

ماشین کاری کامپوزیت فیبر شیشه‌ای مستحکم شده پلاستیک (plastic reinforced fibre glass) با استفاده از ابزاربرشی سرامیکی با زمینه آلومینا

M. Adam Khan*, A. Senthil Kumar

Department of Production Engineering, Sethu Institute of Technology,
Virudhunagar Dist., Tamil Nadu, India

Translated by:

M.mahdavi*, Sh.moghadam rad

چکیده

در این مقاله به ماشین کاری کامپوزیت GFRP پرداخته شده است. کامپوزیت GFRP در کارگاه با استفاده از فیبر *Eglass* همراه با رزین پلیستر اشباع نشده به وجود می‌آید. کامپوزیت مستحکم GFRP با کمک پروسه پیچاندن فیبرها آماده استفاده شده است. مطالعه ماشین کاری با استفاده از دو ابزار برشی آلومینا تقسیم‌بندی و طبقه بندی شده: $Ti[C,N]$ ابزار برشی ترکیب شده (cc650) و SiC رشته مستحکم شده ابزار برشی آلومینا (cc670). پروسه ماشین کاری در سرعت های برشی متفاوت و پیشروی و عمق براده برداری ثابت انجام شده است. عملکرد ابزار تراش آلومینا با اندازه گیری سایش ابزار تراش و اندازه گیری صافی سطح در اثر ماشینکاری GFRP سنجیده می شود. یک فرایند برای آنالیز سایش اصلی ابزار آلومینا در حین ماشینکاری کامپوزیت در نظر گرفته شده.

کلمات کلیدی: کامپوزیت، ماشین کاری، سایش، نیرو، iT ، CiS

مقدمه

مواد کامپوزیت GFRP تکامل یافته تا نیازهای صنعت نظیر استحکام کششی بالا به همراه وزن کم را تامین کند. مزیت های مواد GFRP شامل کاهش وزن، استحکام بالا، کاهش هزینه، قابلیت شکل دهی و عمر نسبتاً طولانی است. کامپوزیت های GFR در کاربرد های مهندسی و برای افزایش استحکام به کار می روند. فیبرهای E-glass به صورت گسترده به خاطر دربر داشتن مشخصات ویژه نظیر بالا بودن نرخ استحکام بر واحد حجم، پایداری مناسب قطری و مقاوم بودن به حرارت، سرما، رطوبت و سایش مورد استفاده قرار می گیرند. با توجه به این که تمامی مواد به درجه ای از ماشین کاری نیاز دارند، مواد کامپوزیتی هم از این مقوله مستثنا نیستند و بر روی آن ها انواع فرایندهای ماشین کاری نظیر برش، سوراخ کاری، سنباده کاری، حکاکی، آسیاب کردن و... با اهدافی از قبیل: ایجاد تیرانس دلخواه، آماده سازی سطح برای چسباندن، صیقلی کردن سطح قطعه می توان نام برد. ماشین کاری کامپوزیت ها در ظاهر شبیه ماشین کاری فلزات است اما به دلیل تفاوت ساختاری کامپوزیت ها و تشکیل شدن از لایه هایی با جنس های گوناگون، متفاوت است. در برش فلزات، مکانیزم براده برداری تغییر شکل پلاستیک است. ماده نرم تر از ابزار است، بنابراین براده روی براده از روی ابزار حرکت کرده و جدا می شود. اما در ماشین کاری کامپوزیت ها براده برداری بهتر است به صوت خرد شدن تعریف شود. در این فرایند به جای برش قطعه کار، لبه برشی فیبر های محکم کربن را می شکنند. لبه برشی تحت سایش قابل توجهی قرار می گیرد که به فرسایش سریع ابزار منجر می شود. از مشکلات دیگری که در ماشین کاری کامپوزیت ها وجود دارد، میتوان به موارد زیر اشاره کرد: گسستگی الیاف و تاثیر منفی آن در عملکرد قطعه، ماشین کاری الیاف را در معرض مواد شیمیایی و رطوبت قرار می دهد، در حین برش نباید درجه حرارت از دمای ذوب رزین بالا تر رود، ضریب هدایت حرارتی کم کامپوزیت، خنک کاری باید به گونه ای باشد که به مواد تشکیل دهنده کامپوزیت آسیب نرساند و به دلیل ساییده بودن کامپوزیت طول عمر ابزار کم و هزینه بالای ماشین کاری.



شکل 1 E-glass fibre reinforced composite rod.

جدول 1 Properties of E-glass fibre roving.

Material	Density (g/cm ³)	Tensile modulus ksi (GPa)	Tensile strength ksi (Mpa)	Tensile strain (%)
E-glass fibre roving (2400 m/kg)	2.6	11,000 (76)	500 (3450)	4.7

تحلیل نیروها نقش اساسی در مطالعه فرایند ماشین کاری مواد FRP داراست. به طور معمول مواد FRP غیر همسان و همچون مواد مستحکم شده ویژگی های ناهمسانگردی (anisotropic) را داراست. FRP شامل گروهی از فیبرهای تحمل کننده بار است، که باعث سخت شدن ماشین کاری می شوند [4-1].

ماشین کاری کامپوزیت فیبر شیشه هنوز به دلیل ساختار درونی و استحکام کششی بالا یک مشکل اساسی است [5]. فیبرهای مستحکم شده خیلی ساینده می باشند، بنابراین انتخاب دقیق پارامترهای ماشین کاری برای ماشین کاری عالیخیلی اهمیت دارد [6]. مکانیزم ماشین کاری PRFG کاملاً با فلزات متفاوت است [7-9]. به دلیل سایش زیاد در ماشین کاری این مواد، کاهش نرخ سایش از اهمیت زیادی برخوردار است [10]. کنترل کیفیت سطح، تنش های باقیمانده، و صافی سطح به دلیل آسیب های وارده به سطح سخت می باشد [11]. گزارش شده است که ماشین کاری PRFG مرتبط با تغییر شکل پلاستیک، تنش برشی، و شکست می باشد [12]. ساختار درونی ماده از جمله ویژگی های مهم به حساب می آید که بر روی ماشین کاری نیز تاثیر دارد [13-14]. با زاویه براده 90 درجه میزان سایش ابزار کاهش می آید [15]. مشاهده شده است که نیروی برشی و دمای ناحیه برشی بر عملکرد ماشین کاری کامپوزیت موثر است [16].

براین اساس نیروی برشی (تراش) یک متغیر وابسته مهم است که در بسیاری از تحقیقات اهمیت آن به اثبات رسیده است. نیروی برشی (تراش) مقادیر متفاوتی دارد که به کسر حجمی فیبرهای ترکیب و ساختار تشکیل آن بستگی دارد. در این مطالعه نیروی ماشین کاری، صافی سطح و سایش ابزار در ماشین کاری GFRP اندازه گیری شده است.

با توجه به مطالعات پیشین می توان دریافت که ابزارهای PCD، CBN و PcBN به طور عمده در ماشین کاری GFRP مورد استفاده قرار می گیرد. بدین علت مطالعه ماشین کاری GFRP متمرکز بر ابزار متشکل از ترکیب [Ti, C, N] و آلومینا و همچنین ابزار CiS رشته مستحکم شده آلومینا است. کامپوزیت GFRP با پلیستررزین غیر اشباع به همراه Eglass مستحکم شده آماده شده است.

روش کار

لوله کامپوزیتی GFRP در آزمایشگاه تهیه شده است. فیبر Eglass به علت خصوصیات منحصر به فرد آن انتخاب شده **جدول 1**، مشخصات آن در **جدول 2** آمده است. فیبر شیشه ای از حمام رزین غیر اشباع عبور کرده تا خیس شود و سپس فیبرها را با زاویه ساختاری 90 درجه به دور میله 15mm پیچیده میشوند. **شکل 1** میله فولادی که به دور آن کامپوزیت پیچیده شده و به مدت 2 ساعت مراقبت می شود تا به استحکام لازم برسد. میله با قطر 65mm و طول 400mm برش داده میشود تا بتوان آن را در دستگاه ماشین کاری قرار

داد. [شکل 2] تصویر میکروسکپ الکترونی از کامپوزیت را نمایش می دهد که در آن می توان غیر یکنواخت بودن کامپوزیت را مشاهده کرد.

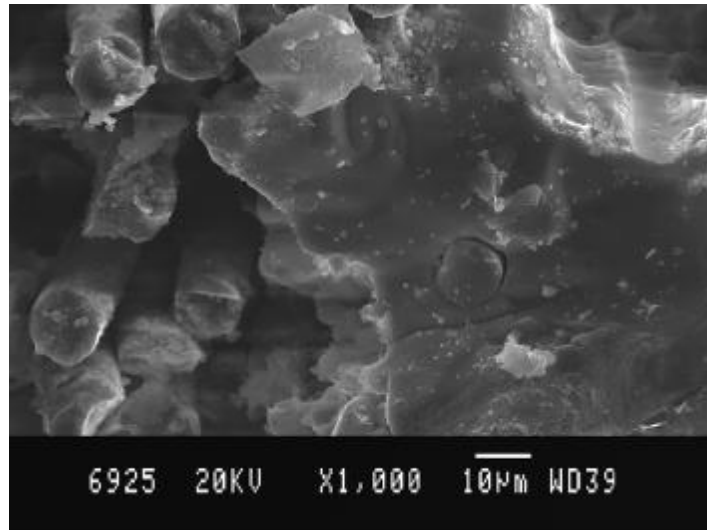
در **جدول 3** مشخصات ابزار های استفاده شده به همراه مواد تشکیل دهنده آن ها آمده است. در فرایند ماشین کاری پارامترهای عمق باربرداری و میزان پیشروی ثابت در نظر گرفته شده در حالی که از سرعت های مختلف برشی استفاده شده. در حین این فرایند میزان سایش ابزار و صافی سطح قطعه کار اندازه گیری می شود. برای اندازه گیری میزان سایش از میکروسکوپ جهت مشاهده میزان سایش استفاده می شود. اندازه گیری صافی سطح به وسیله دستگاه پروفایل سنج سطح TR200 که R_a را اندازه می گیرد انجام می شود. نیروهای ماشین کاری با کمک دستگاه دینامومتر مشخص می شود.

سایش ابزار آلومینا

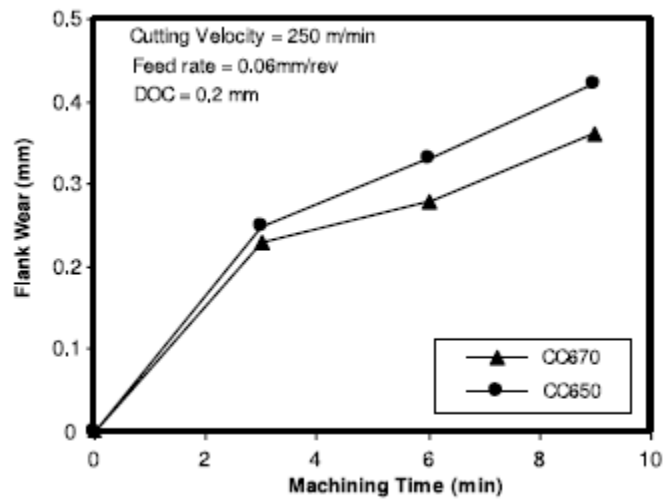
سایش ابزار یکی از مهم ترین پارامترها در ماشین کاری است، این موضوع به صورت مستقیم در کیفیت سطح، عمر ابزار و هزینه های ماشین کاری تاثیر دارد. سایش در ابزار بر اثر تماس بین ذرات سخت و مرکب کامپوزیت و سطح ابزار و جدا شدن قسمت هایی از ابزار اتفاق می افتد. در شکل **شکل 3** و **شکل 4** سایش ابزار با توجه به جنس آن ها و سرعتشان مشخص شده است. مکانیزم اصلی سایش ابزار فرسایشی است که در اثر تماس مقداری از رویه ابزار با ذرات ریز شکسته شده فیبرها در طول ماشین کاری، باعث فرسایش ابزار شده و حتی نفوذ براده به درون ابزار می شود. با افزایش سرعت برشی میزان فرسایش و نرخ شکسته شدن فیبرها افزایش می یابد در نتیجه طول عمر ابزار کاهش می یابد. بر اثر شکست فیبرها صدمات بسیار شدیدی به ابزار در اثر فرسایش وارد می شود که این خود نیز باعث افزایش نرخ سایش می شود. شکست فیبرها ترکیبی از نتیجه خمش و برخورد می باشد. **شکل 5** فیبر های شکسته شده.

جدول 2 Composition of E-glass fibre.

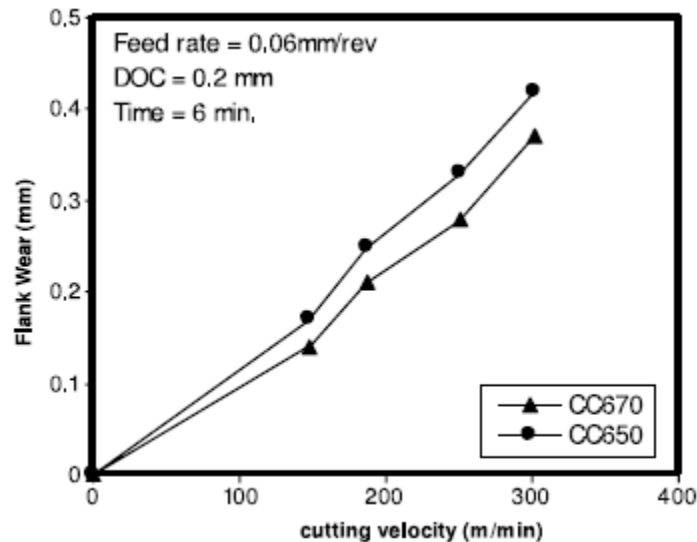
Composition	SiO ₂	AlO ₂	CaO	B ₂ O ₃
Content %	52%-56%	12%-16%	16%-25%	8%-13%



شکل 2 SEM micro graph of GFRP composite.



شکل 3 flank wear versus machining time of alumina cutting tools while machining GFRP composite.



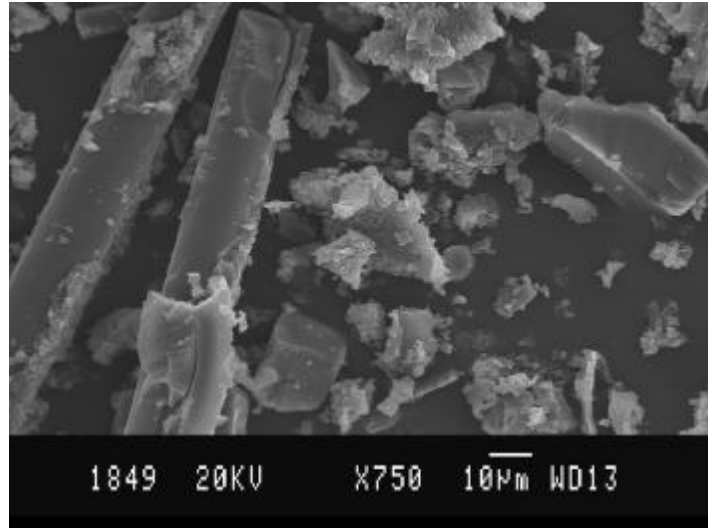
شکل 4 flank wear versus cutting velocity of alumina cutting tools while machining GFRP composite.

مشاهدات میکروسکوپی و مکانیزم سایش

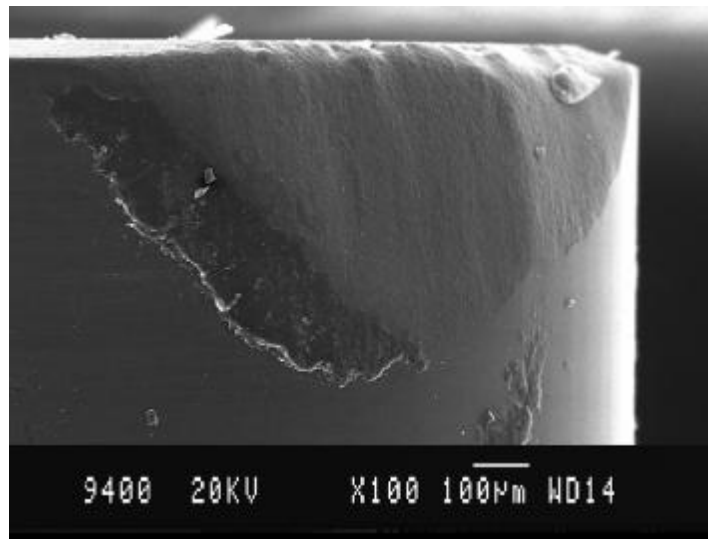
ماشین کاری GFRP با ماشین کاری فلزات متفاوت است. از عوامل موثر در ماشین کاری آن ها می توان به ساختار فیبر و هندسه ابزار اشاره کرد. در FRP برای ماشین کاری ترکیبی از شکست و تغییر شکل پلاستیک ناشی از تنش برشی اتفاق می افتد. در ماشین کاری فلزات بر لبه برشی به دلیل سایش، گودی ایجاد می شود در صورتی که برای ماشین کاری FRP لبه برشی بر اثر ذرات سخت کامپوزیت فرسایش می یابد. در ابزارهای ماشین کاری فلزات در ناحیه ای سایش اتفاق می افتد که ابزار سخت شده در حالی که در ابزار سرامیکی آلومینا ناحیه سایش، نرم می باشد که این بر اساس مشاهدات میکروسکپ الکترونی قابل تائید می باشد. **شکل 255*** شکل 6**. همچنین از شکل **شکل 7** قابل مشاهده است که ناحیه سایش در $Ti[C,N]$ بیشتر از SiC رشته مستحکم شده، می باشد. چسبندگی پلیمرها در کامپوزیت تاثیر زیادی در شکل گیری سایش ابزار ندارد بلکه علت اصلی فرسایش فیبرهای شیشه بر ابزار برشی است. بنابر مشاهدات بالا به این نتیجه میرسیم که ابزار SiC رشته مستحکم شده، مقاومت بهتری در برابر سایش نسبت به $Ti[C,N]$ از خود نشان می دهد.

جدول 3 The properties of the alumina-based ceramic cutting tool materials.

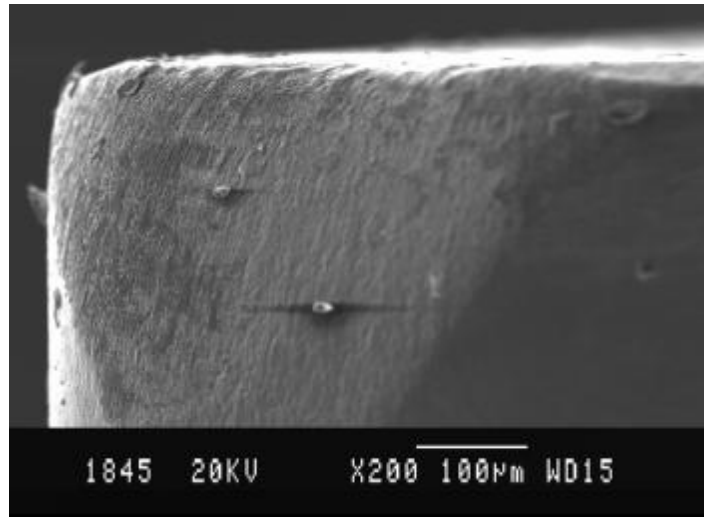
Details of tool material	Unit	Ti[C, N] mixed alumina (CC650)	SiC reinforced (CC670)	whisker alumina
Composition		Al ₂ O ₃ 70% TiN 22.5% TiC 7.5%	Al ₂ O ₃ 80% SiCw 20%	
Density	g/cm ³	4.26	3.74	
Vickers hardness	(HV10)	1800	2000	
Transverse rupture strength	MPa	550	900	
Young's Modulus	GPa	400	390	
Fracture toughness	MPa m ^{1/2}	4.0	8.0	
Thermal conductivity	W/mK	24	18	
Coefficient of thermal expansion	K ⁻¹ .10 ⁻⁶	8.6	6	



شکل 5 SEM micrograph of borosilicate glass fibre chip powder formed while machining GFRP composite with an alumina cutting tool.



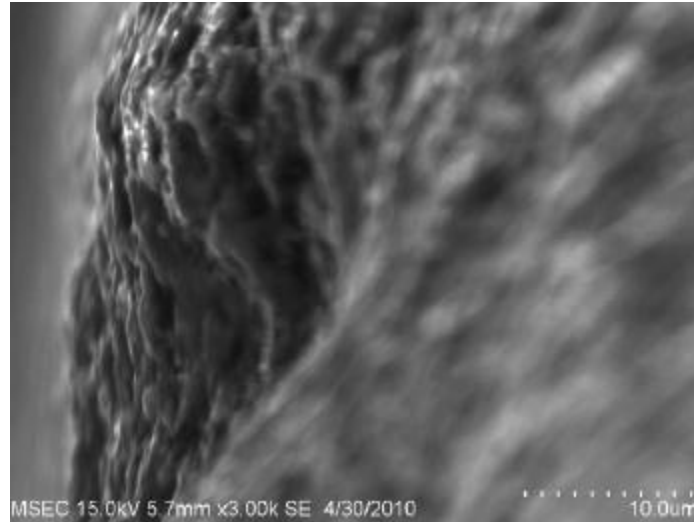
شکل 6 SEM micrograph of the SiC whisker reinforced alumina cutting tool edge(CC670).



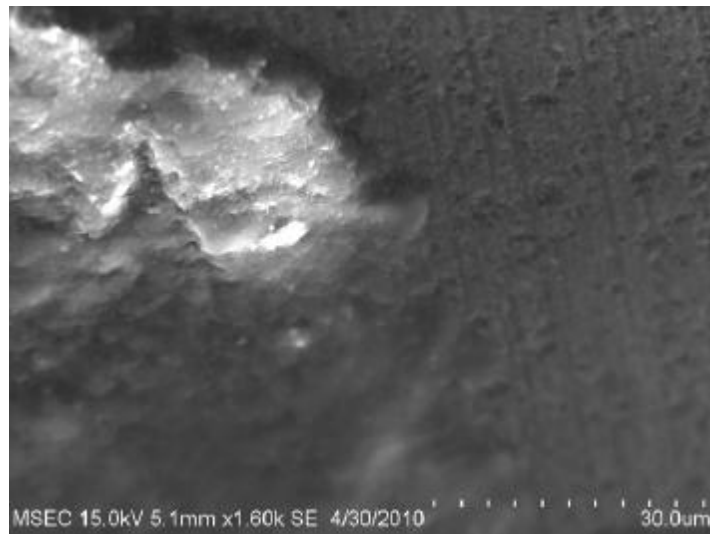
شکل 7 SEM micrograph of the Ti[C,N] mixed alumina-based ceramic cutting tool(CC650).

صافی سطح

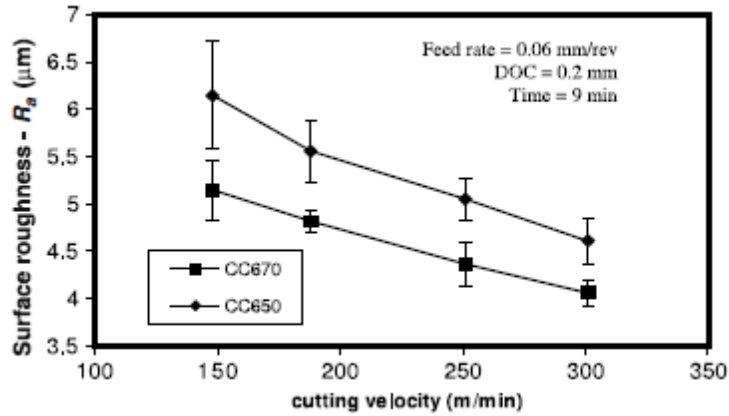
در ماشین کاری یکی از نکات کلیدی صافی سطح در انتهای کار می باشد. به طوری که نه براده با لبه انباشته تشکیل شده باشد و نه سطح نامطلوب با تلرانس پایین داشته باشیم. با توجه به داده‌های به دست آمده از آزمایشات متوجه می شویم که هر چه سرعت برشی را افزایش دهیم صافی سطح بهتر شده. این در حالی است که سرعت را تا مقدار محدودی می توان افزایش داد زیرا از یک مقدار مشخصی به بعد با افزایش سرعت، صافی سطح بدتر می شود. با افزایش سرعت نیز می توان احتمال تشکیل براده با لبه انباشته را نیز کم کرد. مزیت استفاده از ابزار برشی آلومینا در ماشین کاری GFRP صافی سطح بهتر نسبت به سایر ابزارهای برشی می باشد. مقایسه جنس مختلف ابزار را در کیفیت سطح نهایی در شکل 10 می بینیم. ناحیه سایش را در ابزار رشته ای مستحکم شده شکل 8 و همچنین ناحیه گود شده در اثر سایش شکل 9 زیر میکروسکوپ الکترونی قابل مشاهده است.



شکل 8 Ridges and grooves on the wear land of the SiC whisker reinforced alumina cutting tool while machining GFRP composite material.



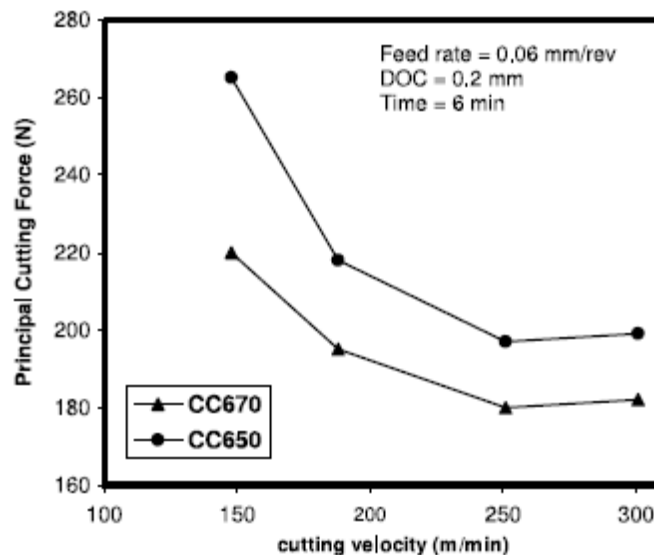
شکل 9 Bulk deposition of matrix material on the Ti[C, N] mixed alumina cutting tool while machining GFRP composite material.



شکل 10 Surface roughness versus cutting velocity after machining GFRP composite material with alumina cutting tool for 9 min.

نیروی ماشین کاری

نیروی ماشین کاری ناشی از لغزیدن براده و یا ماده قطعه کار بر روی ابزار برش است که هر چه بتوان این نیروی اصطکاک را کم کرد نیروی ماشین کاری کمتر است. نیروی ماشین کاری به عواملی نظیر جنس قطعه کار، زاویه براده، سرعت برشی بستگی دارد. با افزایش سرعت برشی نیرو کاهش می یابد شکل 11 و از سرعت مشخصی به بعد نیروها افزایش می یابد.



شکل 11 Principal cutting force versus cutting velocity of alumina cutting tools while machining GFRP composite at 6 min.

هندسه ابزار برش، جنس ابزار و شرایط ماشینکاری در نیروی برشکاری دخیل هستند، که باعث بدتر شدن سطح میشوند. در حضور فیبر شیشه ای با (رفتار شکننده) سطح تماس کاهش یافت و نیروی کم برش را ارتقا میدهد. دو مکانیزم عمده نیروی برش را در ماشینکاری کامپوزیت های FRP نمایش میدهند: برش در جهت عمودی و کمانش در جهت موازی. در این مقاله ابزار برش سرامیکی با بیس آلومینا استفاده شده است. برای ماشینکاری کامپوزیت GFRP با زاویه راستای فیبر 90 درجه جهت ابزار برش عمود بر جهت فیبرها خواهد بود و مکانیزم برش حاکم است. نیروی برش توسط دینامومتر دستگاه تراش در شرایطی که ماشینکاری GFRP با ابزار برش آلومینی در نرخ پیشروی ثابت 0.06mm/ver و عمق برش 0.2mm انجام میشود، اندازه گیری میشود. به ترتیب در شکل 10 نمایش داده شده. نیروی برشی اصلی ماکزیمم در جهت سرعت برش رخ میدهد. عموماً نیروی برش در هیچ جهت خاصی نمایش داده نمی شود در حالی که نیروی برش نوسانی به علت ماشینکاری سخت فرسایشی فیبرها و نرم ماتریکس در یک سیکل ظاهر می شود.

از اینرو پیش بینی نیروی برش در ماشینکاری GFRP ها سخت خواهد بود. نیروی اصلی برشی که در ماشینکاری کامپوزیت های GFRP به دست می آیند به طور قابل ملاحظه ای از ماشینکاری فولادها کمتر هستند.

این به علت تفاوت در ترکیب مواد GFRP ها، ذات بی شکل و شرایط نرم ماده ماتریکس است.

اگر قطر فیبر خیلی کوچک باشد خم کردن (زیاد) فیبرهای فرساینده به فشار زیادی از لبه ابزار برش نیازی ندارد.

به طور کلی ابزار برشی سرامیکی با بیس آلومینا با زاویه شیب + و بدون شکاف ، موثرترین ابزار در کاهش نیروی برش در ماشینکاری کامپوزیتهای با بیس e-glass/ polyester است.

در ماشینکاری کامپوزیتهای GFRP ، ابزار برش آلومینی با ترکیب Ti(C,N) نیروی برشی بیشتری (265N) را در سرعت برش 150 m/min نسبت به ابزار برش آلومینی با رشتهای مستحکم شده SIC (220 N) با همان شرایط برش را دارد.

در ابتدا نیروی برشی بطور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد در حالی که سرعت برشکاری افزایش می یابد. با این حال نیروی برشی تمایل دارد در سرعتهای برش بالای 250 m/min افزایش یابد. کاهش اولیه در نیروی برش با توجه به سرعت برش به علت کاهش در تماس شیار و افزایش ناحیه برش ، منجر به کاهش استحکام برشی در قطعه کار می شود.

اگر سرعت برش افزایش یابد ، سایش ابزار هم افزایش می یابد و کار سختی در قطعه کار رخ میدهد. افزایش سایش در ابزار برش قطعه کار را برای ابزار مشکل خواهد کرد.

از این رو نیروی برشی تمایل دارد در سرعت‌های برش بالا افزایش یابد. همچنین وجود اجزای فرسایشی باعث نوسان در نیروی برشی می‌شود.

نتیجه‌گیری:

توانایی ماشینکاری کامپوزیت GFRP با استفاده از ابزار برشی آلومینی مورد بررسی قرار گرفت. هر دو ابزار برش با توجه به سرعت برش دچار فرسایش میشوند.

خوردگی سایشی کاملاً آهسته و کم‌درآزار با رشته‌های مستحکم شده آلومینی SIC نسبت به ابزار آلومینی مرکب TI(C,N) رخ میدهد.

تفاوت در مقدار صافی سطح که به آن اشاره شد به علت تفاوت ذاتی صافی سطح در ماتریکس و فیبرهاست.

ابزار برش با رشته‌های مستحکم شده آلومینی SIC سطح پایانی بهتری نسبت به آلومینی مرکب TI(C,N) دارند. در نتیجه عملکرد رشته‌های مستحکم شده آلومینی بهتر از مرکب است.

[1] Komanduri R. Machining of fibre reinforced composite. *Machining Science & Technology* 1997;1(1):113–52.

[2] Smith WilliamF, Hashemi Javad. *Foundation of materials science and engineering*. forth ed. NY: Mc-Graw Hill International Edition; 2006.

[3] Agarwal BhagwanD, Broutman LawrenceJ. *Analysis and performance of fibre composites*. second ed. USA: A Wiley-Interscience Publications; 2000.

[4] Jones RobertM. *Mechanics of composite materials*. second ed. Taylor & Francis Inc.; 1999.

[5] Jain VK, Choudhury SK, Ramesh KM. On the machining of alumina and glass. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2002;42:1269–76.

[6] Paulo Davim J, Silva LeonardoR, Festas Antnio, Abramo AM. Machinability study on precision turning of PA66 polyamide with and without glass fiber reinforcing. *Materials and Design* 2009;30:228–34.

[7] Palanikumar K. Application of Taguchi and response surface methodologies for surface roughness in machining glass fibre reinforced plastics by PCD tooling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2008;36(1–2): 19–27.

[8] Geier MH. *Quality handbook for composite materials*. Chapman & Hall Publications; 1994.

[9] Lee ES. Precision machining of glass fibre reinforced plastics with respect to tool characteristics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2001;17:791–8.

[10] Palanikumar K, Paulo Davim J. Assessment of some factors influencing tool wear on the machining of glass fibre-reinforced plastics by coated cemented

- carbide tools. *Journal of Materials Processing Technology* 2009;209:511–9.
- [11] Zhang LC. Cutting composites: a discussion on mechanics modeling. *Journal of Materials Processing Technology* 2009;209:4548–52.
- [12] Santhanakrishnan G, Krishnamurthy R, Malhotra SK. High speed tool wear studies in machining of glass fibre reinforced plastic. *Wear* 1989;132:327–36.
- [13] Bhatnagar N, Ramakrishnan N, Naik NK, Komanduri R. On the machining of fibre reinforced plastic (FRP) composite laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 1995;35(5):701–16.
- [14] Venu Gopala Roa G, Mahajan Puneet, Bhatnagar Naresh. Machining of UD–GFRP composites chip formation mechanism. *Composites Science and Technology* 2007;67:2271–81.
- [15] Sharma M, Rao IM, Bijwe J. Influence of orientation of long fibers in carbon fiber–polyetherimide composites on mechanical and tribological properties. *Wear* 2009;267:839–45.
- [16] Sreejith PS, Krishnamurthy R, Malhotra SK. Effect of specific cutting pressure and temperature during machining of carbon/phenolic ablative composite using PCBN tools. *Journal of Materials Processing Technology* 2007;183:88–95.