیدگی² است. با توجه به آنالیز مپ (شکل 5) عناصر موجود در روکش یعنی، تیتانیم، نیتروژن و آلومینیوم در سطح ابزار از بین رفته و به

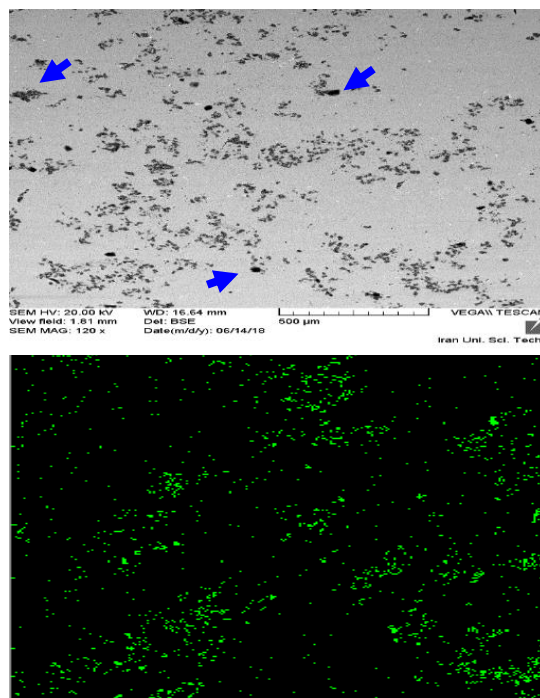


Fig. 1 SEM image of A356 -10 % SiC

شکل 1 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز مپ از ماده کامپوزیت آلومینیومی به همراه 10% SiC

جدول 1 پارامترهای ماشین کاری و برودتی

Table 1 Machining and cryogenic cooling parameters

پارامتر	شرایط آزمایش			پارامترهای برشی
A	3.5	2.5	1.5	قطر نازل (mm)
B	3.5	2.5	1.5	فشار برودتی (bar)
C	45	30	15	فاصله نازل (mm)
D	240	180	120	سرعت برشی (m/min)
-	-	-	0.1	پیشروی (mm/z)
-	-	-	1	عمق برش (mm)
-	-	-	برودتی	مدل روان کاری

جدول 2 طراحی آزمایش با روش تاگوچی DOE و L₉

Table 2 The DOE-L₉ orthogonal array used

شماره آزمایش	قطر نازل (mm)	فشار برودتی (bar)	فاصله نازل (mm)	سرعت برشی (m/min)
1	1.5	1.5	15	120
2	1.5	2.5	30	180
3	1.5	3.5	45	240
4	2.5	1.5	30	240
5	2.5	2.5	45	120
6	2.5	3.5	15	180
7	3.5	1.5	45	180
8	3.5	2.5	15	240
9	3.5	3.5	30	120

4- ساخت سیستم تزریق نیتروژن مایع

سیستم تزریق نیتروژن مایع عمدتاً از یک کمپرسور باد، مخزن نیتروژن مایع، سیستم خشک کننده هوا، شلنگ استیل، نازل و فیکسچر نگهدارنده نازل و ابزار

¹ EDS

² Abrasion

ماشین کاری، آنالیز مپ با عناصری همچون (پ) آلومنیوم، (ت) سیلیکون، (ج) تیتانیوم، (چ) تنگستن

فرزکاری کامپوزیت زمینه فلزی A356/10%SiC با استفاده از روش برودتی انجام و میزان سایش پهلویی در ابزارهای برشی بررسی شد. نتایج حاصله در پایان با مشاهدات انجام یافته در مطالعات پیشین تیم تحقیقاتی حاضر که با استفاده از روش های خنک کاری خشک، حداقل روانکار و غوطه وری در شرایط برشی مشابه انجام شده بودند مقایسه گردید [13].

سایش ابزار

با استفاده از آنالیز واریانس، میزان $R^2 = 0.97$ نشان دهنده این است که این روش ماشین کاری بر روی این ماده با در نظر گرفتن شرایط تعریف شده مطلوب و مناسب می باشد. پارامترهای برشی با سایش ابزار رابطه خطی داشته و با استناد بر شکل 6 می توان نتیجه گرفت که هرچه سرعت برشی بالاتر رود، میزان سایش در اینسرت ها نیز افزایش یافته است. با مقایسه نتایج حاصله با پژوهش های پیشین می توان اذعان کرد به طور کلی میزان تشکیل لایه انباشته در سرعت برشی 120 متر بر دقیقه در روش های خشک و برودتی بیشتر از دو روش دیگر بود و در سرعت 180 متر بر دقیقه روش های خشک و حداقل روانکار بیشتر بود و روش برودتی کمی بیشتر از روش غوطه وری بود (به جز آزمون شماره 2 برودتی که تقریباً با روش غوطه وری برابر بود). در سرعت برشی 240 متر بر دقیقه روش های خشک و حداقل روانکار بیشترین لایه انباشته را نسبت به بقیه روش ها داشتند، ولی روش برودتی تقریباً برابر و در برخی موارد کمتر از روش غوطه وری بود.

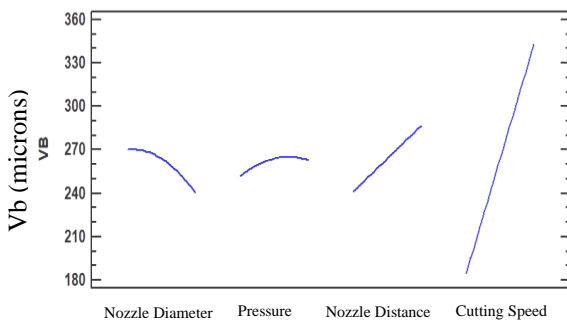


Fig. 6 Main effects plot for flank wear

شکل 6 نمودار تأثیر پارامترهای برشی بر سایش ابزار

به منظور تعیین عمر ابزار برشی و مشاهده روند سایش در ابزار برشی تصویر پهلوی ابزار برشی در مقطع هایی از مسیر ماشین کاری در شرایط مختلف سرعت برشی، قطر نازل و فاصله نازل و همچنین فشار در حالت خنک کاری برودتی، مورد بررسی قرار گرفت و سایش ابزار اندازه گیری شد. بر اساس مشاهدات تجربی، در سرعت برشی 120 متر بر دقیقه کمترین میزان سایش ابزار را نسبت به سرعت های دیگر مشاهده شد. بر اساس تحلیل های آماری، سایش پهلویی ابزار تابعی از پارامترهای برشی و خنک کاری برودتی بوده و اگرچه حضور ذرات SiC باعث افزایش سایش می شود، لیکن سایش کماکان به صورت تابعی خطی از تغییرات پارامترهای برشی قابل بیان است. با افزایش قطر نازل نیز سایش ابزار کاهش یافته که با توجه به افزایش حجم مایع تزریقی به محل ماشین کاری، نسبت مایع به گاز در نقطه ماشین کاری افزایش و با کاهش دمای بیشتری همراه بود. در نتیجه سایش ابزار در اثر حرارت کاهش خواهد یافت. همچنین فاصله نازل نیز رابطه خطی با سایش ابزار دارد و با

علت وجود ذرات SiC در سطح براده، بخصوص در قسمت هایی که عناصر روکش حذف گردیده است، پدیده سایش به خاطر برخورد ابزار با ذرات سخت SiC اتفاق افتاده است. وجود حجم زیاد از آلومینیوم در لبه ابزار نیز نشان دهنده تشکیل لبه انباشته و لایه انباشته است. وجود اکسیژن مبین پدیده اکسیداسیون است.

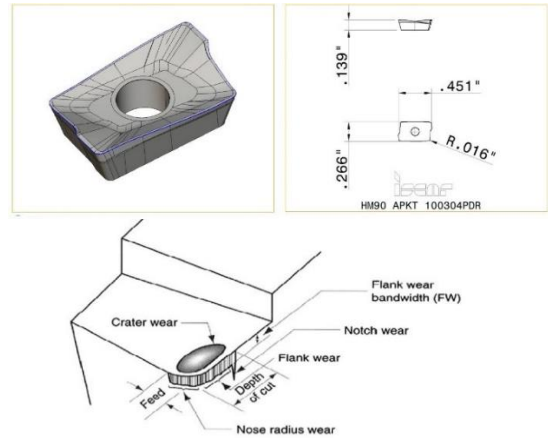


Fig. 4 The specifications of the insert used and the three main tool wear areas

شکل 4 مشخصات اینسرت استفاده شده در فرزکاری و سه ناحیه اصلی سایش در لبه برشی ابزار

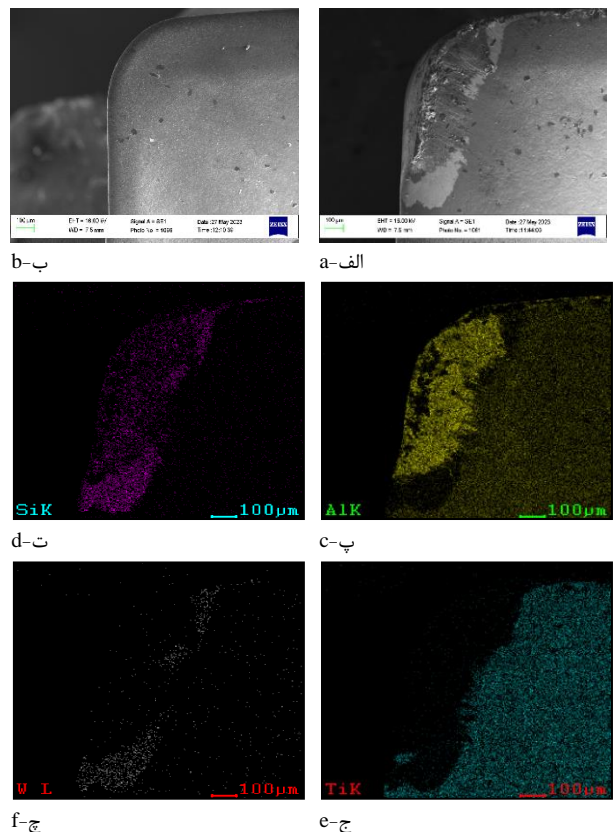


Fig. 5 SEM image and surface map analysis of the cutting tool in cryogenic mode at cutting speed of 120 m/min; (a) before machining; (b) after machining; mapping analysis with presence of (c) Aluminium; (d) Silicon; (e) Titanium; (f) Tungsten

شکل 5 تصویر میکروسکوپ الکترونی روشی و آنالیز مپ سطح ابزار برش در حالت برودتی با سرعت 120 متر بر دقیقه در حالت (الف) قبل از ماشین کاری، (ب) بعد از

است. می‌توان گفت روش برودتی در سرعت برشی 120 و 180 متر بر دقیقه موفق‌تر از روش‌های دیگر می‌باشد. با توجه به میزان سایش پهلویی ابزارها در حالات مختلف خنک‌کاری در سرعت برشی 240 متر بر دقیقه، افزایش عمر ابزار نسبت به حالت خشک حدود 20% بود و در حالت حداقل روانکار نسبت به حالت خشک 38% بالاتر و در حالت غوطه‌وری حدود 29% بود. در نتیجه در سرعت برشی 240 متر بر دقیقه روش خنک‌کاری حداقل روانکار موفق‌تر از بقیه روش‌ها است. البته در ادامه فرایند روش حداقل روانکار عملکرد مثبت خود را از دست داده و به شدت عمر ابزار کاهش می‌یابد، ولی روش غوطه‌وری در حفظ عمر ابزار بهتر عمل می‌کند.

به‌طور کلی، پیدایش لایه و لبه انباشته در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی با توجه به اینکه آلومینیوم فلزی چکش‌خوار و نرم است امری معمول است. با اعمال سیال برشی نیز مقدار و اندازه لایه و لبه انباشته تغییر می‌کند. روکش ابزار کاربایدی کارایی مناسبی در برابر مکانیسم سایش که بر اثر تماس با ذرات تقویت‌کننده SiC ایجاد می‌شود را نداشته و به‌سرعت ساییده شده و از بین می‌رود. با اعمال سیال برشی در روش‌های حداقل روانکار، غوطه‌وری و برودتی از سرعت تشکیل لبه انباشته کاسته می‌شود، زیرا سیال برشی به‌سرعت به منطقه برشی برخورد می‌کند و علاوه بر اینکه محیط را برای چسبیدن براده به سطح ابزار نامساعد می‌کند، اگر براده به سطح ابزار چسبیده باشد آن را کنده و اجازه بزرگ‌تر شدن آن را نمی‌دهد. بنابراین ذرات براده چسبیده شده بر سطح ابزار در این روش بیشتر به‌صورت لایه انباشته است. بخصوص در روش برودتی که دمای بسیار پایین‌تری ایجاد می‌کند، میزان لبه انباشته در سرعت‌های کمتر بسیار کم، ولی لایه انباشته بالاتری ایجاد می‌گردد و با افزایش سرعت برشی میزان لایه انباشته کاهش و لبه انباشته افزایش می‌یابد. استفاده از سیال برشی در سه روش حداقل روانکار، غوطه‌وری و برودتی سرعت سایش را کاهش می‌دهد. در سرعت برشی ثابت، مقدار سایش پهلویی ابزار برشی در حالت خشک به نسبت سه روش دیگر بیشتر است. راندمان و کارایی روش‌های خنک‌کاری در همه سرعت‌ها یکسان نبوده و در برخی سرعت‌ها مخصوصاً در حالت حداقل روانکار نسبت به حالت خشک بهبود چشمگیری ایجاد نکرد. در سرعت برشی بالا، روش غوطه‌وری به علت اینکه مقدار دبی سیال برشی در آن نسبت به حالت حداقل روانکار بیشتر است، در کاهش سایش پهلویی نسبت به حالت فرزکاری حداقل روانکار و خشک عملکرد بهتری داشته و مقدار سایش ابزار برشی را نسبت به سه روش دیگر بیشتر کاهش داده است. به‌عبارت‌دیگر شیب نمودار سایش ابزار در این روش کمتر از حالت حداقل روانکار حداقل روانکار و خشک است. ولی در سرعت پایین‌تر روش برودتی عملکرد بهتری دارد.

8- نتیجه‌گیری

از بررسی نتایج آزمون‌ها در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس، آنالیز مپ و تحلیل‌های آماری صورت‌گرفته، نتایج زیر به دست آمد:

- اثرگذاری پارامترهای برشی و برودتی بر روی میزان سایش ابزار به کمک تحلیل آماری $R^2=0.97$ را نشان داد که از نظر آماری قابل‌اتکا بوده و سایش ابزار ارتباط مستقیم با پارامترهای برشی به‌کاررفته دارد. شرایط بهینه پارامترهای برودتی برای کمترین سایش ابزار در قطر نازل بزرگ‌تر (3.5) و کمترین فاصله نازل تا قطعه (1.5) و در فشار مخزن متوسط (2.5) ایجاد گردید.

افزایش فاصله ابزار، سایش ابزار نیز افزایش می‌یابد. از این رو می‌توان گفت علت این امر تبخیر سریع مایع نیتروژن در برخورد با هوای محیط است. نکته قابل‌توجه در این نمودار این است که با افزایش فشار برودتی تغییر چشمگیری در سایش ابزار به وجود نیامد.

با استناد به شکل 7، می‌توان اذعان کرد که ابتدا سرعت برشی و در درجه دوم قطر نازل بیشترین تأثیر را بر سایش ابزار دارند. علت این امر را می‌توان افزایش دبی خروجی نیتروژن مایع و همچنین مطابق با آن، افزایش نسبت مایع به گاز در لحظه برخورد به لبه ابزار دانست. در رتبه سوم مؤثرترین پارامتر نیز فاصله نازل است که با نزدیک‌تر شدن به لبه برشی نسبت مایع به گاز را در مسیر برخورد حفظ می‌کند و همچنین رابطه بین قطر نازل و فشار در اولویت چهارم پارامترهای مؤثر است. نکته جالب در این نمودار تأثیر پارامتر فشار است که به‌تنهایی هیچ تأثیر قابل‌توجهی بر سایش ابزار ندارد.

با مقایسه میزان سایش ابزارها در هر یک از شرایط برشی استفاده‌شده، می‌توان اذعان کرد که کمترین سایش ابزار در سرعت برشی 120 متر بر دقیقه اتفاق افتاد. در شرایط یکسان برشی و در مقایسه با حالت خشک، عمر ابزار 5 تا 25% افزایش یافته است. این در حالی است که روش حداقل روانکار حدود 5% و روش غوطه‌وری حدود 13% نسبت به حالت خشک در سرعت افزایش عمر ابزار را به همراه داشته‌اند. جزییات آنالیز واریانس انجام‌شده در جدول شماره 3 مشاهده می‌شود. در این نمودار VC سرعت برشی و D قطر نازل و L فاصله نازل تا قطعه کار و P فشار کرایونیک می‌باشد.

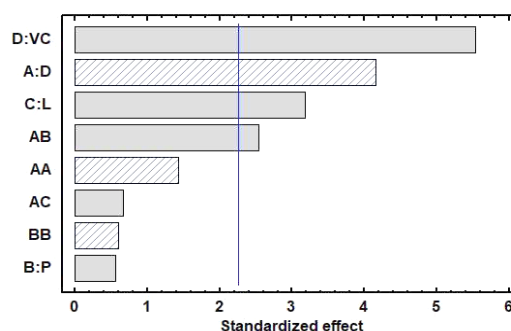


Fig. 7 Standardized Pareto chart for flank wear with $R^2=0.97$

شکل 7 نمودار Pareto سایش ابزار با $R^2=0.97$

جدول 2 آنالیز واریانس سایش ابزار

Table 2 Analysis of variance of tool wear

منبع	مجموع مربعات	DF	میدان متوسط	P-Value
A:D	2655.19	1	2655.19	0.0025
B:P	47.25	1	47.25	0.5927
C:L	1552.69	1	1552.69	0.0112
D:VC	4710.69	1	4710.69	0.0004
AA	315.063	1	315.063	0.1859
AB	992.25	1	992.25	0.0316
AC	69.0312	1	69.0312	0.5195
BB	56.3333	1	56.3333	0.5598
Ttal error	1382.63	9	153.625	
Total (corr.)	46177.1	17		

با توجه به سایش ابزارها در سرعت برشی 180 متر بر دقیقه، افزایش عمر ابزار در روش برودتی نسبت به حالت خشک حدود 17% تا 25% است. ولی در حالت حداقل روانکار حدود 16% و در حالت غوطه‌وری حدود 18.5%

- by in situ technique," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 428, no. 1-2, pp. 34-40, 2006.
- [9] Said, M. S., Yusoff, M. S. and Hassan, C. H., "Tool wear in machining AlSi/AlN metal matrix composite 10 wt% reinforcement using uncoated cutting tool," In *applied mechanics and materials*, Vol. 465, no. 1, pp. 973-977, 2014.
- [10] Sougavabar, M. A., Niknam, S. A., Davoodi, B. and Songmene, V., "Milling Al520-MMC reinforced with SiC particles and additive elements Bi and Sn," In *Persian. Materials*, Vol. 15, NO. 4, pp. 1533, 2022.
- [11] Wang, Yongqing, et al. "Research on surface heat transfer mechanism of liquid nitrogen jet cooling in cryogenic machining," *Applied Thermal Engineering*, pp. 179, 2020.
- [12] Sarikaya, Murat, et al. "Cooling techniques to improve the machinability and sustainability of lightweight alloys: A state-of-the-art review." *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 62 pp. 179-201, 2021.
- [13] Saberi, M., Niknam, S. A., Hashemi, R., "On the impacts of cutting parameters on surface roughness, tool wear mode and size in slot milling of A356 metal matrix composites reinforced with silicon carbide elements" *Journal of Engineering Manufacture.*, Vol. 235, no. 10, pp. 1655-1667, 2021.
- مؤثرترین پارامترها برای سایش پهلوی ابزار به ترتیب سرعت برشی، قطر نازل و فاصله نازل تا سطح قطعه نازل بود. فشار برودتی به تنهایی هیچ تأثیر مثبتی در روند سایش ابزار نداشت.
 - مکانیسم اصلی سایش در فرزکاری کامپوزیت A356، مکانیسم خراشیدگی بود که بر اثر برخورد ذرات تقویت کننده SiC و کشیده شدن آن‌ها بر روی لایه روکش ابزار اتفاق می افتد.
 - تقریباً در تمامی آزمون‌های فرزکاری، پدیده‌های اصلی سایش در سطح براده و پهلویی ابزار برشی پدیده خراشیدگی، لایه و لبه انباشته است. با توجه به اینکه کامپوزیت‌ها ریخته‌گری شده هستند، دارای سختی بالایی نیستند، بنابراین دما در ناحیه برش به حدی زیاد نمی‌شود که مناسب دیگر مکانیسم‌های سایش باشد.
 - برخلاف برخی تحقیقات صورت گرفته که استفاده از سیال برشی در ماشین کاری کامپوزیت‌ها را مفید نمی‌دانند یا به عبارت دیگر معتقد هستند که استفاده از سیال در ماشین کاری با عدم استفاده سیال برشی تفاوتی نمی‌کند، سایش ابزار برشی در هر سه روش خنک کاری اعمالی کاهش یافت. در فرزکاری خشک، مقدار سایش پهلوی ابزار نسبت به روش‌های MQL و غوطه‌وری و برودتی بیشتر بود.
 - فرزکاری با روش غوطه‌وری بهترین عملکرد را در کاهش لایه و لبه انباشته داشته است و در مواردی تصور می‌شود که حتی با عملکرد مناسب در کاهش درجه حرارت و ضریب اصطکاک از تشکیل لبه انباشته جلوگیری کرده است.

9- تقدیر و تشکر

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری انجام شده است.

10- منابع

- [1] Alipour Sougavabar, M., Niknam, S. A., Davoodi, B., "Study of tool flank wear and surface quality in milling of Al520-MMCs reinforced with SiC and Sn particles," In *Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 9, No. 2, pp. 1970-1975, 2023.
- [2] Paulo Davim, J., "Diamond tool performance in machining metal-matrix composites," *Journal of materials processing technology*, vol. 128, no. 1-3, pp. 100-105, 2002.
- [3] António, C. C. and Davim, J. P., "Optimal cutting conditions in turning of particulate metal matrix composites based on experiment and a genetic search model," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 33, no. 2, pp. 213-219, 2002.
- [4] Nicholls, C. J., Boswell, B., Davies, I. J. and Islam, M. N., "Review of machining metal matrix composites," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 2429-2441, 2017.
- [5] Gururaja, S., Ramulu, M. and Pedersen, W., "Machining of MMCs: a review," *Machining Science and Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 41-73, 2013.
- [6] Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S. T., "Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 57, no. 1, pp. 83-101, 2012.
- [7] Aronson, R. B., "Machining composites," *Manufacturing engineering*, vol. 122, no. 1, 1999.
- [8] Rai, R. N., Datta, G., Chakraborty, M. and Chattopadhyay, A., "A study on the machinability behaviour of Al-TiC composite prepared