

بررسی قابلیت ماشین کاری ماده مرکب Al-15%SiC ساخته شده به روش اکستروژن پودر

جعفر رحیمی نسب^۱ و محمدعلی کوچک زاده^۲

رضا یوسفی^۱

دانشکده مهندسی هوافضا

مرکز کارگاه های آموزشی دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی شریف

(تاریخ دریافت: ۸۹/۰۲/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۲/۱۷)

چکیده

مواد مرکب زمینه فلزی به دلیل ویژگی های ممتاز در کاربردهای مهندسی مورد توجه قرار گرفته است، اما قابلیت ماشین کاری پایین آنها مانع اصلی برای جایگزینی آنها به جای قطعات فلزی است. طبیعت ساینده و سخت فاز تقویت کننده باعث سایش سریع ابزار در حین ماشین کاری و در نتیجه افزایش هزینه های ماشین کاری می شود. در این مقاله، بررسی تجربی قابلیت ماشین کاری ماده مرکب زمینه فلزی Al-15%SiC که با فرآیند متالورژی پودر ساخته شده است، مورد بحث قرار می گیرد. تراشکاری پیوسته میله های ماده مرکب با استفاده از ابزارهای تراش کاربیدی در شرایط خشک، به عنوان روش انجام آزمایش انتخاب شده است. اثر پارامترهای ماشین کاری، یعنی سرعت ماشین کاری، نرخ تغذیه و عمق برش روی سایش ابزار، نیروهای ماشین کاری و کیفیت سطح در حین آزمایش ها بررسی و با کارهای مشابه مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که سرعت ماشین کاری و عمق تراش نسبت به نرخ تغذیه اثر بیشتری بر قابلیت ماشین کاری دارد. همچنین سایش ابزار، کیفیت سطح تمام شده و نیروی ماشین کاری در این نوع ماده مرکب از ماده مرکب ساخته شده به روش ریخته گری بیشتر است. شرایط بهینه ماشین کاری در این نوع ماده مرکب، با سرعت های متوسط و نرخ پیشروی و عمق برش کم حاصل می شود.

واژه های کلیدی: قابلیت ماشین کاری، مواد مرکب زمینه فلزی، تراشکاری، ابزارهای کاربیدی، متالورژی پودر

Investigation the Machinability of Al-15%SiC Composite Produced by Powder Extrusion

R. Yousefi

J. Rahiminasab and M.A. Kouchakzadeh

Dep't of Mech. Eng.

Dep't of Aerospace Eng.

Sharif Univ. of Tech.

(Received: 1 May, 2010; Accepted: 7 Mars, 2012)

ABSTRACT

Metal matrix composites (MMCs) have received considerable attention due to their excellent engineering properties, however, poor machinability has been the main deterrent to their substitution for metal parts. The hardness and abrasive nature of reinforcement phase causes rapid tool wear during machining and consequently, high machining costs. This paper discusses the experimental investigation on the machinability of Al-15%SiC particulate metal matrix composite produced by powder metallurgical process. Continuous dry turning of round composite bars using titanium carbide inserts has been selected as the test method. The influence of machining parameters, e.g. cutting speed, feed rate and depth of cut on the tool wear, cutting forces and finished surface criteria were investigated during the experiments and compared with similar works. The results show that the cutting speed and depth of cut are more dominant factors on machinability than feed rate. Tool wear, surface roughness & machining force, in machining of MMCs produced by powder extrusion are higher than those in machining of similar MMCs produced by casting process. The optimum condition for the tool wear, cutting force and surface finish criteria can be achieved by low values of feed rate and depth of cut and moderate values of cutting speed.

Keywords: Machinability, MMCs, Turning, Carbide Tools, Powder Metallurgy

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): yousefi@sharif.edu

۲- کارشناس ارشد

۳- دانشیار

۱- مقدمه

است. نتایج نشان می‌دهد که نرخ تغذیه نسبت به سرعت ماشین‌کاری اثر کمتری روی سایش ابزار دارد. همچنین افزایش سرعت ماشین‌کاری و نرخ تغذیه به ترتیب، زبری سطح را کاهش و افزایش داده است.

در سال ۲۰۰۵، کیلیکاپ^۳ و همکاران [۲]، سایش ابزار و کیفیت سطح را در عملیات تراشکاری Al-5%SiC با ابزارهای کاربیدی پوشش‌دار و بدون پوشش مطالعه کردند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که میزان سایش جانبی در ابزارهای پوشش‌دار کمتر بوده است.

گالاب^۴ و همکاران در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۴ [۳-۵] به بررسی قابلیت ماشین‌کاری آلومینیوم تقویت شده با ۲۰٪ کاربید سیلیسیم پرداخته و در عملیات تراشکاری خشک، اثر پارامترهای ماشین‌کاری روی سایش ابزار و کیفیت سطح بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که سرعت و عمق برش زیاد باعث بهبود کیفیت سطح می‌شود.

در سال ۲۰۰۳ مانا^۵ و بهاتاچاریا^۶ [۶]، مطالعه‌ای روی قابلیت ماشین‌کاری ماده مرکب Al/SiC انجام دادند. روش مورد استفاده برای ساخت ماده مرکب مورد استفاده ایشان ریخته‌گری و میزان فاز تقویت‌کننده در این ماده مرکب ۱۵٪ بوده است. آنها اظهار کرده‌اند که در سرعت‌های پایین ماشین‌کاری میزان سایش ابزار به دلیل تشکیل لبه انباشته، بیشتر است.

لی^۷ و سیه^۸ در سال ۲۰۰۱ [۷]، اثر اندازه و میزان فاز تقویت‌کننده SiC را بر قابلیت ماشین‌کاری مواد مرکب زمینه فلزی بررسی کردند. براساس نتایج به دست آمده در صورتی که میزان فاز تقویت‌کننده از یک حد بحرانی بیشتر شود، سایش به‌طور جدی زیاد می‌شود.

روش ساخت ماده مرکب تأثیر قابل توجهی روی خواص مکانیکی و ریزساختار آن دارد. امروزه ریخته‌گری، رایج‌ترین روش ساخت مواد مرکب زمینه فلزی است. اما، این روش محدودیت‌ها و معایبی دارد که استفاده از آن را در برخی موارد ناممکن می‌سازد. به‌عنوان مثال در روش ریخته‌گری

امروزه مواد مرکب زمینه فلزی در بسیاری از کاربردها به‌ویژه در صنایع هوافضا و خودروسازی به دلیل نیاز به کارایی بیشتر، جایگزین مواد معمولی شده است. این مواد خواص مهمی مانند استحکام بالا، وزن کم، چکش‌خواری پایین، مقاومت سایشی بالا، هدایت حرارتی بالا و ضریب انبساط حرارتی پایین دارد.

در حال حاضر با روش‌های مختلف، مواد مرکب زمینه فلزی معمولاً نزدیک به ابعاد نهایی ساخته می‌شوند. از این رو در اغلب کاربردهای مهندسی برای وصول به ابعاد نهایی نیاز به ماشین‌کاری دارند. از طرف دیگر به دلیل وجود ذرات یا فیبرهای غیر فلزی سخت و ساینده موجود در زمینه فلزی نرم‌تر، ماشین‌کاری آنها با مشکلات غیرمعمولی مواجه است. به‌عنوان مثال سایش ابزار در ماشین‌کاری مواد مرکب زمینه فلزی بسیار حادث‌تر از ماشین‌کاری خود زمینه فلزی است. بنابراین آسانی ماشین‌کاری یا "قابلیت ماشین‌کاری" معیار مهمی برای قضاوت درباره مناسب بودن این مواد در کاربردهای مهندسی است.

آلومینیوم به‌عنوان فاز زمینه در مواد مرکب زمینه فلزی، بیشترین کاربرد را دارد. در صورتی که فاز تقویت‌کننده از نوع ذره‌ای باشد، معمولاً از SiC یا Al₂O₃ استفاده می‌شود. ماده مرکب Al-15%SiC که قابلیت ماشین‌کاری آن در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، از پرمصرف‌ترین مواد مرکب زمینه فلزی است.

اطلاعات مفیدی از بررسی‌های انجام گرفته شده در زمینه قابلیت ماشین‌کاری مواد مرکب زمینه آلومینیومی در دو دهه اخیر فراهم آمده است. با وجود این حجم از اطلاعات منتشر شده هنوز رفتار ماشین‌کاری این مواد مشخص نشده است و جای کار بسیاری وجود دارد.

ازبن^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۱]، قابلیت ماشین‌کاری آلومینیوم تقویت شده توسط ذرات کاربید سیلیسیم را در عملیات تراشکاری^۲ بررسی کردند. میزان ذرات تقویت‌کننده ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ وزنی بوده و از روش ریخته‌گری تحت فشار برای ساخت ماده مرکب استفاده شده

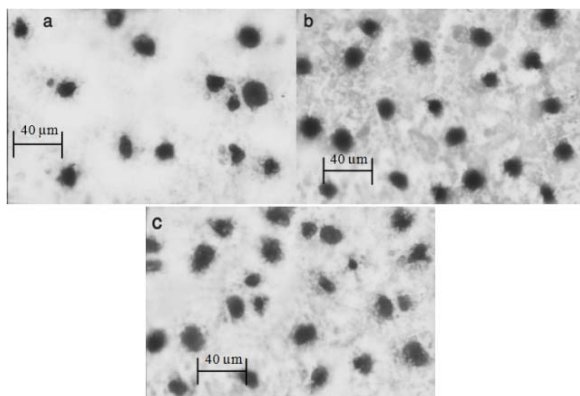
3- Kilickap
4- Gallab
5- Manna
6- Bhattacharayya
7- Li
8- Seah

1- Ozben
2- Turning

جدول (۱): ترکیب شیمیایی پودر آلومینیوم مورد استفاده.

Si	۰/۰۶۶۷
Fe	۰/۲۵۷
Cu	۰/۰۱۳۲
Mg	۰/۰۰۳۲
Cr	۰/۰۳۲۴
Ni	۰/۰۱۰۶
Zn	۰/۰۷۱
Pb	۰/۰۱۷۷
Sn	۰/۱۶۷
Al	۹۹/۳۶۱

ابتدا پودرهای آلومینیوم با ۱۵٪ حجمی کاربید سیلیسیم به صورت خشک به مدت ۱۲۰ دقیقه با دستگاه مخلوط کن TURBOBULA مخلوط شد. سپس پودرهای مخلوط شده در داخل کن‌های آلومینیومی تحت نیروی ۵۰ تن فشرده شده است. بیلتهای تهیه شده قبل از عملیات اکستروژن در داخل کوره الکتریکی به مدت ۱۸۰ دقیقه در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد با محیط آرگون پیش گرم و در نهایت عملیات اکستروژن با نسبت اکستروژن ۱۵ انجام شده است. ریزساختار مواد مرکب زمینه آلومینیومی تقویت شده با درصدهای مختلف ذرات SiC استفاده شده در این مقاله در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): ریزساختار ماده استفاده شده در این تحقیق
(الف): ۵٪ SiC (ب): ۱۵٪ SiC (ج): ۲۰٪ SiC

برای ساخت مواد مرکب زمینه آلومینیومی حد بالای ذرات تقویت کننده حدود ۲۰٪ حجمی است. با توجه به این مقدار فاز تقویت کننده، حداکثر استحکام کششی و مدول یانگ قابل دسترس به ترتیب ۵۰۰ MPa و ۱۰۰ GPa است. اما در روش متالورژی پودر که شامل اکستروژن مخلوط پودر است، مقدار ذرات تقویت کننده می تواند به بیش از ۴۰٪ حجمی برسد. در نتیجه استحکام کششی و مدول یانگ می تواند به ترتیب به ۷۶۰ MPa و ۱۲۵ GPa افزایش یابد [۸].

تقریباً در تمامی تحقیقات انجام شده روی قابلیت ماشین کاری مواد مرکب Al/SiC از نمونه های ساخته شده به روش های ریخته گری استفاده شده است. اما به دلیل ویژگی های برتر مواد مرکب تهیه شده به روش اکستروژن پودر نسبت به روش ریخته گری و نیز کمبود داده های ماشین کاری در این زمینه، قابلیت ماشین کاری نمونه های ساخته شده به روش اکستروژن پودر با ۱۵٪ حجمی کاربید سیلیسیم Al/SiC، در عملیات تراشکاری خشک با ابزارهای کاربیدی مورد پژوهش قرار گرفته است. در این تحقیق، معیارهای قابلیت ماشین کاری شامل نیروهای ماشین کاری، کیفیت سطح تمام شده و سایش ابزار مورد نظر می باشد.

۲- سامانه پژوهش و شرایط آزمایش

در این تحقیق نمونه های آزمایش به روش اکستروژن پودر ساخته شده و سپس در دستگاه تراش مورد ماشین کاری قرار گرفته است.

۲-۱- روش ساخت نمونه ها

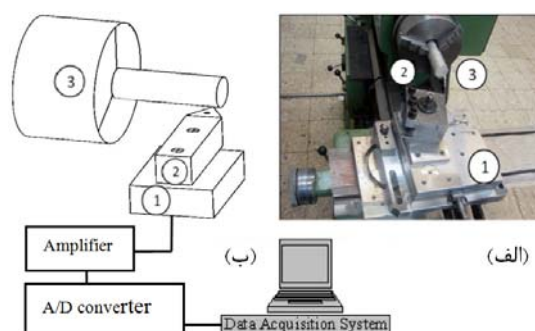
در این پژوهش از پودر آلومینیوم تولید شده به روش افشانش گازی^۱ به عنوان فاز زمینه استفاده شده است. اندازه متوسط ذرات پودر آلومینیوم ۶۳ μm بوده است. ترکیب شیمیایی پودر آلومینیوم به کار رفته در جدول ۱ آورده شده است. از پودر ذرات SiC با مش ۸۰۰ و اندازه متوسط حدود ۱۸-۲۰ μm به عنوان ذرات تقویت کننده استفاده شده است. آنالیز پودر آلومینیوم نشان می دهد که ذرات آلومینیوم عموماً دارای شکل های نیمه کروی و بی قاعده است، در حالی که ذرات SiC شکل چند وجهی و کاملاً نامنظم دارد.

1- Gas Atomizing

۲-۲- شرایط آزمایش

نمونه‌های آزمایش، از میله‌هایی به طول ۱۳۵ mm و قطر ۱۳ mm تشکیل شده که در هر آزمایش ۹۵ mm آن در معرض تراش کاری قرار می‌گیرد. جنس ابزار ماشین‌کاری مورد استفاده، کاربید تیتانیوم با درجه^۱ K10 است که معمولاً برای ماشین‌کاری مواد مرکب زمینه فلزی از آن استفاده می‌شود. ابزار اینسرتی به کار رفته از نوع مثلثی شکل با زاویه براده و زاویه آزاد صفر درجه و شعاع نوک ابزار ۰/۸ میلی‌متر است. کد استاندارد ISO برای ابزار ماشین‌کاری و ابزار گیر به ترتیب TNMA 160408 و PTGNR/L 2525M16 است. گرچه با زاویه آزاد صفر درجه نمی‌توان عملیات ماشین‌کاری انجام داد، ولی وقتی ابزار اینسرتی در داخل ابزار گیر مربوطه قرار داده و محکم می‌شود، زاویه براده به ۶- (منفی شش) درجه و زاویه آزاد به ۶+ (مثبت شش) درجه تبدیل می‌شوند که در این صورت به راحتی می‌توان عملیات براده برداری را انجام داد. شکل ۲-الف نمای اصلی دستگاه آزمایش و شکل ۲-ب طرح‌واره تنظیم دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد.

برای اندازه‌گیری نیروهای ماشین‌کاری از دستگاه دینامومتر Kistler 5501 با تقویت‌کننده Kistler 5007 استفاده شده است. نیروها در جهت‌های مماسی، شعاعی و محوری با نرخ نمونه‌برداری ۱۵۰۰۰ نمونه در ثانیه در حین ماشین‌کاری اندازه‌گیری شده است.



شکل (۲): (الف) تصویر واقعی دستگاه آزمایش،

(ب) طرح‌واره تنظیم دستگاه آزمایش،

۱- دینامومتر ۲- ابزار ۳- قطعه کار.

به کمک میکروسکوپی از نوع Mitutoyo TM 500. سایش سطح پیشانی ابزار، اندازه‌گیری شده است. زبری سطح قطعات ماشین‌کاری شده نیز با دستگاه زبری‌سنج Surfscan 200 Taylor Hobson اندازه‌گیری شده است. شرایط تراش کاری به‌طور خلاصه در جدول ۲ آمده است.

جدول (۲): جزئیات شرایط آزمایش‌های ماشین‌کاری.

Machine	Tabriz-TN40A
Tool holder	SANDVIK-PTGNR/L 2525M16
Tool inserts	SANDVIK -TNMA 160408(K10)
Cutting speed (m/min)	20, 30,40,60, 80
Feed rate (mm/rev)	0.08, 0.16, 0.24, 0.32
Depth of cut (mm)	0.4, 0.8,1.2
Cutting length (mm)	95
Coolant	Air

۳- نتایج آزمایش و بحث و بررسی قابلیت ماشین‌کاری

نیروهای ماشین‌کاری، کیفیت سطح تمام شده و سایش ابزار کمیت‌هایی است که قابلیت ماشین‌کاری یک ماده را تعریف می‌کند. این کمیت‌ها خود تابعی از متغیرهایی مثل شرایط ماشین‌کاری، هندسه و جنس ابزار است. در این میان پارامترهای ماشین‌کاری یعنی سرعت ماشین‌کاری، نرخ تغذیه و عمق تراش اهمیت زیادی دارد. در واقع قابلیت ماشین‌کاری یک ماده را برحسب این پارامترها ارزیابی می‌کنند.

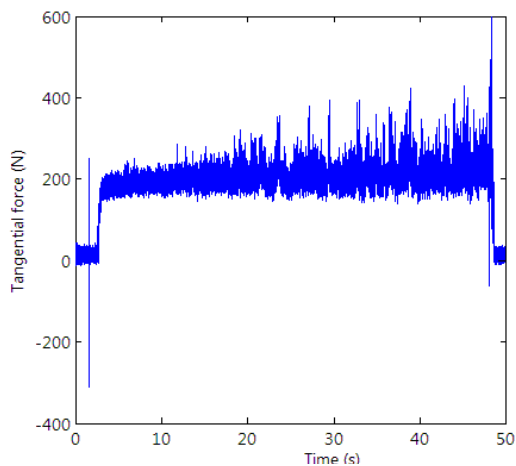
۳-۱- نیروهای ماشین‌کاری

در طول هر آزمایش تراش کاری نیروها در سه جهت مماسی، شعاعی و محوری به‌وسیله دینامومتر اندازه‌گیری می‌شود. طرح‌واره این نیروها در عملیات روتراشی در شکل ۳ نشان داده شده است.

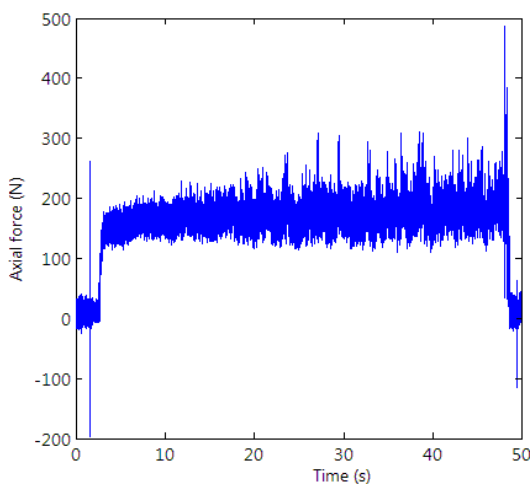
۳-۱-۱- اثر زمان بر نیروهای تراشکاری

نیروهای ماشین‌کاری تابعی از زمان بوده و تقریباً حول یک مقدار متوسط رفتار نوسانی دارند. علت این رفتار نوسانی

ماشین کاری 60 m/min ، نرخ تغذیه 0.08 mm/rev و عمق ماشین کاری 0.8 mm بوده است. برای همین شرایط نیروهای محوری و شعاعی به ترتیب در شکل های ۵ و ۶ نشان داده شده است. به محض درگیر شدن ابزار با قطعه کار نیرو به طور پله ای بالا می رود و تا پایان زمان ماشین کاری طوری ارتعاش می کند که میانگین آن به تدریج رو به افزایش است.

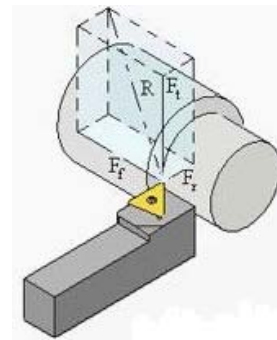


شکل (۴): نیروی مماسی برحسب زمان تراشکاری سرعت ماشین کاری 60 m/min ، نرخ پیشروی 0.08 mm/rev و عمق تراش 0.8 mm .



شکل (۵): نیروی محوری برحسب زمان تراشکاری سرعت ماشین کاری 60 m/min ، نرخ پیشروی 0.08 mm/rev و عمق تراش 0.8 mm .

به دلیل برخورد ابزار به دانه های SiC است. در مقیاس میکروسکوپی، ابزار تراش کاری در حین عملیات یا از روی ذرات سخت ماده مرکب عبور می کند، یا ذرات سخت را از زمینه آلومینیومی جدا می کند و یا باعث شکست ذرات سخت می شود. در حالت اول نیروی ماشین کاری در کمترین مقدار خود اعمال می شود. زیرا که زمینه آلومینیومی نرم و خوش تراش را برش می دهد. زمانی که ذرات سخت را از زمینه جدا می کند، نیروی بیشتری برای این کار لازم است. اما وقتی که ذرات سخت و شکننده SiC در معرض شکست توسط ابزار قرار می گیرند، بیشترین نیروی تراشکاری در آن لحظه اعمال می شود [۹].



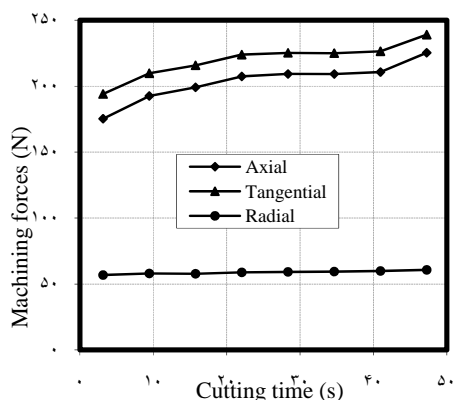
شکل (۳): نیروهای ماشین کاری در عملیات روتراشی.

از آنجا که ذرات سخت در زمینه نرم آلومینیومی به صورت پراکنده، تصادفی و نزدیک به هم توزیع شده است، بنابراین حین فرآیند ماشین کاری، نیروهای براده برداری رفتار نوسانی حول یک مقدار متوسط را از خود نشان می دهد. متوسط این نیروها در هر جهت (مماسی، محوری و شعاعی) در طول یک آزمایش به عنوان نیروی ماشین کاری در نظر گرفته می شود. این مقادیر نیروهای ماشین کاری در واقع همان بخش استاتیکی نیرو را تشکیل می دهد.

مدت زمان ماشین کاری در هر آزمایش تابعی از نرخ تغذیه و سرعت ماشین کاری است. در واقع زمان ماشین کاری به طور خطی با هر یک از این پارامترها نسبت معکوس دارد. به عنوان مثال اگر نرخ تغذیه یا سرعت ماشین کاری دو برابر شود، زمان ماشین کاری نصف خواهد شد.

در شکل ۴ طیف نیروی مماسی برحسب زمان ماشین کاری نشان داده شده است. در این شرایط سرعت

و محوری در طول زمان ماشین کاری می تواند سایش نسبی ابزار در طول این مدت باشد و علت دیگر تشکیل لبه انباشته روی لبه ابزار است. لبه انباشته باعث افزایش زاویه گوه در نتیجه افزایش نیروها در دو جهت مماسی و محوری می شود. از آنجا که لبه انباشته به صورت لایه لایه در طول زمان ماشین کاری ایجاد می شود، بنابراین افزایش نسبی نیروهای ماشین کاری در طول زمان را سبب شده است. در حالی که در جهت شعاعی عملاً تغییر خاصی در هندسه ابزار به وجود نمی آید. از دو دلیل ذکر شده دلیل دوم از قوت بیشتری برخوردار است.



شکل (۷): تغییر نیروهای ماشین کاری بر حسب زمان

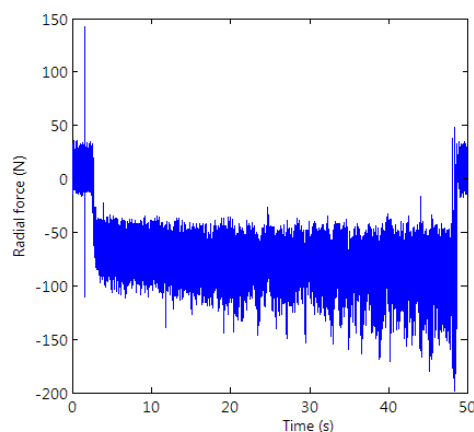
سرعت ماشین کاری 60 m/min ، نرخ پیشروی 0.08 mm/rev و عمق تراش 0.8 mm .

زیرا که در مدت زمان 50 ثانیه سایش قابل توجهی در ابزار تراش که باعث این میزان افزایش نیرو باشد، به وجود نخواهد آمد. از طرفی وجود لبه انباشته مانعی برای سایش ابزار به حساب می آید. مشاهدات میکروسکوپی ابزار پس از اتمام عملیات، ایجاد لبه انباشته را تأیید می کند (شکل ۸).

۳-۱-۲- اثر سرعت تراش بر نیروهای تراشکاری

شکل ۹ تغییرات نیروهای ماشین کاری در سرعت های مختلف را نشان می دهد. در تمامی موارد، نرخ تغذیه 0.08 mm/rev و عمق تراش 0.8 mm بوده است. با توجه به این شکل، مشاهده می شود که نیروهای مماسی و محوری هر دو با افزایش سرعت ماشین کاری کاهش می یابد. پدیده کاهش نیرو با افزایش سرعت یک امر طبیعی است، ولی در

در شکل ۶ نیروی شعاعی به این دلیل مقادیر منفی دارد که جهت آن برخلاف جهت مثبت سنسور دینامومتر است. در مقایسه شکل های ۴، ۵ و ۶ همان طور که انتظار می رود نیروی مماسی بیشترین مقدار و نیروی شعاعی کمترین و نیروی محوری بین این دو مقدار قرار دارد. زیرا که نیروی مماسی در جهت حرکت نسبی بین ابزار و قطعه ایجاد می شود. در جهت محوری ابزار ماشین کاری در حال پیشروی است، بنابراین سرعت نسبی بین آن و قطعه کار وجود دارد که البته مقدار آن در مقایسه با سرعت نسبی در جهت مماسی ناچیز است.

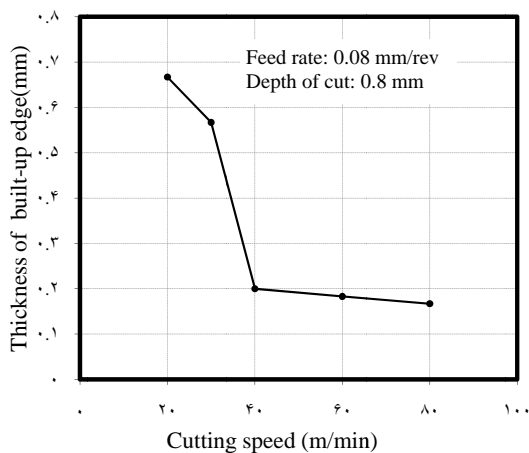


شکل (۶): نیروی شعاعی بر حسب زمان تراش کاری

سرعت ماشین کاری 60 m/min پیشروی 0.08 mm/rev و عمق تراش 0.8 mm .

در جهت شعاعی بین ابزار و قطعه کار تقریباً حرکت نسبی وجود ندارد، از این رو مقدار آن کمتر از دو مؤلفه دیگر است. بنابراین مقدار نیروی محوری کمتر از نیروی مماسی و بیشتر از نیروی شعاعی است. در شکل ۷ تغییرات نیروهای ماشین کاری بر حسب زمان نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، نیروی مماسی و محوری با گذشت زمان ماشین کاری افزایش می یابد و رفتار این دو نیرو شبیه هم است. علت این افزایش سایش ابزار در طول زمان ماشین کاری است. سایش ابزار با گذشت زمان افزایش می یابد. اما در مقدار نیروی شعاعی نسبت به زمان تغییر خاصی ایجاد نمی شود. یکی از علل افزایش نیروهای مماسی

می‌شود. هرچه لبه انباشته ضخیم‌تر باشد، افزایش نیروهای ماشین کاری در آن شرایط بیشتر است. اما همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت ماشین کاری ضخامت لبه‌های انباشته به شدت کاهش می‌یابد، به طوری که در سرعت ماشین کاری 80 m/min این میزان به کمترین مقدار خود یعنی 0.16 mm می‌رسد. با توجه به شکل ۹ می‌توان گفت روند تغییرات نیروی مماسی و محوری بر حسب سرعت ماشین کاری مشابه یکدیگرند. نکته قابل توجه این است که مقدار نیروی محوری به‌طور متوسط حدود 92% نیروی مماسی شده است. در حالی که این نسبت در ماشین کاری مواد غیرمرکب یا مواد مرکب تهیه شده به روش ریخته‌گری در حدود 50% است [۱۱]. بنابراین در سرعت‌های بالاتر که ضخامت لبه انباشته به شدت افت پیدا می‌کند، نیروهای ماشین کاری متناظر آنها نیز به شدت افت پیدا کرده است. علت این میزان افزایش را بایستی در ساختار و روش تهیه ماده مرکب مورد آزمایش جستجو کرد.



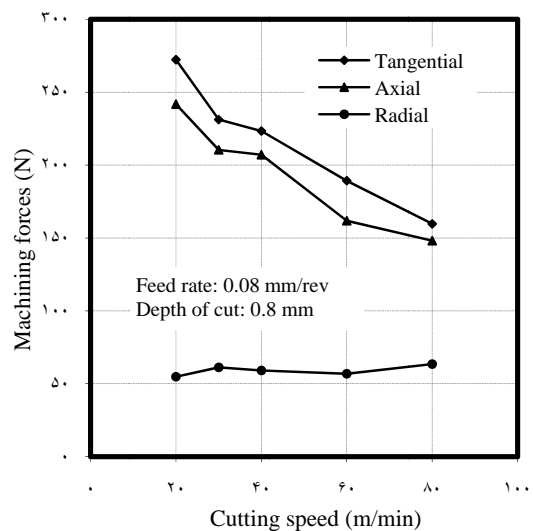
شکل (۱۰): تغییرات ضخامت لبه انباشته بر حسب سرعت نرخ پیشروی 0.08 mm/rev و عمق تراش 0.8 mm .

همان‌طور که در بخش ۲ (روش ساخت نمونه‌ها) ذکر شد، این ماده به روش متالورژی پودر و عملیات اکستروژن گرم تولید شده است. پودر آلومینیوم (زمینه ماده مرکب) و ذرات سخت (فاز سخت ماده مرکب) در کل ماده به صورت همگن توزیع شده است و در همه جهات از دو فاز زمینه و ذرات سخت تقریباً به یک اندازه وجود دارند. با فشرده شدن

ماده مرکب مورد آزمایش مشاهده می‌شود که میزان این کاهش از حد معمول در نمونه‌های مشابه فراتر رفته است. دو علت را برای این کار می‌توان ذکر کرد. یکی زاویه برش است که با افزایش سرعت ماشین کاری افزایش می‌یابد. این افزایش موجب کاهش نیروی برشی در ناحیه اولیه برش می‌شود [۱۰]. کاهش نیروی برشی، کاهش نیروهای ماشین کاری را در پی دارد.



شکل (۸): تشکیل لبه انباشته بر روی ابزار سرعت ماشین کاری 60 m/min ، نرخ پیشروی 0.08 mm/rev و عمق تراش 0.8 mm .



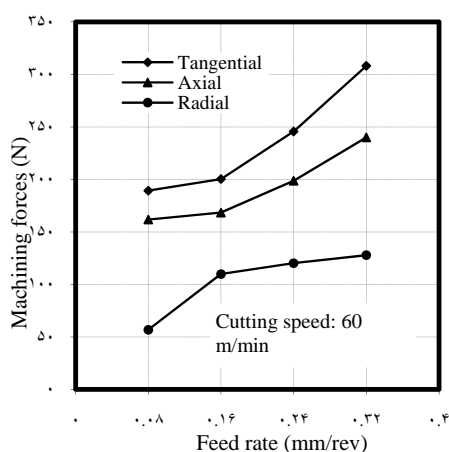
شکل (۹): تغییرات نیروهای تراشکاری بر حسب سرعت نرخ پیشروی 0.08 mm/rev و عمق تراش 0.8 mm .

دلیل دوم همان ایجاد لبه انباشته فوق‌الذکر است که سبب افزایش نیروهای تراش کاری در سرعت‌های پایین‌تر

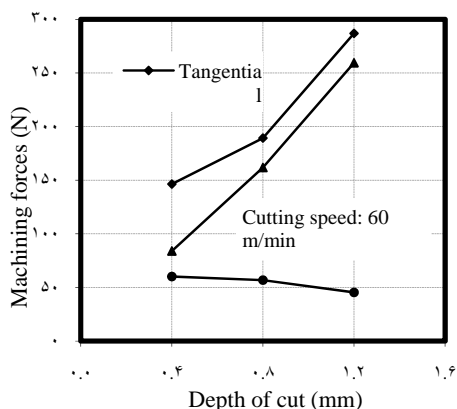
کتر از دو برابر افزایش یافته است.

۳-۱-۴- اثر عمق تراش بر نیروهای ماشین کاری

در شکل ۱۲ تغییرات نیروهای ماشین کاری برحسب عمق تراش نشان داده شده است. سرعت ماشین کاری ۶۰ m/min و نرخ تغذیه ۰/۰۸ mm/rev بوده است. با افزایش عمق تراش، نیروهای مماسی و محوری افزایش یافته است. درحالی که نیروی شعاعی اندکی کاهش پیدا کرده است. با توجه به شکل ۱۲ وقتی عمق تراش سه برابر شده است، نیروی مماسی که نیروی اصلی تراش کاری است، تقریباً دو برابر می شود.



شکل (۱۱): تغییرات نیروهای تراش کاری برحسب پیشروی سرعت ماشین کاری ۶۰ m/min و عمق تراش ۰/۰۸ mm.



شکل (۱۲): تغییرات نیروهای تراش کاری با عمق تراش سرعت ماشین کاری ۶۰ m/min و پیشروی ۰/۰۸ mm/rev.

دانه‌های مخلوط شده تحت نیروی ۵۰ تن و نسبت اکستروود ۱۵، تراکم ذرات زیاد می شود. از طرف دیگر در روش ریخته‌گری با منجمد شدن ماده مذاب، کریستال‌ها در جهات مختلف شکل می‌گیرند و کریستال‌های دارای جهت‌های یکسان تشکیل دانه مشخصی را می‌دهند که از برخورد دانه‌ها به یکدیگر، مرز دانه‌ها به وجود می‌آیند. در ماشین کاری مواد پرکریستالی که با تغییر شکل مومسان همراه است، صفحات کریستالی در جهات خاصی به حرکت در می‌آیند. این جهات ممکن است از هر دانه به دانه دیگر متفاوت باشد. به‌طور کلی تغییر شکل مومسان در مواد مرکب تهیه شده به‌روش ریخته‌گری جهت‌دار است. یعنی تنش برشی لازم که متناسب با نیروی ماشین کاری است، برای برش ماده در جهت مماسی بیشتر (حدود دو برابر) از جهت عمود بر آن یعنی جهت محوری است. اما در ماده مورد استفاده در این تحقیق از کریستال‌ها و دانه‌بندی خبری نیست. به عبارت دیگر خواص ماده غیر جهت‌دار است. بنابراین در هنگام ماشین کاری نیز جهت غالبی برای لغزش صفحات کریستالی در آن وجود ندارد. بنابراین برای تشکیل براده در دو جهت مماسی و محوری نیروی مورد نیاز نزدیک به هم است. از این روست که نیروی محوری تقریباً مساوی (به‌طور متوسط ۰/۹۲٪) نیروی مماسی می‌شود.

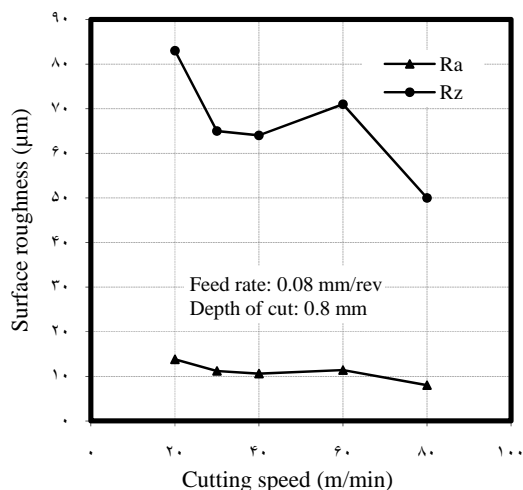
مقدار نیروی شعاعی در مقایسه با نیروهای مماسی و محوری کمتر است و تغییرات آن روند مشخصی ندارد. همچنین نیروی شعاعی حساسیت چندانی به تغییرات سرعت ندارد و همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، همه مقادیر آن بین ۵۰ تا ۷۰ نیوتن قرار دارد.

۳-۱-۳- اثر نرخ پیشروی بر نیروهای ماشین کاری

در شکل ۱۱ تغییرات نیروهای ماشین کاری برای نرخ تغذیه‌های مختلف نشان داده شده است. در این حالت سرعت و عمق برشی به ترتیب ۶۰ m/min و ۰/۰۸ mm بوده است. مشاهده می‌شود که نیروهای ماشین کاری در هر سه جهت با افزایش نرخ تغذیه افزایش می‌یابند.

تغییر نرخ تغذیه، برخلاف سرعت ماشین کاری، تأثیر قابل توجهی بر نیروی شعاعی دارد. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که با چهار برابر شدن نرخ تغذیه، نیروی شعاعی به

کلی با افزایش سرعت ماشین کاری کیفیت سطح بهبود می‌یابد. فقط هنگامی که سرعت ماشین کاری از ۴۰ m/min به ۶۰ m/min افزایش پیدا کرده است، R_z و R_a هر دو بیشتر شده است.



شکل (۱۳): تغییرات زبری سطح بر حسب سرعت نرخ پیشروی ۰/۰۸ mm/rev و عمق تراش ۰/۸ mm.

بهبود کیفیت سطح با افزایش سرعت ماشین کاری می‌تواند دو دلیل عمده داشته باشد. اول این‌که در سرعت بالای ماشین کاری، به علت افزایش دما، تشکیل لبه انباشته کمتر می‌شود. یکی از عوامل خرابی سطح تمام شده کنده شدن یا شکست ذرات سخت SiC از زمینه آلومینیوم است. با کنده شدن یا شکست ذرات سخت حفره‌هایی در سطح تمام شده ایجاد می‌شود که صافی سطح را خراب می‌کند. ذرات در حین ماشین کاری ممکن است دچار سه حالت شکل ۱۶ بشوند. در حالت اول شکل ۱۶-الف ذره SiC از سطح قطعه جدا نمی‌شود و درون قطعه باقی می‌ماند. در حالت دوم شکل ۱۶-ب ذره از سطح قطعه جدا شده و همراه براده خارج می‌گردد و باعث ایجاد حفره‌هایی در سطح ماشین کاری می‌شود. حالت سوم شکل ۱۶-ج ذره در برخورد به ابزار می‌شکند. این سه امر سبب کاهش کیفیت سطح تمام شده می‌شود [۹].

با افزایش دمای ماشین کاری به تبع افزایش سرعت، چکش‌خواری زمینه آلومینومی افزایش می‌یابد و ماده سخت

با مقایسه شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نتیجه می‌شود که تأثیر تغییرات عمق تراش بر نیروهای ماشین کاری از تأثیر تغییرات نرخ پیشروی بر نیروهای ماشین کاری بیشتر است. ضمناً مقدار نیروهای ماشین کاری به دست آمده در شرایط مختلف آزمایشی در این تحقیق بیشتر از مقادیر نیروهای ماشین کاری حاصله در سایر تحقیقات انجام شده توسط رامانیک^۱ و داویم^۲ و همکارانشان [۱۲ و ۱۳] است. همان‌طور که در بالا نیز ذکر شد، به نظر می‌رسد علت آن، تراکم (نسبت حجم ذرات ساینده در واحد حجم ماده مرکب) بالا و نسبت استحکام بر وزن بیشتر این ماده مرکب، نسبت به سایر مواد مرکب مشابه ساخته شده به روش ریخته‌گری باشد. بنابراین نیروی بیشتری برای جداسازی یا شکست ذرات از فلز زمینه لازم است.

۳-۲- کیفیت سطح تمام شده

یکی از مشکلاتی که در ماشین کاری آلیاژهای آلومینیوم وجود دارد، تشکیل لبه انباشته^۳ در نوک ابزار به علت تمایل زیاد آلومینیوم برای چسبیدن به ابزار ماشین کاری است. در ماشین کاری ماده مرکب AI-15%SiC نیز چنین پدیده‌ای به چشم می‌خورد (شکل ۸). تشکیل لبه انباشته در نوک ابزار که شامل ذرات سخت SiC نیز هست، باعث می‌شود که لبه انباشته همانند یک لبه ثانویه برنده عمل کرده و از کیفیت سطح تمام شده کاسته شود.

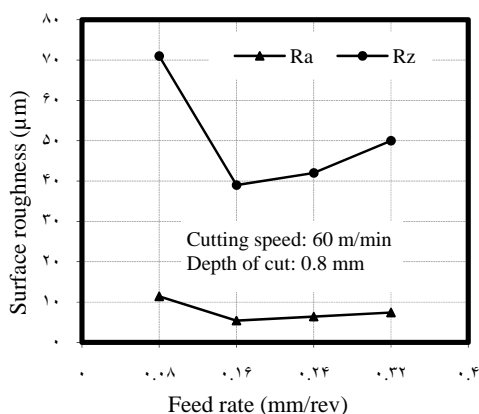
کیفیت سطح تمام شده با پارامترهایی مثل R_a ، متوسط حسابی فاصله برجستگی‌ها از خط میانگین و R_z متوسط حسابی حداکثر فاصله قله‌ها از دره‌ها است که در ۵ نقطه مختلف و تصادفی محاسبه می‌گردد، سنجیده می‌شود. پارامترهای دیگری هم برای بیان کمی کیفیت سطح وجود دارند که در اینجا به همین دو پارامتر اکتفا می‌شود.

۳-۲-۱- اثر سرعت ماشین کاری بر کیفیت سطح

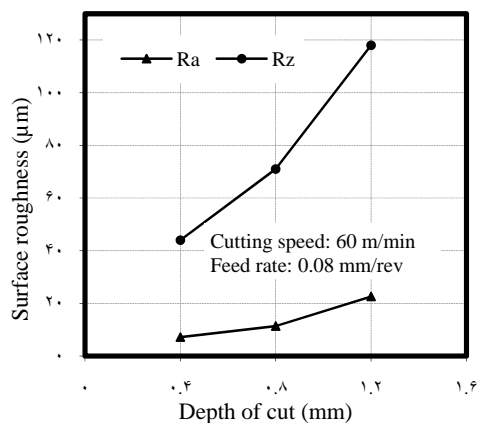
در شکل ۱۳، تغییرات R_z و R_a بر حسب سرعت ماشین کاری نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌طور

1- Pramanik
2- Davim
3- Built-up Edge

با توجه به شکل‌های ۱۴ و ۱۵ می‌توان نتیجه گرفت که در مقایسه بین این دو پارامتر ماشین‌کاری عمق تراش نسبت به نرخ تغذیه تأثیر کمتری بر بهبود کیفیت سطح تمام شده دارد. همچنین کیفیت سطح تمام شده تابعی از دو پدیده سایش ابزار و لبه انباشته است. با مقایسه کیفیت سطح ماده مرکب مورد آزمایش با نمونه ساخته شده با روش ریخته‌گری [۲]، در شرایط یکسان مشاهده می‌شود که کیفیت سطح به دست آمده در ماشین‌کاری این نوع ماده مرکب بدتر از ماده مرکب ساخته شده به روش ریخته‌گری است. این مسئله همان‌طور که دوباره ذکر شد، به دلیل تراکم و استحکام بالاتر ماده مرکب به کار رفته در این تحقیق است.



شکل (۱۴): تغییرات زبری سطح بر حسب سرعت پیشروی سرعت ماشین‌کاری ۶۰ m/min و عمق تراش ۰/۸ mm.



شکل (۱۵): تغییرات زبری سطح بر حسب عمق تراش سرعت ۶۰ m/min، پیشروی ۰/۰۸ mm/rev

SiC موجود در زمینه نرم به راحتی از سطح قطعه کار کنده می‌شود، در عوض حفره‌های به مراتب کوچک‌تر در سطح ماشین‌کاری شده ایجاد می‌شود که این موضوع خود بهبود کیفیت سطح را به دنبال دارد.

۲-۲-۳- اثر نرخ تغذیه بر کیفیت سطح تمام شده

اثر نرخ تغذیه بر زبری سطح در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، زبری سطح ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است. با مقایسه شکل‌های ۱۳ و ۱۴ می‌توان به این نتیجه رسید که نرخ تغذیه در مقایسه با سرعت ماشین‌کاری تأثیر کمتری روی بهبود کیفیت سطح تمام شده دارد.

علت کاهش اولیه زبری سطح با افزایش نرخ پیشروی شاید به دلیل پدیده هونینگ‌کاری به وسیله سطح آزاد ابزار پس از عمل براده‌برداری باشد که کیفیت سطح ماشین‌کاری شده را بهبود بخشیده است. ولی با افزایش نرخ پیشروی عامل سایش ابزار غلبه پیدا کرده و افزایش تدریجی سایش ابزار باعث بدتر شدن کیفیت سطح تمام شده، گردیده است.

۳-۲-۳- اثر عمق برش بر کیفیت سطح تمام شده

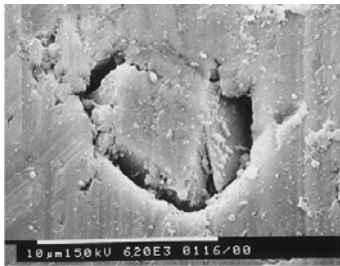
شکل ۱۵ اثر عمق برش را بر کیفیت سطح تمام شده نشان می‌دهد. افزایش عمق تراش اثر قابل توجهی بر روی کاهش کیفیت سطح داشته است، به طوری که با سه برابر شدن عمق برش، R_a سه برابر افزایش پیدا کرده است.

علت افزایش زبری سطح با افزایش عمق تراش این است که در عمق تراش‌های بالاتر تشکیل لبه انباشته بسیار جدی‌تر و در نتیجه کیفیت سطح بدتر می‌شود.

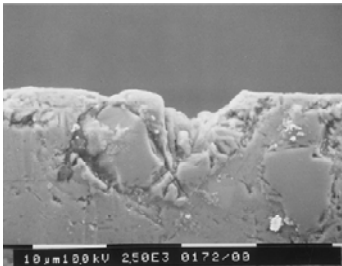
همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، بخش عمده خرابی ایجاد شده در سطح تمام شده ماده مرکب، به دلیل کنده شدن، شکسته شدن و یا به جا ماندن ذرات سخت SiC در زمینه آلومینیومی است. تراکم ذرات SiC در ماده مرکب به معنای وجود ذرات SiC بیشتر در واحد حجم ماده مرکب است. هرچه تعداد ذرات SiC بیشتر باشد، میزان جدایش آنها از زمینه بیشتر و ایجاد حفره‌ها افزون‌تر و به تبع آن سطح تمام شده ناصاف‌تر می‌شود.

۳-۳-۳- سایش ابزار

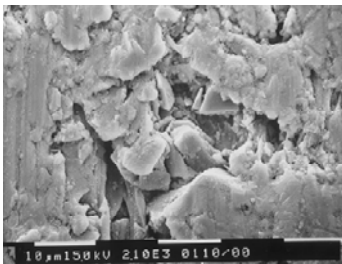
انواع سایش‌ها با مکانیزم‌های مختلف روی سطح ابزار حین ماشین کاری ایجاد می‌شود. اصلی‌ترین معیار سایش ابزار در تراشکاری، سایش سطح آزاد (سایش جانبی)^۱ است که ناشی از مکانیزم کلی سایش است. بنابراین در ماشین کاری ماده مرکب Al-15%SiC نیز سایش جانبی سطح ابزار به‌عنوان معیار سایش ابزار در نظر گرفته شده است.



(الف)

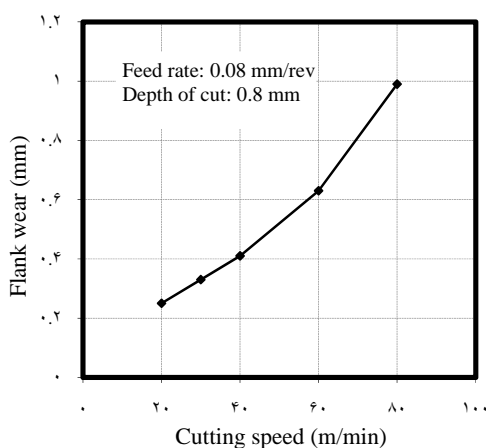


(ب)



(ج)

شکل (۱۶): تصویر میکروسکوپی سطح تمام شده (الف) ذرات به‌جا مانده SiC (ب) حفره‌های ایجاد شده از جدایش SiC (ج) ذرات شکسته شده SiC [۹].



شکل (۱۷): اثر سرعت ماشین کاری بر سایش ابزار نرخ پیشروی ۰/۰۸ mm/rev و عمق تراش ۰/۸ mm

۳-۳-۱- اثر سرعت ماشین کاری بر سایش ابزار

سایش ابزار برحسب سرعت ماشین کاری در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت ماشین کاری سایش ابزار نیز افزایش می‌یابد. تغییرات سایش ابزار برحسب سرعت ماشین کاری تقریباً خطی است، به‌طوری که وقتی سرعت ماشین کاری چهار برابر شده است، سایش ابزار نیز به‌همین مقدار افزایش پیدا کرده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، سایش ابزار با مشاهده ابزار تراش در زیر میکروسکوپ Mitotoyo TM 500 با استفاده از چشمی مدرج آن بعد از اتمام هرپاس از فرآیند تراشکاری اندازه‌گیری شده است.

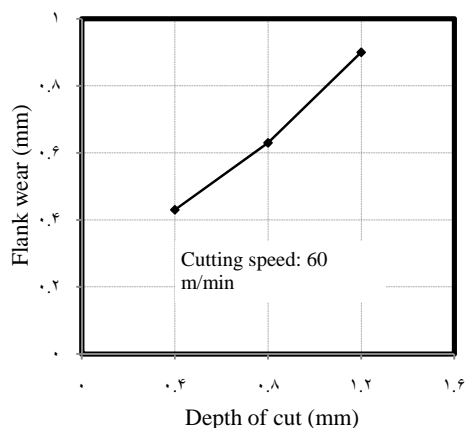
۳-۳-۲- اثر نرخ تغذیه بر سایش ابزار

در شکل ۱۸ تغییرات سایش ابزار برای سرعت پیشروی‌های مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش نرخ تغذیه، افزایش سایش ابزار را در پی داشته است. اما در مقایسه با سرعت ماشین کاری، نرخ تغذیه اثر کمتری بر سایش ابزار دارد.

با چهار برابر شدن نرخ پیشروی، سایش ابزار تقریباً دو برابر می‌شود. به‌عبارت دیگر تأثیر سرعت پیشروی بر سایش ابزار نصف تأثیر سرعت بر سایش ابزار است.

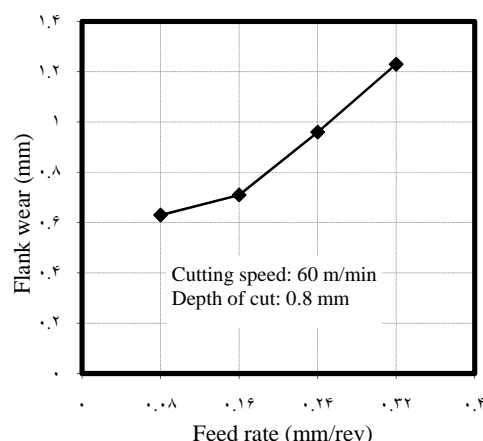
۳-۳-۳- اثر عمق تراش بر سایش ابزار

در شکل ۱۹ تغییرات سایش ابزار برحسب عمق تراش نشان داده شده است. همانند سرعت ماشین کاری و سرعت پیشروی، افزایش عمق تراش هم باعث افزایش سایش ابزار شده است.



شکل (۱۹): اثر عمق تراش بر سایش ابزار

سرعت ماشین کاری ۶۰ m/min و نرخ پیشروی ۰/۰۸ mm/rev



شکل (۱۸): اثر سرعت پیشروی بر سایش ابزار

سرعت ماشین کاری ۶۰ m/min و عمق تراش ۰/۸ mm

به روش اکستروژن پودر در این تحقیق بررسی شد. نیروهای ماشین کاری، کیفیت سطح و سایش ابزار به عنوان معیارهای قابلیت ماشین کاری در نظر گرفته شده است. تأثیر پارامترهای ماشین کاری بر این معیارها مورد بررسی قرار گرفت. از عملیات روتراشی با استفاده از ابزارهای کاربرد تیتانیوم در شرایط ماشین کاری خشک استفاده شد و نتایج زیر به دست آمده است:

۱- نیروهای محوری و مماسی در طول زمان ماشین کاری تغییرات محسوسی دارند و با گذشت زمان به تدریج افزایش می یابند. نیروی شعاعی در طول زمان ماشین کاری تغییرات ناچیزی دارد و با گذشت زمان افزایش قابل توجهی ندارد. بر خلاف نتایج حاصل از ماشین کاری مواد غیر مرکب، اختلاف نیروی مماسی از نیروی محوری ناچیز است. علت نزدیکی این دو نیرو به یکدیگر به خاطر ساختار ویژه این نوع ماده مرکب است. اما مقدار نیروی شعاعی نسبت به مقدار این دو نیرو بسیار کمتر است و نسبت به گذشت زمان نیز در مقدار آن تغییری حاصل نمی شود.

۲- افزایش سرعت ماشین کاری کاهش نیروهای مماسی و محوری را به دنبال دارد. اما افزایش سرعت پیشروی و عمق تراش باعث افزایش این نیروها می شود. البته در بین پارامترهای ماشین کاری تغییر نرخ تغذیه تأثیر کمتری بر نیروهای مماسی و محوری داشته است. نیروی شعاعی هم به تغییر سرعت برشی بیشترین حساسیت را دارد و با افزایش

مشاهده می شود که تغییرات سایش ابزار بر حسب عمق تراش نیز تقریباً به صورت خطی است. با مقایسه شکل های ۱۸ و ۱۹ می توان به این نتیجه رسید که عمق تراش در مقایسه با سرعت پیشروی اثر بیشتری روی سایش ابزار دارد. با مقایسه شکل های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مشاهده می شود که میزان سایش ابزار در ماشین کاری ماده مرکب مورد آزمایش که به روش متالورژی پودر ساخته شده است، از سایش ابزار در ماشین کاری نمونه ساخته شده به روش ریخته گری بیشتر است [۱]. به عنوان مثال در سرعت ماشین کاری ۶۰ m/min عمق تراش ۰/۸ mm و نرخ پیشروی ۰/۳ mm/rev در نمونه مورد آزمایش حاضر، میزان سایش ابزار تقریباً برابر با ۱/۲ میلی متر است. اما در همین شرایط و در نمونه ریخته گری شده برابر با ۰/۵ میلی متر است. یعنی میزان سایش آن بیش از ۲ برابر شده است. علت، همان تراکم و استحکام بالای ماده مرکب مورد آزمایش است که قبلاً نیز به آن اشاره شد.

عملیات بهینه سازی انجام شده توسط یوسفی و همکاران در خصوص تعیین شرایط بهینه پارامترهای ماشین کاری برای همین تحقیق نشان می دهد که با ماشین کاری در سرعت های متوسط و نرخ پیشروی و عمق تراش های پایین تر به سایش ابزار کمتر و سطح تمام شده بهتری می توان دست پیدا کرد [۱۴].

۴- نتیجه گیری

قابلیت ماشین کاری ماده مرکب Al-15%SiC ساخته شده

4. El-Gallab, M. Sklad, "Machining of Al/SiC Particulate Metal-matrix Composites. Part III. Comprehensive Tool Wear Models", J. Mater. Process. Tech., Vol. 101, No's. 1-3, pp. 10-20, 2000.
5. El-Gallab, M. Sklad, "Machining of Al/SiC Particulate Metal-matrix Composites. Part IV. Residual Stresses in the Machined Workpiece", J. Mater. Process. Tech., Vol. 152, No. 1, pp. 23-34, 2004.
6. Manna, A. and Bhattacharayya, B. "A Study on Machinability of Al/SiC-MMC", J. Mater. Process. Tech., Vol. 201, pp. 574-579, 2003.
7. Li, X. and Seah, W.K.H., "Tool Wear Acceleration in Relation to Workpiece Reinforcement Percentage in Cutting of Metal Matrix Composites", J. Wear, Vol. 247, No. 2, pp. 161-171, 2001.
8. Kainer, K.U. "Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.
9. El-Gallab, M. and Sklad, M. "Machining of Al:SiC Particulate Metal Matrix Composites Part II: Workpiece Surface Integrity", J. Materials Proc. Tech. Vol. 83, No's. 1-3, pp. 277-285, 1998.
10. Davim, J.P., Silva, J., and Baptista, A.M. "Experimental Cutting Model of Metal Matrix Composites (MMCs)", J. Materials Proc. Tech., Vol. 183, No's. 2-3, pp. 358-362, 2007.
11. Kannan, S., Kishawy, H.A., and Deiab, I. "Cutting Forces and TEM Analysis of the Generated Surface During Machining Metal Matrix Composites", J. Materials Proc. Tech., Vol. 209, No. 5, pp. 2260-2269, 2009.
12. Pramanik, A., Zhang, L.C., and Arsecularatne, J.A. "Machining of Metal Matrix Composites: Effect of Ceramic Particles on Residual Stress, Surface Roughness and Chip Formation", Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 48, No. 15, pp. 1613-1625, 2008.
13. Davim, J.P., and Baptista, A.M. "Relationship Between Cutting Force and PCD Cutting Tool Wear in Machining Silicon Carbide Reinforced Aluminum", J. Materials Proc. Tech., Vol. 103, No. 3, pp. 417-423, 2000.
14. Yousefi, R., Shafiee Motahar, M., Faghani, H. and Boroushak M., "Optimization of the Machinability of Powder Extruded Al-SiC MM Composite Using ANN Analysis and Genetic Algorithm", Proceeding of PM2010 World Congress, Florence Italy.

آن به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

۳- کیفیت سطح تمام شده با افزایش سرعت ماشین‌کاری بهبود یافته است. در مقابل با افزایش عمق تراش از کیفیت سطح به‌میزان قابل توجهی کاسته می‌شود. تأثیر سرعت پیشروی بر کیفیت سطح تمام شده در مقایسه با سرعت ماشین‌کاری و عمق برش کمتر است. اما در شرایط ثابت با افزایش نرخ پیشروی کیفیت سطح تمام شده بهبود می‌یابد و به بهترین کیفیت یعنی پایین‌ترین مقدار زبری سطح تمام شده در 0.16 mm/rev می‌رسد و باز با افزایش آن کیفیت سطح بدتر می‌شود.

۴- مهم‌ترین نوع سایش ابزار مشاهده شده در این تحقیق سایش سطح آزاد یا سطح جانبی است. با افزایش سرعت و عمق تراش سایش ابزار زیادتر شده است. افزایش نرخ تغذیه هم باعث افزایش سایش ابزار می‌شود، اما در مقایسه با سرعت و عمق برش تأثیر آن کمتر است.

۵- ماده مرکب تولید شده به کمک متالورژی پودر و اکستروود گرم برای استفاده در این پژوهش از تراکم و استحکام بالاتر و مقاومت به سایش بیشتری نسبت به ماده تولید شده به‌روش ریخته‌گری برخوردار است. بنابراین نیروهای ماشین‌کاری، زبری سطح تمام شده و سایش ابزار ایجاد شده در ماشین‌کاری این ماده، از موارد مشابه تولید شده به‌روش ریخته‌گری به مراتب بیشتر است.

۶- استفاده از سرعت‌های متوسط و نرخ پیشروی و عمق تراش‌های پایین‌تر در ماشین‌کاری این نوع ماده مرکب موجب کاهش سایش ابزار و بهبود سطح تمام شده می‌شود.

مراجع

1. Ozben, T., Kilickap, E., and Cakır, O. "Investigation of Mechanical and Machinability Properties of SiC Particle Reinforced Al-MMC", J. Mater. Process. Tech., Vol. 198, No's. 1-3, pp. 574-579, 2008.
2. Kilickap, E., Cakır, O., Aksoy, M., and Inan, A. "Study of Tool Wear and Surface Roughness in Machining of Homogenized SiCp Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites", J. Mater. Process. Tech., Vol's. 164-165, pp. 862-867, 2005.
3. El-Gallab, M. and Sklad, M. "Machining of Al/SiC Particulate Metal-matrix Composites. Part I. Tool Performance", J. Mater. Process. Tech., Vol. 83, No's. 1-3, pp. 151-158, 1998.