نشریه مهندسی مکانیک
نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISME

دوره ۳۲، شماره ۶، شماره پیاپی ۱۵۳، بهمن و اسفند ۱۴۰۲، صفحه ۴۸-۳۵
ISSN: 1605-9719
DOI: https://doi.org/10.30506/mmep.2023.2001374.2087

مروری بر پارامترهای مؤثر در ماشین کاری کامپوزیت های زمینه فلزی

امین سوسن‌آبادی فراهانی
دانشجوی دکتری

مهدی مدبری‌فر*
دانشیار

معین طاهری
دانشیار

محمدرضا شیخ الاسلامی بورقانی
استادیار،
گروه مهندسی ساخت و تولید،
دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه اراک، اراک

مقاله مروری
دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۴
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۲۶
پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹

چکیده: امروزه به علت نیاز روزافزون صنایع مختلف نظامی، هوافضا، خودروسازی و ... به مواد با نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت خوب در مقابل سایش و خستگی و ... استفاده از مواد کامپوزیتی، به‌خصوص کامپوزیت های پایه فلزی به صورت چشمگیری افزایش یافته است. ماشین کاری جهت نیل به‌دقت ابعادی بالا جزء جدایی ناپذیر فرآیند تولید محصولات ساخته شده با کامپوزیت های پایه فلزی می باشد. به دلیل وجود ماده تقویت کننده همچون کاربید سیلیسیوم و ... ماشین‌کاری این دسته از مواد همواره با چالش‌های فراوانی ازجمله سایش ابزار، افزایش نیروهای ماشین‌کاری، کاهش کیفیت سطح و ... روبه‌رو می‌گردد. لذا مطالعه پارامترهای مؤثر بر ماشین کاری کامپوزیت های زمینه فلزی امری ضروری و اجتناب ناپذیر می باشد. مطالعات زیادی در این حوزه توسط پژوهشگران مختلف صورت پذیرفته است. در این مقاله تلاش شده است با بررسی مهم ترین مقالات منتشر شده در این حوزه، اطلاعات جامع و درعین حال خلاصه وار از عوامل تأثیرگذار در فرآیندهای سنتی ماشین کاری از قبیل تراش کاری، فرزکاری و ... یا فرآیندهای غیر سنتی ماشین کاری همچون تخلیه الکتریکی، ماشین کاری الکتروشیمیایی و ... در اختیار خوانندگان قرار گیرد. همچنین نحوه عملکرد انواع ابزار مختلف در هنگام ماشین کاری کامپوزیت های زمینه فلزی بررسی شد. در پایان به خلاء های موجود و موضوعات جدید و قابل مطالعه برای محققان اشاره شد.

واژه‌های راهنما: کامپوزیت های زمینه فلزی، ماشین کاری، زبری سطح، عمر ابزار، تراش کاری

A review of effective parameters in the machining of metal matrix composites

Amin Sousanabadi Farahani
PhD Student

Mehdi Modabbarifar*
Associate Professor

Moein Taheri
Associate Professor

Mohammad Reza Sheykholeslami Borghani
Assistant Professor,
Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak

Abstract: Nowadays, due to the increasing need of various military, aerospace, automotive, etc. industries for materials with high strength-to-weight ratio, good resistance to wear and fatigue, etc. the use of composite materials, especially metal-based composites, has increased significantly. Machining to achieve high dimensional accuracy is an integral part of the production process of products made with metal-based composites. Due to the presence of reinforcing materials such as silicon carbide, etc. the machining of this category of materials always faces many challenges, including tool wear, increased machining forces, decreased surface quality, etc. Therefore, it is to study the parameters affecting the machining of metal composites. Many studies have been done in this field by different researchers. In this article, by reviewing the most important articles published in this field, comprehensive and at the same time summary information on the influencing factors in conventional machining processes such as turning, milling, etc. or non- conventional machining processes such as electrical discharge, electrochemical machining, etc. has been tried to be available to the readers. Also, the performance of different types of tools during the machining of metal composites was investigated. In the end, the existing gaps and new and studyable topics for researchers were pointed out.

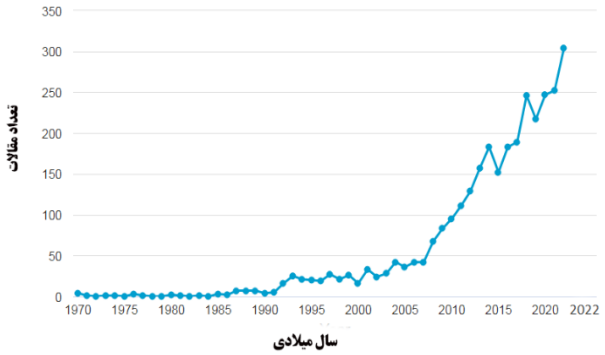
Keywords: Metal matrix composite, Machining, Surface roughness, Tool Life, Lathing

*نویسنده مسئول، m-modabberifar@araku.ac.ir

۱- مقدمه

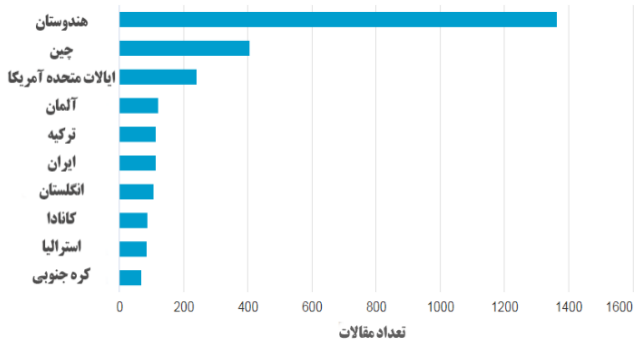
مطالعات در زمینهٔ توسعه علم مواد به سمت ارائه و معرفی مواد مهندسی سبک که دارای نسبت استحکام به وزن بالا، سختی قابل‌قبول در دماهای بالا، خزش مناسب و مقاومت سایشی و خستگی مطلوب باشند در حال حرکت است. فن‌آوری‌های پیشرفتهٔ خودروسازی و هوافضا به چنین خصوصیاتی برای مواد نیاز دارند تا کارایی تولیدات خود را افزایش دهند. این ویژگی‌ها با آلیاژهای تیتانیم، آلومینیوم و منیزیم قابل‌دستیابی نیست[۱]. درنتیجه طراحان گونه‌های جدیدی از کامپوزیت‌ها نظیر پلاستیک‌های تقویت‌شده با فیبر[1]، کامپوزیت‌ها با زمینهٔ فلزی[2] و کامپوزیت‌ها با زمینه سرامیکی[3] را معرفی کرده‌اند. کامپوزیت‌های زمینه فلزی به خاطر دارا بودن نسبت استحکام به وزن بالایی که دارند قابل‌استفاده در دماها و نیروهای نسبتاً بالا می‌باشند. چگالی اغلب این کامپوزیت‌ها تقریباً یک‌سوم چگالی فولاد بوده که منجر به نسبت استحکام به وزن ویژهٔ بالا و سختی قابل‌قبول برای این مواد شده است[۲]. کامپوزیت‌های زمینه فلزی کاربردهای متنوعی در صنعت دارند ازجمله کاربرد در صنایع هوافضا (برای دماغهٔ مدارگرد شاتل فضایی و مقطع عمودی در دم جنگنده‌های پیشرفته)، بخش‌های مختلف صنعت خودروسازی (پیستون، بوش‌های سیلندر و لنت‌های ترمز)، تجهیزات ورزشی و دریایی. آلیاژهای آلومینیم تقویت‌شده با کاربید سیلیکون نسبتاً جدید بوده و موادی باقابلیت ساختاری مفید همراه با استحکام ویژهٔ بالا و مقادیر استاندارد قابل‌قبول هستند[۳]. ماشین‌کاری کامپوزیت‌های پایه فلزی به خاطر وجود دو یا بیشتر فاز مشخص که یکی از آن‌ها بسیار ساینده بوده و همچنین به خاطر اختلاف قابل ملاحظهٔ بین دو مادهٔ تشکیل‌دهنده یعنی مادهٔ تقویت کنندهٔ سرامیکی سخت و زمینهٔ فلزی شکننده کار بسیار مشکلی خواهد بود. به همین دلیل، تلاش‌هایی برای ساخت کامپوزیت زمینه فلزی نزدیک به شکل نهایی انجام شده است. به‌هرحال چنین بخش‌هایی همواره باید برای تطبیق با نیازهای طراحی نهایی، ماشین‌کاری شوند. به دلیل افزایش کاربرد کامپوزیت‌های زمینه فلزی در صنعت و نیاز به حصول درک صحیح از رفتار پارامترهای مؤثر بر ماشین‌کاری آن محققان فعال در حوزه ماشین‌کاری تمرکز نسبتاً زیادی بر روی این دست مواد داشته‌اند.

نمودار (۱) رشد افزون تعداد مقالات در این زمینه را نشان می‌دهد.



شکل ۱ تعداد مقالات چاپ‌شده تا سال ۲۰۲۲ بر اساس گزارش پایگاه استنادی اسکوپوس

همان‌طور که از نمودار (۲) مشخص است، کشورهای صاحب صنعت نظیر چین، ایالات‌متحده آمریکا، آلمان و ... بر روی مطالعه ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی سرمایه‌گذاری خوبی انجام داده‌اند. این امر خود می‌تواند نشان‌دهنده اهمیت این موضوع باشد.



نمودار ۲ تعداد مقالات چاپ‌شده ۱۰ کشور اول فعال در حوزه ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی تا سال ۲۰۲۳ بر اساس گزارش پایگاه استنادی اسکوپوس

در این مقاله سعی بر این شده است مروری کلی بر پارامترهای مؤثر بر ماشین‌کاری کامپوزیت‌های پایه فلزی انجام شود. برای درک صحیح‌تر رفتار این مواد فرآیندهای ماشین‌کاری سنتی از قبیل تراش‌کاری، فرزکاری، سوراخ‌کاری و سنگ‌زنی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین ازآنجاکه در بسیاری از موارد فرآیندهای سنتی پاسخگوی نیازهای ما نیستند روش‌های ماشین‌کاری غیر سنتی مانند تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری الکتروشیمیایی، ماشین‌کاری لیزری و آلتراسونیک نیز به‌صورت خلاصه بررسی شد.

[1] Fiber Reinforced Polymer (FRP)
[2] Metal matrix composite (MMC)
[3] Ceramic Matrix composite (CMC)

به دلیل آنکه انتخاب ابزار و عوامل مؤثر بر آن در هنگام ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی یک چالش بزرگ می‌باشد. بخش جداگانه‌ای برای ابزارهای مورداستفاده در هنگام ماشین‌کاری سنتی این مواد در مقاله گنجانده شد.

در پایان به خلاء های موجود در این حوزه اشاره شده و پیشنهادهایی برای مطالعات آینده جهت استفاده هر چه بهتر محققان ارائه گردید.

۲- ماشین‌کاری سنتی کامپوزیت‌های پایه فلزی

به‌مانند سایر محصولات فلزی، برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌های فلزی ترجیح بر آن است که از فرآیندهای سنتی نظیر تراش‌کاری، فرزکاری سوراخ زنی و ... نسبت به سایر فرآیندهای غیر سنتی استفاده شود. به دلیل وجود ذرات سخت تقویت‌کننده در ماده زمینه کامپوزیت‌ها، شناخت دقیق عوامل مؤثر بر پارامترهای ورودی و خروجی در ماشین‌کاری سنتی این مواد کاری مشکل و دشوار است. به‌منظور دست‌یابی به راه‌حلی جامع برای در این خصوص مطالعات بسیاری توسط محققان صورت پذیرفته است[۴].

۲-۱- تراش‌کاری

تراش‌کاری متداول‌ترین فرآیند ماشین‌کاری برای تولید محصولات صنعتی است. این فرآیند برای دستیابی به اندازه و شکل نهایی در مرحله پرداخت‌کاری یا آماده‌سازی برای سایر فرآیندهای تولید محصولات مدور استفاده می‌شود. مطالعات زیادی توسط محققان در مورد ابعاد مختلف پارامترهای مؤثر بر تراش‌کاری کامپوزیت زمینه فلزی انجام شده است. این مطالعات نشان می‌دهند که بیشتر عواملی که بر تراش‌کاری این مواد تأثیر می‌گذارند، عمدتاً به نوع ماده کامپوزیتی وابسته است. نیروی برشی به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم سایش ابزار در فرآیند ماشین‌کاری شناخته می‌شود. بسیاری از محققین به‌طور تجربی تأثیر نیروی برشی بر سایش ابزار را بررسی کرده‌اند [۵].

دیویم و همکاران رابطه بین سایش ابزار و نیروی برش ابزار PCD را در حین تراش‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی بررسی کردند. با افزایش نیروهای ماشین‌کاری به علت به وجود آمدن ارتعاش در نوک ابزار سایش به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. همچنین افزایش سایش ابزار در سرعت برش بالاتر مشاهده می‌شود [۶]. عمق برش و نرخ تغذیه تأثیر زیادی بر نیروهای برش و کیفیت سطح دارند. افزایش معینی در مقدار عمق برش و نرخ تغذیه، سایش ابزار را افزایش و کیفیت سطح را کاهش می‌دهد. کیفیت سطح نهایی نیز تحت تأثیر جنس ابزار مورداستفاده قرار می‌گیرد[۷].

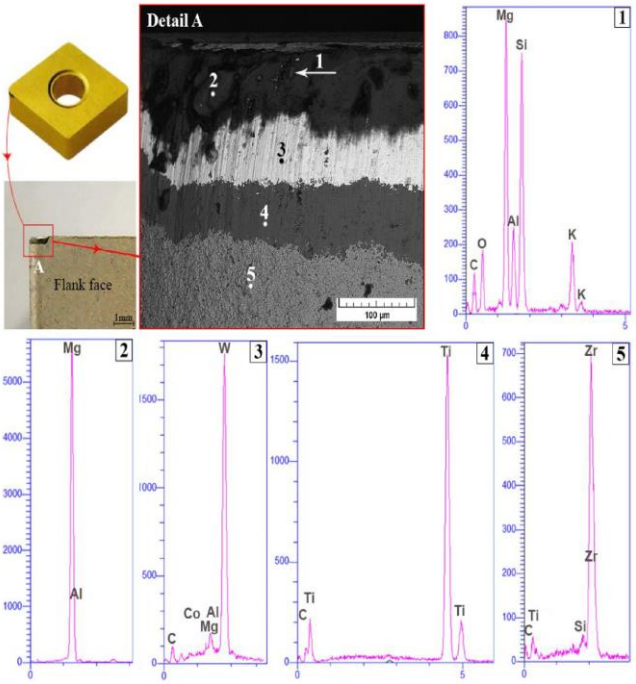
طهماسبی و همکاران گزارش کردند در عمق برش بالا(تقریباً ۱ میلی‌متر)، ابزار در معرض نیروهای برشی بالا با بارگذاری حرارتی و مکانیکی بالا قرار می‌گیرد که منجر به شکستگی یا سایش جانبی ابزار می‌شود. در تراشکاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی با افزایش نرخ پیشروی با توجه به دلیل افزایش اصطکاک بین ابزار و سطح براده و همچنین افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته زبری سطح ماشین‌کاری شده افزایش پیدا کرده و کیفیت سطح نهایی پایین می‌آید ولی از طرفی با افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته و تبدیل نوع ماشین‌کاری از پرداخت‌کاری به خشن تراشی حجم براده برداری افزایش یافته و راندمان تولید بیشتر خواهد شد[۸]. سرعت برش همراه با کسر حجمی و اندازه ذرات تقویت‌کننده از عوامل مؤثر بر سایش ابزار هستند. در بعضی از گزارش‌ها ابزارهای پوشش داده شده عمر ابزار بیشتری را در برابر ابزارهای بدون روکش دارند. از طرف دیگر، کیفیت سطح ابزارهای بدون پوشش در مقایسه با ابزارهای پوشش داده شده به‌ویژه در سرعت برش پایین، بهتر است[۹]. مواد ابزار باید سخت‌تر از ذرات تقویت‌کننده کامپوزیت باشند، زیرا درصورتی‌که سختی ذرات تقویت‌کننده از ابزار بیشتر باشد به‌جای برداشت ماده از قطعه کار، ذرات تقویت‌کننده بر روی ابزار خراش ایجاد کرده و باعث کاهش عمر ابزار می‌شوند.

از مطالعات، همچنین به نظر می‌رسد که کاربید تنگستن[1] ، ابزار الماس پلی کریستالی[2]، نیترید بور مکعبی [3]و ابزار کاربید پوشش داده شده با الماس در ماشین‌کاری مواد کامپوزیت خوب هستند و می‌توانند پرداخت سطحی و عمر ابزار مطلوب را محقق کنند [۱۰]. با توجه به اینکه، عمدتاً، از ابزار دارای پوشش استفاده می‌شود. سایش، مکانیزم اصلی برای تخصیص عمر ابزار در نظر گرفته می‌شود.

انتخاب ابزار مناسب برای ماشین‌کاری این کامپوزیت‌ها بسیار دشوار است. در بسیاری از مقالات، گزارش شده است که ابزار برش PCD برای تراش‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی مناسب‌تر است. این به دلیل خواص شیمیایی و فیزیکی قوی PCD برای فرآیند ماشین‌کاری است. ابزارهای PCD به اندازه

[1] Tungsten carbide (WC)
[2] Polycrystalline Diamond (PCD)
[3] Cubic Boron Nitride (CBN)

کافی سخت هستند و از نظر شیمیایی با مواد زمینه واکنش نمی‌دهند[۱۱]. به علت بالا بودن عمر ابزار PCD در هنگام ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها می‌توان از سرعت‌های برش بالاتر استفاده نمود. این امر منجر به حصول کیفیت سطح ماشین‌کاری شده بهتر می‌شود[۱۲].



شکل ۳ آنالیز EDS سطح ساییده شده در هنگام ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه منیزیمی[۱۳]

شکل (۳) آنالیز EDS سطح ساییده شده در هنگام ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه منیزیمی با استفاده از ابزار کاربیدی پوشش‌دار را نشان می‌دهد. مطابق با این تصویر در هنگام ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه منیزیمی به دلیل ماهیت نرم زمینه منیزیم، بخش زیادی از ماده زمینه بر روی لبه برنده ابزار می‌نشیند. همچنین به‌وضوح مشخص است به علت وجود سایش شدید در هنگام ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها لایه‌های موجود بر روی سطح جانبی اینسرت مورداستفاده از بین رفته است[۱۳].

۲-۲- فرزکاری

فرزکاری یکی از روش‌های ماشین‌کاری قطعات است که به‌طور گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. تاکنون مطالعات بسیار زیادی در حوزه فرزکاری مواد کامپوزیت زمینه فلزی انجام شده است.

اوزبن و همکاران [۱۴] تأثیر پارامترهای فرآیند را در خصوص نسبت تقویت‌کننده کامپوزیت زمینه فلزی بر خواص مکانیکی مورد مطالعه قرار داده‌اند. مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که افزایش نسبت ذرات تقویت‌کننده خواص بسیار خوبی مانند استحکام کششی، چقرمگی و سختی ایجاد می‌کند، اما از طرف دیگر در فرآیند ماشین‌کاری، سایش ابزار و زبری سطح بیشتری اتفاق خواهد افتاد.

علیپور و همکاران[۱۵] گزارش کردند که در فرزکاری، نرخ تغذیه اصلی‌ترین پارامتر برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی در نظر گرفته می‌شود. نرخ تغذیه بالاتر تشکیل لبه انباشته‌شده[1] را ایجاد می‌کند. هانگ سون و همکاران [۱۶] مشاهده کردند که نیروی برش با نرخ تغذیه و عمق برش افزایش و با افزایش سرعت برش کاهش می‌یابد. کیفیت سطح با افزایش عمق برش و نرخ تغذیه دچار کاهش خواهد شد. بااین‌حال، کیفیت سطح مناسب با افزایش سرعت برش به دست می‌آید.

طهماسبی و همکاران [۱۷] فرآیند ماشین‌کاری مواد Al/SiCp را در عملیات فرز انگشتی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند سرعت برش و سرعت تغذیه بیشترین تأثیر را بر کیفیت سطح دارند، درحالی‌که عمق برش تأثیر ناچیزی بر زبری سطح دارد. همچنین توسط چندین محقق گزارش شده است که نرخ تغذیه به‌طورجدی بر سایش ابزار در فرزکاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی تأثیر می‌گذارد[۱۸-۲۰].

مطابق با مطالعات صورت پذیرفته توسط طهماسبی و همکاران با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده، میزان سایش ابزار به‌صورت نسبتاً خطی افزایش می‌یابد. با توجه به خاصیت سایشی شدید ذرات Sic، با افزایش ذرات تقویت‌کننده در ماده زمینه سایش بسیار شدیدی بین ذرات تقویت‌کننده و سطح جانبی ابزار رخ خواهد داد که سبب کاهش عمر ابزار خواهد گردید. همچنین آن‌ها گزارش کردند با افزایش سرعت دوران اسپیندل، سایش ابزار افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت برشی اصطکاک بین ابزار و قطعه کار و همچنین دمای ناحیه برش بیشتر شده که امکان افزایش سایش ابزار را بیشتر می‌کند. علاوه بر این با افزایش سرعت برشی تمایل تشکیل لبه انباشته بر روی لبه‌ی برشی ابزار کاهش می‌یابد. اگرچه لبه‌ی انباشته باعث افت کیفیت سطح نهایی قطعه کار شده ولی در بحث عمر ابزار کمک قابل‌توجهی به افزایش عمر ابزار می‌کند. با افزایش سرعت برشی مواد قطعه کار چسبیده شده بر روی لبه‌ی ابزار به‌طور مداوم از لبه ابزار جداشده و مجدداً می‌چسبند که این امر باعث سایش

[1] Built-up edge (BUE)

ابزار و یا حتی لب پر شدن بخشی از ابزار شود[۲۱]. در فرزکاری این مواد، ابزار PCD عمر بیشتری را ارائه می‌دهد. ابزارهای برشی کاربیدی با پوشش و بدون پوشش و همچنین CVD خیلی مؤثر نیستند. آن‌ها عمر ابزار کمتری نسبت به PCD دارند[۲۲].

۲-۳- سوراخ‌کاری

سوراخ‌کاری یک عملیات ماشین‌کاری است که از مته برای ایجاد سوراخ مقطع دایره‌ای شکل در ماده استفاده می‌کند. مته با اعمال نیرو به همراه سرعت دورانی مناسب وارد قطعه می‌شود. تحقیقات زیادی برای بررسی پارامترهای مؤثر بر فرآیند و ابزارهای برشی مورد استفاده برای عملیات سوراخ‌کاری انجام شده است[۲۳].

هوانگ و همکاران [۲۴] گزارش دادند که عملکرد سوراخ‌کاری عمدتاً تحت تأثیر تغییر نرخ تغذیه در حین ماشین‌کاری Al/SiCp با ۵۶٪SiCp است. به‌طور مشابه، راجمهان و همکاران [۲۵] تأثیر ناچیزی از سرعت سوراخ‌کاری بر روی قطعه کار مشاهده کردند، اما از سوی دیگر، نویسندگان نرخ تغذیه را به‌عنوان یک پارامتر ماشین‌کاری مؤثر در حین سوراخ‌کاری هیبریدی Al356/SiC یافتند. در بیشتر موارد نرخ تغذیه عمر ابزار را کاهش می‌دهد [۲۶]. ترکیبات آلیاژهای به کار رفته در کامپوزیت‌های زمینه فلزی و کسر حجمی و سختی ذرات تقویت‌کننده مهم‌ترین عواملی هستند که بر عمر ابزار در طول فرآیند سوراخ‌کاری تأثیر می‌گذارند. جدا از مکانیزم های سایش ابزار، این عوامل بر نوع براده تشکیل شده در فرآیند نیز تأثیر می‌گذارند[۲۷]. عوامل متعددی وجود دارد که می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر کیفیت نهایی سطح مؤثر باشند، مانند جنس ابزار برش، جنس ماده زمینه، سرعت برشی و نرخ تغذیه[۲۸].

طهماسبی و همکاران گزارش کردند با افزایش سرعت دوران مته نیروهای سوراخ‌کاری افزایش و زبری سطح کاهش می‌یابد. و افزایش نرخ پیشروی منجر به افزایش نیروها و زبری سطح خواهد شد. همچنین با افزایش درصد کسر حجمی ذرات تقویت‌کننده Sicنیروهای سوراخ‌کاری و زبری سطح به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد[۲۹]. دیویم نشان داد که مکانیزم سایش غالب در سطح جانبی مته است. نیروی ویژه برشی و زبری سطح سوراخ با رگرسیون خطی چندگانه به دست آمد [۳۰]. مکانیزم سایش غالب در ابزارهای CBN و کاربیدی به ترتیب سایش ساییدگی و چسبندگی در ماشین‌کاری Ti-MMC مشاهده شد [۳۱].

۲-۴- سنگ‌زنی

فرآیند ماشین‌کاری سنگ‌زنی برای به دست آوردن کیفیت سطح خوب و افزایش دقت ابعادی قطعه کار موردنیاز است[۳۲]. سنگ‌زنی کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دلیل پرداخت سطح خوب مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً چرخ های سنگ‌زنی الماس توصیه می‌شود. در بیشتر موارد، ماشین‌کاری سنگ‌زنی برای عملیات تکمیلی در عمق برش‌های کم در حدود ۰/۲۵ تا ۰/۵۰ میلی‌متر استفاده می‌شود.

تیاگاراجان و همکاران [۳۳] کیفیت سطح و سطوح بدون آسیب را در سنگ‌زنی استوانه‌ای Al/SiC موردمطالعه قرار دادند تا تأثیر پارامترهای مختلف سنگ‌زنی مانند عمق برش، سرعت تغذیه، سرعت قطعه کار و درصد کسر حجمی SiC را بیابد. زبری سطح، نیروی سنگ‌زنی و دما نشان می‌دهد که سطح بهتر و بدون آسیب در نیروی سنگ‌زنی کم و سرعت چرخ بالاتر تولید می‌شود. بااین‌حال، عمق بالای برش و سرعت تغذیه در هنگام سنگ‌زنی استوانه‌ای به سطح آسیب می‌رساند و کیفیت سطح را کاهش می‌دهد. همچنین ذکر شده است که در سرعت‌های بالای سنگ، عمق برش و سرعت پایین تغذیه، هیچ نقص و ترکی بر روی سطوح مشاهده نمی‌شود [۳۴].

۳- ماشین‌کاری غیر سنتی کامپوزیت‌های زمینه فلزی

فرآیندهای تولید سنتی به دلیل وجود سایش ابزار بسیار زیاد که تحت تأثیر حضور ذرات تقویت‌کننده سخت است، همیشه برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی پیشنهاد نمی‌شود. استفاده از فرآیندهای ماشین‌کاری غیر سنتی با افزایش کاربرد کامپوزیت‌های زمینه فلزی در صنایع مختلف نظامی و صنعتی بسیار موردتوجه قرار گرفته است. در اغلب این فرآیندها با توجه به عدم وابستگی به‌سختی جنس قطعه کار، نداشتن تماس مستقیم ابزار و قطعه کار، عملکرد مناسبی در ماشین‌کاری این مواد مشاهده شده است.

پیشنهاد می‌شود که روش‌های ماشین‌کاری غیر سنتی احتمالاً بهترین انتخاب برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها باشند. روش‌های ماشین‌کاری غیر سنتی، ازجمله ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی[۱]، ماشین‌کاری الکتروشیمیایی[۲]، ماشین‌کاری پرتو لیزر[۳]

[1] Electrical discharge machining (EDM)
[2] Electrochemical machining (ECM)
[3] Laser Beam Machining (LBM)

و ماشین‌کاری اولتراسونیک[1]، در حال حاضر برای این مواد استفاده شده‌اند[۳۵].

۳-۱- ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی

در میان فرآیندهای ماشین‌کاری غیر سنتی، تخلیه الکتریکی و وایرکات[2] مناسب‌ترین روش برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی پیشنهاد شده است[۳۶]. تخلیه الکتریکی یک روش ماشین‌کاری غیر سنتی است که به طور گسترده در صنایع مختلف استفاده می‌شود. در EDM، الکترود و قطعه کار از تماس مستقیم اجتناب می‌کنند، مکانیزم حذف مواد به انرژی الکتریکی بستگی دارد. EDM از طریق یک سری تخلیه الکتریکی مجزا که بین الکترود و قطعه کار غوطه‌ور در یک سیال دی‌الکتریک براده برداری از سطح قطعه کار را انجام می‌دهد. مزیت EDM توانایی بالای آن در تولید قطعات پیچیده با شکل، اندازه و ابعاد دقیق موردنیاز مانند قالب‌های تزریق، ابزارهای برش و اقلام مختلف با اشکال پیچیده است. مکانیزم EDM ذوب و تبخیر مواد توسط کانال پلاسما است که باعث جدا شدن ذرات تقویت‌کننده می‌شود. EDM در کاربردهای صنعتی مختلف مانند صنایع الکترونیک، خودرو، ماشین‌آلات، مخابرات لوازم‌خانگی، بسته‌بندی، ساعت‌سازی، ابزار جراحی و هوانوردی استفاده می‌شود. استفاده از تخلیه الکتریکی برای اولین بار در سال ۱۹۴۳ استفاده شد. تخلیه الکتریکی برای مواد سخت مانند تنگستن یا کاربید تنگستن بسیار مفید بود[۳۷]. اثرات فرسایشی در EDM از طریق اصل تخلیه جرقه الکتریکی روی الکترودها کنترل می‌شود؛ بنابراین، این فرآیند سایشی حرارتی است. جرقه بین قطعه کار و الکترود در یک مایع دی‌الکتریک، به‌طورکلی روغن یا آب تولید می‌شود. جرقه دمایی را تولید می‌کند که از ۸۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد [۳۸] یا تا ۲۰۰۰۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است [۳۹]. همچنین این جرقه به‌نوعی به‌عنوان یک ابزار برش کار می‌کند. هیچ‌گونه تماس مکانیکی بین قطعه کار و ابزار در طول فرآیند وجود ندارد. گپ ماشین‌کاری در حدود ۰/۰۱ تا ۰/۵۰ میلی‌متر است. ما بین ابزار و قطعه کار یک سیال دی‌الکتریک غوطه‌ور می‌شود.

نارایانان و همکاران [۴۰] عملکرد مواد مختلف الکترود مانند تنگستن، مس و برنج و زمان ماشین‌کاری بهینه را در حین ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی مواد Al/SiCp مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که مس به‌عنوان ماده الکترود بهتر عمل می‌کند و جریان مهم‌ترین عامل است.

بر اساس مطالعات صفرآبادی و همکاران [۴۱] شدت جریان تنظیمی بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری و زبری سطح دارد. ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی یا وایرکات برای اولین بار در حدود سال ۱۹۶۰ وارد فاز صنعتی شد [۴۲]. فرآیند وایرکات اساساً یک فرآیند ترموالکتریک است. مواد قطعه کار توسط تعدادی جرقه از طریق یک الکترود سیم (ابزار برش) جدا شده و توسط دی‌الکتریک از محدوده ماشین‌کاری جدا می‌شوند. سیال دی‌الکتریک به طور مداوم در منطقه ماشین‌کاری استفاده می‌شود تا یک شکاف نازک بین قطعه کار و ابزار برش ایجاد کند. به‌منظور دستیابی به دقت مطلوب و شکل‌های سه بعدی قطعه کار، حرکت سیم با قطر بین ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ میلی‌متر توسط سیستم کنترل عددی کنترل می‌شود[۴۳].

ماریگودار و همکاران[۴۴] تأثیر پارامترهای مختلف مانند نرخ تغذیه سیم، نرخ براده برداری[3]، ولتاژ، زمان روشنی و خاموشی پالس را در طول ماشین‌کاری Al6061/SiCp با وایرکات را مطالعه کردند. مطابق با مطالعات انجام شده ولتاژ به‌عنوان یک عامل مهم برای نرخ براده برداری مشاهده می‌شود درحالی‌که نرخ تغذیه سیم و زمان خاموش شدن پالس عوامل کم اهمیت‌تری هستند. حداکثر مقادیر سرعت حذف مواد در ولتاژ پایین به دست آمد.

پرامانیک [۴۵] ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی با وایرکات را با متغیرهای ماشین‌کاری مختلف مانند زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و جریان با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها موردمطالعه قرار داد. نتایج نشان می‌دهد که نرخ براده برداری با مدت‌زمان روشنی پالس و جریان افزایش می‌یابد، درحالی‌که زمان خاموشی پالس کمتر مؤثر بود. ذرات تقویت‌کننده تأثیر منفی بر نرخ براده برداری دارد. کامپوزیت با SiCp ۱۵٪ مانعی برای حرکت مستقیم سیم ایجاد می‌کند.

صفرآبادی و همکاران گزارش کردند عوامل اثرگذار بر روی نرخ سایش ابزار به ترتیب جریان پیک تخلیه، زمان روشنی پالس، اثر تعاملی زمان روشنی پالس و جریان پیک تخلیه و اثر تعاملی جریان تخلیه و زمان خاموشی پالس هستند. همچنین با افزایش زمان روشنی پالس، نرخ سایش ابزار کاهش می‌یابد. با افزایش زمان خاموشی پالس، نرخ سایش الکترود ابزار نیز بیشتر می‌شود. رابطه این دو عامل باهم به‌صورت خطی و مستقیم است[۴۶].

[1] Ultrasonic machining (USM)
[2] WIRE Electrical discharge machining (WEDM)
[3] Material removal rate (MRR)

۳-۲- ماشین‌کاری الکتروشیمیایی

ماشین‌کاری الکتروشیمیایی اغلب برای مواد با قابلیت ماشین‌کاری پایین مانند کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دلیل عمر ابزار طولانی و نرخ براده برداری بالا به طور گسترده استفاده شده است. ECM بر اساس اصل انحلال الکتروشیمیایی عمل می‌کند. انحلال الکتروشیمیایی مستقل از چقرمگی و سختی مواد است و کیفیت سطح خوبی ایجاد می‌کند[۴۷].

سنتیل کومارا و همکاران [۴۸] ECMof 15% Al/SiCp را مطالعه کردند و مدل ریاضی نرخ براده برداری و کیفیت سطح را توسعه دادند. ترکیب بهینه این پارامترها از طریق داده‌های تجربی به دست می‌آید و با موفقیت به حداکثر رساندن نرخ براده برداری و حداقل زبری سطح دست می‌یابد.

کومار و همکاران[۴۹] تلاش کردند تا Al356/SiCp را با استفاده از ECM ماشین‌کاری کند. آرایه متعامد L27 تاگوچی برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف ماشین‌کاری مانند غلظت الکترولیت، نرخ تغذیه، ولتاژ اعمال شده و درصد تقویت‌کننده مانند ۵، ۱۰ درصد و ۱۵ درصد وزنی بر به حداکثر رساندن سرعت براده برداری انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد که درصد SiC به همراه پارامترهای فرآیند مانند نرخ تغذیه، غلظت الکترولیت و ولتاژ اعمالی تأثیر بیشتری بر نرخ براده برداری دارد.

ایاپان و همکاران[۵۰] اثر متغیرهای فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی را در معیارهای عملکرد ارائه کردند. نتایج نهایی نشان داد که متغیرهای فرآیند شامل نرخ تغذیه، ولتاژ و جریان به طور قابل‌توجهی بر هزینه‌های عملیاتی تأثیر می‌گذارند درحالی‌که تحت تأثیر همه پارامترها است.

۳-۳- ماشین‌کاری لیزری

ماشین‌کاری پرتو لیزر به طور گسترده به‌عنوان یک فرآیند پیشرفته برای شکل‌دهی کامپوزیت‌های زمینه فلزی استفاده می‌شود. ماشین‌کاری به کمک لیزر یک فرآیند ماشین‌کاری مبتنی بر انرژی حرارتی برای برش مواد بدون تماس با قطعه کار است. این روش روی اصل ذوب و تبخیر مواد قطعه کار عمل می‌کند تا شکل موردنیاز قطعه را ایجاد کند. موادی با ظرفیت رسانایی حرارتی کم بدون در نظر گرفتن سختی یا شکنندگی برای ماشین‌کاری لیزری مطلوب هستند. این روش می‌تواند عرض برش بسیار باریک تا ۰/۲۵ میلی‌متر و همچنین هندسه پیچیده ایجاد کند[۵۱]. هونگ و همکاران [۵۲] ماشین‌کاری کامپوزیت پایه آلومینیومی را با استفاده از لیزر CO_2 و موج پیوسته ۳ کیلو واتی موردمطالعه قرار دادند. اثرات پارامترهای لیزر مانند گاز محافظ، توان لیزر و سرعت برش بر روی کیفیت برش‌ها موردبررسی قرار گرفت. نتایج تجربی نشان داد که Al6061 MMC به طور مؤثر با استفاده از لیزر بریده شدند.

منجوت و همکاران [۵۳] به طور تجربی عملکرد ماشین‌کاری به کمک لیزر کامپوزیت Al7075-TiB2 را موردمطالعه قرار دادند. زبری سطح، نرخ براده برداری و دقت ابعادی در ماشین‌کاری پرتو لیزر موردمطالعه قرار می‌گیرند. برخی از پارامترهای ورودی مانند قطر نازل و توان ثابت در نظر گرفته شد. مشاهده شد که سرعت برای کیفیت سطح بیشترین اهمیت را دارد. بااین‌حال، فشار گاز و فاصله نازل تا سطح قطعه کار حداقل تأثیر را بر کیفیت سطح دارد.

مولر و همکاران[۵۴] گزارش کردند استفاده از پرتو لیزر به دلیل وجود کیفیت سطح پایین و همچنین تأثیرات حرارتی بسیار زیاد در ماده زمینه کامپوزیت‌های فلزی پیشنهاد نمی‌گردد.

۳-۴- ماشین‌کاری آلتراسونیک

ماشین‌کاری به کمک امواج آلتراسونیک به‌طورکلی بر اساس قرار گرفتن ذرات ساینده سخت در بین سطح ابزار و قطعه کار و اعمال نوسان بر ابزار عمل می‌کند. در این فرایند با برخورد ذرات ساینده به سطح قطعه کار بخشی از ماده قطعه کار جدا شده و توسط دوغاب ساینده از محیط ماشین‌کاری خارج می‌شود. در فرآیند آلتراسونیک، گرمای کمی در طول فرآیند ماشین‌کاری تولید می‌شود همچنین هزینه ماشین‌کاری و خطرات ایمنی نسبت به سایر روش‌های غیر سنتی کمتر است. در ماشین‌کاری به کمک امواج آلتراسونیک، ابزار برش به‌صورت طولی در فرکانس ۲۰ تا ۳۰ کیلوهرتز با دامنه بین ۰/۰۱ و ۰/۰۶ میلی‌متر نوسان می‌کند[۵۵].

ژونگ و همکاران [۵۶] به طور تجربی نرخ براده برداری را با تجزیه‌وتحلیل‌های آماری و مدل رگرسیون بررسی کردند. بر اساس این مطالعه سه عامل اصلی (فشار تغذیه، نرخ تغذیه و دانه‌بندی ساینده) بر نرخ براده برداری مؤثر هستند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که مدل رگرسیون به درستی اثر پارامترهای فرآیند را بر پاسخ نشان می‌دهد. دانه‌بندی ساینده تأثیر بیشتری بر نرخ براده برداری دارد و به دنبال آن فشار تغذیه و سرعت تغذیه می‌باشد.

سیواکنان و همکاران [۵۷] نرخ براده برداری برای کامپوزیت‌های زمینه فلزی با کسرهای مختلف وزن SiCp بررسی کردند. از نتایج تجربی این نتیجه حاصل می‌شود که نرخ

براده برداری بالاتر با افزایش مقدار مواد ساینده سخت‌تر از قطعه کار و با غلظت دوغاب بالاتر به دست می‌آید.

ژونگ و همکاران[۵۸] قابلیت ماشین‌کاری Al/SiCp را با استفاده از تراش‌کاری با کمک ارتعاشات اولتراسونیک بررسی کردند. اثر پارامترهای مختلف ماشین‌کاری بر پارامترهای خروجی مانند زبری سطح مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی نشان می‌دهد که زبری سطح تولیدشده با ارتعاش اولتراسونیک در مقایسه با سطح بدون کمک اولتراسونیک کاهش یافته است.

۴- ابزارهای مورد استفاده در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های فلزی

۴-۱- ابزارهای کاربیدی

امکان استفاده از ابزار کاربیدی برای ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه فلزی یک نقطه بحث میان جامعه علمی است. بسیاری از محققان پیشنهاد کرده‌اند که ابزار کاربیدی برای ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه فلزی مناسب نیست[۱۳].

تعدادی از محققان به این نتیجه رسیده‌اند که ابزارهای کاربیدی تحت شرایط خاصی برای ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه فلزی مفیدند. آن‌ها دریافته‌اند ابزارهای کاربیدی در ماشین‌کاری کوتاه‌مدت برای کیفیت سطح قابل‌قبول مناسب هستند[۳۱]. همچنین پیشنهاد می‌شود ابزار کاربیدی برای سرعت‌های برش پایین (۲۰-۳۰m/min) استفاده گردد [۵۹]. در استفاده از ابزار کاربیدی در سرعت برش ۲۵۰ m/min مشاهده شده است که عمر آن‌ها برای تراشکاری کامپوزیت Al/SiC ۴۰ دقیقه می‌باشد [۶۰].

تحقیقات انجام شده توسط هانگ و همکارانش در مورد انواع مختلف ابزارها نشان می‌دهد که ابزارهای کاربیدی مقرون‌به‌صرفه ترین ابزار، برای ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه فلزی هستند[۶۱]. تحقیق در مورد استفاده از پوشش در نوک ابزار کاربیدی در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های نشان می‌دهد که پوشش اثر کمی بر عمر ابزار دارد زیرا به‌سرعت پوشش از طریق سایش حذف می‌شود[۶۲, ۶۳].

سان و همکاران گزارش کرده‌اند که عمر قابل‌قبول ابزار وابسته به سایش پوشش کاربیدی ابزار است[۶۴]. چند پژوهش، نتیجه‌گیری کرده‌اند که روکش ابزار کاربیدی عامل مهمی در جهت بهبود بازدهی عمر ابزار نیست[۶۵]. همچنین گزارش شده است که استفاده از ابزار کاربید روکش‌دار بازده صافی سطح پایانی را در مقایسه با ابزار کاربید بدون پوشش بهبود داده است[۶۶]. مطالعات متعددی نشان می‌دهند مکانیزم اصلی سایش ابزار در ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه فلزی از نوع خراشیدگی[1]است. به‌این‌ترتیب ، هرگونه بهبود در طول عمر ابزار به‌عنوان یک تابع از افزایش سختی نوک یا روکش ابزار نمایش داده می‌شود[۶۷].

۴-۲- الماس چند کریستال(PCD)

ابزارهای PCD برای ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه فلزی سال‌هاست که موفقیت زیادی داشته‌اند[۶۸]. این موفقیت به سبب این واقعیت است که سختی ابزار PCD نسبت به اکثر ذرات تقویت‌کننده و الیافی که فاز تقویت‌کننده را تشکیل می‌دهند بیشتر است. در استفاده از ابزار PCD یک اجماع عمومی در میان محققان وجود دارد که این ابزار منجر به افزایش قابل‌توجهی در عمر ابزار به نسبت ابزار کاربیدی می‌شود. بنابراین PCD را جنس ابزار ایدئال برای ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه فلزی معرفی کرده‌اند[۶۹].

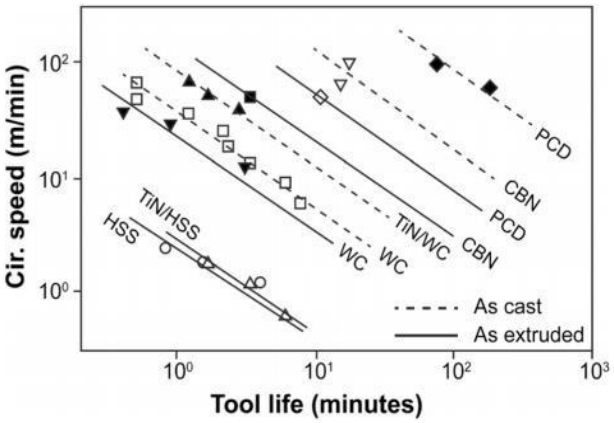
یک تحقیق توسط چمبرس و استفنس [۷۰] نشان می‌دهد که ابزار PCD نسبت به دیگر ابزار در هنگام تراش‌کاری کامپوزیت‌های Al 5%shaffil,12%SiC برتر هستند.

چن و میاک [۷۱] گزارش کرده‌اند که عمر بهینه ابزار در آزمایش یک آلیاژ Al-MG5 به همراه تقویت‌کننده با shafil در تراش کمتر از انتظار است. در این پژوهش عمر ابزار فقط دو برابر شده درحالی‌که هنگام ماشین‌کاری مواد سنتی عمر ابزار افزایش قابل‌توجهی دارد. چمبرس و استفنس مشاهده کرده‌اند که مکانیزم سایش اصلی در زمان ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه فلزی با ابزار PCD به‌وسیله پدیده خراشیدگی است. بسیاری از مطالعات دیگر نشان می‌دهد که سایش مشاهده در درجه اول خراشیدگی است[۷۲].

یک پژوهش در مقیاس میکرو از براده در یک ابزار PCD نشان داد که افزایش نرخ تغذیه و عمق برش در به حداکثر رساندن نرخ براده برداری[2] ناموفق خواهند بود. این نتیجه‌گیری متضاد دریافت‌های تجربی حاصل از ابزار کاربیدی است زیرا در این ابزار، افزایش این پارامترها باعث به حداکثر رساندن نرخ براده برداری در طول عمر ابزار می گردد. با افزایش سرعت برش، نرخ سایش، شبیه ابزار کاربیدی افزایش می‌یابد [۷۳].

[1] Abrasion

[2] Material removal rate(MRR)



شکل ۴ عمر ابزار با جنس‌های مختلف[۷۴].

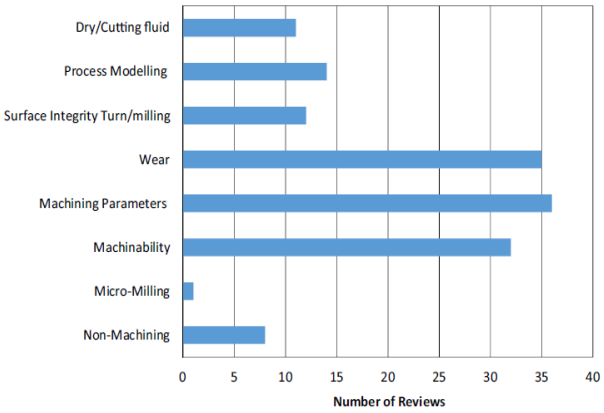
۴-۳- ابزار نیترید بور مکعبی CBN[1]

ابزار CBN، سختی بسیار بیشتری از ابزار کاربیدی معمولی دارند؛ اما از ابزار PCD سخت‌تر نیستند[۷۵]. در مقایسه ابزارهای CBN و PCD معلوم شد که مانند ابزارهای بدون پوشش کاربیدی برای انجام کارهای خاص مناسب است. در این پژوهش مقایسه CBN و PCD در ماشین تراش با سرعت برش ۴۰۰m/min، عمق برش ۰/۳mm و پیشروی ۰/۱mm/rev نشان می‌دهد که ابزار PCBN به طور قابل‌توجهی از تشکیل لبه انباشته رنج می‌برد که این امر باعث کوتاه‌تر شدن عمر ابزار می‌شود این یافته‌ها در تضاد کارهایی است که توسط هانگ و لونی انجام شده است[۷۶]. هانگ جنس ابزار مختلفی را تست کرد و دریافت که استفاده از ابزار CBN عمر مفید ابزار را تقریباً با ضریب ۵ برابر نسبت به ابزارهای کاربیدی بهبود می‌دهد. همین مطالعه‌ی دیگری نشان داد که ابزارهای PCD عمر ابزار را با ضریب نزدیک به ۴ برابر بیشتر از CBN بهبود می‌بخشد. لب پر شدن ابزار در ماشین‌کاری CBN ها یک مسئله مهم محسوب می‌شود [۷۷]. مشاهده‌ای که توسط سیفتسی و همکارانش صورت گرفت [۷۸]. به شناسایی شکست ابزار به‌عنوان مورد اصلی سایش در ابزار CBN زمانی که Al/SiC 16% با اندازه ذرات تقویت ۴۰mμ ماشین‌کاری می‌شود می‌پردازد. در طول مطالعه مشابه در کامپوزیت زمینه فلزی با اندازه ذرات تقویت‌کننده ۳۰ mμ و ۴۰mμ، خراشیدگی[2] به‌عنوان عامل اصلی سایش سطح جانبی شناسایی شد.

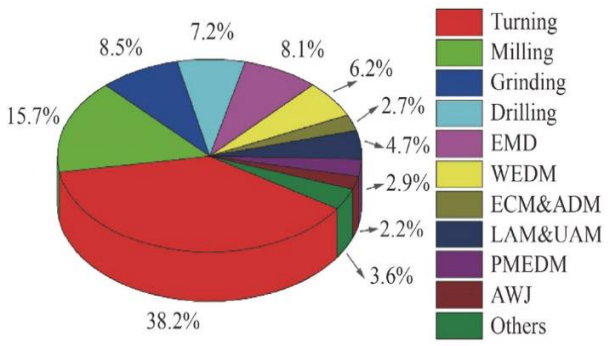
پژوهش انجام شده در مورد CBN ها نسبتاً محدود است و هنوز هم برای درک صحیح رفتار پارامترهای ماشین‌کاری با استفاده از این ابزار مطالعات بیشتری موردنیاز است.

۵- پیشنهادها برای مطالعات آتی

باآنکه مطالعات نسبتاً مناسبی در خصوص ماشین‌کاری سنتی کامپوزیت‌های زمینه فلزی صورت پذیرفته است اما پیشنهاد می‌گردد مطالعات تکمیلی در حوزه استفاده از ابزارهای جدیدتر نظیر CBN و... انجام گردد. همچنین استفاده از روش‌های ماشین‌کاری غیر سنتی به علت بالا بودن سایش ابزار در روش‌های سنتی بسیار توصیه می‌گردد. لذا لازم است پژوهش‌های جامع‌تری در خصوص ماشین‌کاری غیر سنتی این مواد صورت پذیرد. همچنین تمرکز مطالعات انجام شده تاکنون بر روی کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی بوده است. نیاز است تحقیقات بیشتری پیرامون سایر آلیاژها همچون تیتانیوم، منیزیوم و ... انجام شود. از ماشین‌کاری سبز این مواد در مطالعات گزارش شده غفلت شده است. این موضوع نیز می‌تواند یکی از موضوعات موردتوجه برای محققین در مطالعات پیش رو باشد.



شکل ۵ تعداد مطالعات انجام شده در حوزه ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی بر اساس موضوع[۷۹].



شکل ۶ توزیع متفاوت مطالعات انجام شده بر اساس نوع فرآیند ماشین‌کاری برحسب درصد[۸۰].

[1] Chemical vapour deposition

[2] Abrasion

شکل (۵) و شکل (۶) تعداد مطالعات انجام شده بر اساس موضوع را به‌خوبی نشان می‌دهند. مطابق با این اشکال مطالعه پارامترهای مؤثر بر فرآیندهایی همچون میکروفرزکاری، برشکاری با جت آب و ... کمتر موردتوجه قرار گرفته است. لذا این دست از روش‌های ماشین‌کاری می‌تواند یک موضوع مناسب تحقیقات برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی پیش رو باشد.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به خواص مکانیکی و حرارتی خوب کامپوزیت‌های زمینه فلزی نسبت به سایر کامپوزیت‌های دیگر، این مواد از پتانسیل بسیار بالایی برای استفاده در صنایع مختلف برخوردار هستند. ماشین‌کاری این کامپوزیت‌ها به دلیل وجود ذرات تقویت‌کننده با سختی بالا بسیار چالش‌برانگیز است. ازاین‌رو مطالعه همه‌جانبه پارامترهای مؤثر بر ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

مطالعات فراوانی توسط دانشمندان مختلف در این حوزه صورت پذیرفته است. در این مقاله تلاش شد تا یک نگاه مناسبی بر عوامل مؤثر بر ماشین‌کاری سنتی و غیر سنتی این مواد ارائه گردد.

۱- با مطالعه بر روی فرآیندهای ماشین‌کاری سنتی از قبیل، تراش‌کاری، فرزکاری، سوراخ‌کاری و ... مشخص شد ابزارهای PCD و بعدازآنCBN بهترین عملکرد را بر روی این مواد را دارند. استفاده از ابزارهای کاربیدی که در صنایع به‌وفور از آن‌ها استفاده می‌شود در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی پیشنهاد نمی‌گردد.

۲- به علت ماهیت ساینده ذرات تقویت‌کننده، سایش ابزار و به طبع آن کاهش کیفیت سطح و... مهم‌ترین چالش پیش رو در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی است.

۳- فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی پرکاربردترین روش از روش‌های ماشین‌کاری غیر سنتی این مواد است. شدت جریان پارامتر اصلی در فرآیند تخلیه الکتریکی است.

۴- استفاده از ماشین‌کاری لیزری به دلیل کیفیت سطح پایین و اثرات حرارتی ناشی از آن مرسوم نیست.

۵- مطالعه فرآیندهایی نظیر میکرو فرزکاری، سوراخ‌کاری و ماشین‌کاری سبز کامپوزیت‌های زمینه فلزی نسبتاً مورد غفلت واقع شده است. پیشنهاد می‌گردد بر روی این موارد مطالعات بیشتری توسط محققان فعال در حوزه ماشین‌کاری انجام شود.

۷ – مراجع

[1] J. P. Davim, *Machining composites materials*. John Wiley & Sons, 2013.

[2] A. Mortensen and J. Llorca, "Metal matrix composites," *Annual review of materials research*, vol. 40, pp. 243-270, 2010,doi: https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070909-104511.

[3] P. S. Bains, S. S. Sidhu, and H. Payal, "Fabrication and machining of metal matrix composites: a review," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 5, pp. 553-573, 2016,doi: https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1025976.

[4] R. A. Laghari, J. Li, A. A. Laghari, and S.-q. Wang, "A review on application of soft computing techniques in machining of particle reinforcement metal matrix composites," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 27, pp. 1363-1377, 2020,doi: https://doi.org/10.1007/s11831-019-09340-0.

[5] N. Brili, M. Ficko, and S. Klančnik, "Tool condition monitoring of the cutting capability of a turning tool based on thermography," *Sensors*, vol. 21, no. 19, p. 6687, 2021,doi: https://doi.org/10.3390/s21196687.

[6] J. P. Davim and A. M. Baptista, "Relationship between cutting force and PCD cutting tool wear in machining silicon carbide reinforced aluminium," *Journal of materials processing technology*, vol. 103, no. 3, pp. 417-423, 2000,doi: https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00495-7.

[7] A. sousanabadi Farahani and M. modabbarifar, "Investigating the Effect of Machining Parameters on the Cutting Force and Surface Quality of RZ5/TiB2 Magnesium Based Metal Matrix Composite by Sobel Sensitivity Analysis Method," (in persian), *Modares Mechanical Engineering*, vol. 23, no. 10, pp. 63-67, 2023, http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1402.23.10.12.2.

[8] V. Tahmasbi, A. Sousanabadi Farahani, D. Ghazi khansari, and M. H. Baghi, "Investigating the Parameters Affecting Surface Quality, Metal Removal Rate, and Tool Wear in Machining of Hybrid Metal Matrix Composites," (in persian), *Modares Mechanical Engineering*, vol. 23, no. 10, pp. 155-161, 2023,doi: http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1402.23.10.27.7.

[9] P. Bansal and L. Upadhyay, "Experimental investigations to study tool wear during turning of alumina reinforced aluminium composite," *Procedia*

Engineering, vol. 51, pp. 818-827, 2013,doi: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.117.

[10] J. P. Davim, "Machining: fundamentals and recent advances," 2008.

[11] D. Jani, "Machining of Sic—metal matrix composite (MMC) by polycrystalline diamond (PCD) tools and effect on quality of surface by changing machining parameters," *Int. J. Sci. Res. Dev*, vol. 2, pp. 106-108, 2014,doi: https://doi.org/10.1177/09544062231203583.

[12] N. Muthukrishnan, M. Murugan, and K. Prahlada Rao, "Machinability issues in turning of Al-SiC (10p) metal matrix composites," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 39, pp. 211-218, 2008,doi: https://doi.org/10.1007/s00170-007-1220-8.

[13] A. Asgari, A. Sousanabadi, and M. Sedighi, "Cutting fluid role in the machinability of AZ91/SiC composite: Tool wear and surface roughness," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, pp. 1-13, 2023,doi: https://doi.org/10.1177/09544062231203583.

[14] T. Ozben, E. Kilickap, and O. Cakır, "Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC," *Journal of materials processing technology*, vol. 198, no. 1-3, pp. 220-225, 2008,doi: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.06.082.

[15] M. A. Sougavabar, S. A. Niknam, and B. Davoodi, "Experimental characterization of tool wear morphology in milling of Al520-MMC reinforced with SiC particles and additive elements Bi and Sn," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 24, pp. 571-585, 2023,doi: https://doi.org/10.3390/met10111459.

[16] S.-J. Hong, H.-M. Kim, D. Huh, C. Suryanarayana, and B. S. Chun, "Effect of clustering on the mechanical properties of SiC particulate-reinforced aluminum alloy 2024 metal matrix composites," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 347, no. 1-2, pp. 198-204, 2003,doi: https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00593-2.

[17] V. Tahmasbi, M. H. Baghi, S. Aeinehbandy, and A. Sousanabadi Farahani, "Sensitivity analysis and optimization of material removal rate and surface quality in aluminum matrix composite," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 23, no. 7, pp. 395-404, 2023, http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1402.23.7.1.5.

[18] R. Muraliraja, R. Arunachalam, I. Al-Fori, M. Al-Maharbi, and S. Piya, "Development of alumina reinforced aluminum metal matrix composite with enhanced compressive strength through squeeze casting process," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 233, no. 3, pp. 307-314, 2019,doi: https://doi.org/10.1177/1464420718809516.

[19] S. Sarfraz, M. Jahanzaib, A. Wasim, S. Hussain, and H. Aziz, "Investigating the effects of as-casted and in situ heat-treated squeeze casting of Al-3.5% Cu alloy," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89, pp. 3547-3561, 2017,doi: https://doi.org/10.1007/s00170-016-9350-5.

[20] J. Li and R. A. Laghari, "A review on machining and optimization of particle-reinforced metal matrix composites," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 100, pp. 2929-2943, 2019,doi: https://doi.org/10.1007/s00170-018-2837-5.

[21] V. Tahmasbi, S. Aeinehbandy, M. H. Baghi, and A. Sousanabadi Farahani, "Sensitivity analysis modeling and optimization of cutting Forces and stool wear in milling of aluminum matrix composite," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 23, no. 8, pp. 475-483, 2023, http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1402.23.8.4.0.

[22] A. P. Markopoulos, I. S. Pressas, I. G. Papantoniou, N. E. Karkalos, and J. P. Davim, "Machining and machining modeling of metal matrix composites—A review," *Modern manufacturing engineering*, pp. 99-141, 2015,doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-20152-8_4.

[23] A. Sousanabadi Farahani, O. Khalili, and A. Torabi, "Sensitivity analysis of effective parameters on bone drilling force by using E-fast method," *Mechanic of Advanced and Smart Materials*, vol. 3, no. 1, pp. 83-94, 2023,doi: https://doi.org/10.61186/masm.3.1.83.

[24] S. Huang, L. Zhou, J. Chen, and L. Xu, "Drilling of SiCp/Al metal matrix composites with polycrystalline diamond (PCD) tools," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 27, no. 10, pp. 1090-1094, 2012,doi: https://doi.org/10.1080/10426914.2011.654152.

[25] T. Rajmohan, K. Palanikumar, and M. Kathirvel, "Optimization of machining parameters in drilling hybrid aluminium metal matrix composites," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 22, no. 6, pp. 1286-1297, 2012,doi: https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61317-4.

[26] A. R. Ahamed, P. Asokan, S. Aravindan, and M. Prakash, "Drilling of hybrid Al-5% SiC p-5% B 4 C

p metal matrix composites," *The international journal of advanced manufacturing technology*, vol. 49, no. 9-12, pp. 871-877, 2010,doi: https://doi.org/10.1007/s00170-009-2453-5.

[27] V. Songmene and M. Balazinski, "Machinability of graphitic metal matrix composites as a function of reinforcing particles," *CIRP Annals*, vol. 48, no. 1, pp. 77-80, 1999,doi: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63135-7.

[28] G. Tosun and M. Muratoglu, "The drilling of an Al/SiCp metal-matrix composites. Part I: microstructure," *composites science and technology*, vol. 64, no. 2, pp. 299-308, 2004,doi: https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00290-2.

[29] V. Tahmasbi, A. Sousanabadi Farahani, Baghi, and Ghazi khansari, "Statistical Modeling and Optimization of Thrust Force and Surface Roughness in Drilling Hybrid Aluminum Matrix Composites," (in persian), *Modares Mechanical Engineering*, vol. 23, no. 10, pp. 149-154, 2023, http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1402.23.10.26.6.

[30] J. P. Davim, "Study of drilling metal–matrix composites based on the Taguchi techniques," *Journal of materials processing technology*, vol. 132, no. 1-3, pp. 250-254, 2003,doi: https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00935-4.

[31] S. A. Niknam, S. Kamalizadeh, A. Asgari, and M. Balazinski, "Turning titanium metal matrix composites (Ti-MMCs) with carbide and CBN inserts," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, pp. 253-265, 2018,doi: https://doi.org/10.1007/s00170-018-1926-9.

[32] C. Thiagarajan, R. Sivaramakrishnan, and S. Somasundaram, "Modeling and optimization of cylindrical grinding of Al/SiC composites using genetic algorithms," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 34, pp. 32-40, 2012,doi: https://doi.org/10.1590/S1678-58782012000100005.

[33] C. Thiagarajan, R. Sivaramakrishnan, and S. Somasundaram, "Cylindrical grinding of SiC particles reinforced aluminium metal matrix composites," *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 14-20, 2011,doi: https://doi.org/10.1177/09544062231203583.

[34] K. C. Nayak, P. R. Deshmukh, A. K. Pandey, P. Vemula, and P. P. Date, "Microstructural, physical and mechanical characterization of grinding sludge based aluminium metal matrix composite," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 773, p. 138895, 2020,doi: https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138895.

[35] N. Bharat and P. Bose, "A study on conventional and non-conventional machining behaviour of metal matrix composites: a review," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 7600-7616, 2022,doi: https://doi.org/10.1080/01430750.2022.2073265.

[36] S. S. Thakur, B. Patel, R. K. Upadhyay, D. K. Bagal, and A. Barua, "Machining characteristics of metal matrix composite in powder-mixed electrical discharge machining–A review," *Australian Journal of Mechanical Engineering*, vol. 21, no. 5, pp. 1755-1777, 2023,doi: https://doi.org/10.1080/14484846.2022.2030089.

[37] P. Srikanth and C. P. Kumar, "Electrical discharge machining characteristics of aluminium metal matrix composites-a review," *Int J Sci Res*, vol. 4, pp. 1-15, 2013,doi: https://doi.org/10.1177/09544062231203542.

[38] G. Boothroyd, "Non-conventional machining processes," *Fundamentals of machining and machine tools*, vol. 491, 1989.

[39] J. McGeough, "Advanced methods of machining: Springer Science & Business Media," 1988.

[40] V. Balasubramaniam, N. Baskar, and C. S. Narayanan, "Optimization of electrical discharge machining parameters using artificial neural network with different electrodes," in *5th international & 26th all India manufacturing technology, design and research conference*, 2014.

[41] A. Safarabady, V. Tahmasbi, A. sousanabadi farahani, and m. zolfaghari, "Electrical discharge machining of metal matrix composite AZ91 magnesium alloy and investigation and optimization of the effect of input parameters on material removal rate and workpiece surface roughness," *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 9, no. 6, pp. 59-69, 2022,doi: https://doi.org/10.22034/ijme.2022.160942.

[42] E. C. Jameson, *Electrical discharge machining*. Society of Manufacturing Engineers, 2001.

[43] K. Raju, M. Balakrishnan, C. Priya, M. Sivachitra, and D. Narasimha Rao, "Parametric Optimization of Wire Electrical Discharge Machining in AA7075 Metal Matrix Composite," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2022, 2022,doi: https://doi.org/10.1155/2022/4438419.

[44] R. N. Marigoudar and K. Sadashivappa, "Effect of machining parameters on MRR and surface roughness in machining of ZA43/SiCp composite by WEDM," *International journal of applied science and engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 317-330, 2013,doi: https://doi.org/10.6703/IJASE.2013.11(3).317.

[45] A. Pramanik, "Developments in the non-traditional machining of particle reinforced metal matrix composites," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 86, pp. 44-61, 2014,doi: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.07.003.

[46] A. Safarabady, V. Tahmasbi, A. Sousanabadi Farahani, and M. Zolfaghari, "Investigating factors affecting electrode wear rate in electrical discharge machining of AZ91 magnesium alloy metal matrix composite reinforced with silicon carbide microparticles," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 13, no. 4, pp. 119-134, 2023,doi: https://doi.org/10.22044/JSFM.2023.12837.3711.

[47] K. Rajurkar and D. Zhu, "Improvement of electrochemical machining accuracy by using orbital electrode movement," *CIRP Annals*, vol. 48, no. 1, pp. 139-142, 1999,doi: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63150-3.

[48] C. Senthilkumar, G. Ganesan, and R. Karthikeyan, "Electrochemical machining of Al/15% SiCp composites through a response surface methodology-based approach," *International journal of materials research*, vol. 103, no. 3, pp. 378-382, 2012,doi: https://doi.org/10.3139/146.110641.

[49] K. S. Kumar, R. Sivasubramanian, and K. Kalaiselvan, "Selection of optimum parameters in non conventional machining of metal matrix composite," *Portugaliae Electrochimica Acta*, vol. 27, no. 4, pp. 477-486, 2009,doi: http://dx.doi.org/10.4152/pea.200904477.

[50] S. Ayyappan, M. Kalaimathi, and G. Venkatachalam, "Cost-tolerance prediction models for electrochemical machining of metal matrix composites," *Engineering Review: Međunarodni časopis namijenjen publiciranju originalnih istraživanja s aspekta analize konstrukcija, materijala i novih tehnologija u području strojarstva, brodogradnje, temeljnih tehničkih znanosti, elektrotehnike, računarstva i građevinarstva,* vol. 35, no. 3, pp. 299-307, 2015,doi: https://doi.org/10.1177/09544062231203583.

[51] S. Marimuthu, J. Dunleavey, Y. Liu, M. Antar, and B. Smith, "Laser cutting of aluminium-alumina metal matrix composite," *Optics & Laser Technology*, vol. 117, pp. 251-259, 2019,doi: https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.04.029.

[52] L. Hong, R. Vilar, and W. Youming, "Laser beam processing of a SiC particulate reinforced 6061 aluminium metal matrix composite," *Journal of materials science*, vol. 32, pp. 5545-5550, 1997,doi: https://doi.org/10.1023/A:1018668322943.

[53] S. Manjoth, R. Keshavamurthy, and G. P. Kumar, "Optimization and analysis of laser beam machining parameters for Al7075-TiB2 in-situ composite," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016,doi: https://doi.org/10.1088/1757-899X/149/1/012013, vol. 149, no. 1: IOP Publishing, p. 012013.

[54] F. Müller and J. Monaghan, "Non-conventional machining of particle reinforced metal matrix composite," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, no. 9, pp. 1351-1366, 2000,doi: https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00121-2.

[55] Z. Yang, L. Zhu, G. Zhang, C. Ni, and B. Lin, "Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 156, p. 103594, 2020,doi: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103594.

[56] G. Zhong, J. Xu, Y. Wu, and S. Yang, "Statistical Analyses and Regression Modeling for Influence of Process Parameters on Material Removal Rate in Ultrasonic Machining," *Glob. J. Technol. Optim*, vol. 6, pp. 1-6, 2015,doi: https://doi.org/10.4172/2229-8711.1000187.

[57] C. Sivakandhan *et al.*, "Material characterization and unconventional machining on synthesized Niobium metal matrix," *Materials Research Express*, vol. 7, no. 1, p. 015018, 2020,doi: https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab624d.

[58] G. Lin and Z. Zhong, "Ultrasonic assisted turning of an aluminium-based metal matrix composite," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 27, pp. 1077-1081, 2006,doi: https://doi.org/10.1007/s00170-004-2320-3.

[59] N. Tomac, K. Tannessen, and F. O. Rasch, "Machinability of particulate aluminium matrix composites," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 55-58, 1992,doi: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61151-2.

[60] P. Chen and T. Hoshi, "High-performance machining of SiC whisker-reinforced aluminium composite by self-propelled rotary tools," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 59-62, 1992,doi: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61152-4.

[61] N. Hung, F. Boey, K. Khor, C. Oh, and H. Lee, "Machinability of cast and powder-formed aluminum alloys reinforced with SiC particles," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 48, no. 1-4, pp. 291-297, 1995,doi: https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01661-J.

[62] A. Abdullah, "Machining of aluminium based metal matrix composite (MMC)," University of

Warwick, 1996,doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.179.

[63] W. Pedersen and M. Ramulu, "Facing SiCp/Mg metal matrix composites with carbide tools," *Journal of materials processing technology*, vol. 172, no. 3, pp. 417-423, 2006,doi: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.07.016.

[64] F. H. Sun, Z. Wu, J. W. Zhong, and M. Chen, "High speed milling of SiC particle reinforced aluminum-based MMC with coated carbide inserts," in *Key Engineering Materials*, 2004,doi: High speed milling of SiC particle reinforced aluminum-based MMC with coated carbide inserts, vol. 274: Trans Tech Publ, pp. 457-462.

[65] F. H. Sun, Z. Wu, J. W. Zhong, and M. Chen, "High speed milling of SiC particle reinforced aluminum-based MMC with coated carbide inserts," *Key Engineering Materials*, vol. 274, pp. 457-462, 2004,doi: https://doi.org/10.1177/09544062231203583.

[66] O. Quigley, J. Monaghan, and P. O'Reilly, "Factors affecting the machinability of an Al/SiC metal-matrix composite," *Journal of materials processing technology*, vol. 43, no. 1, pp. 21-36, 1994,doi: https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90159-7.

[67] S. Barnes and I. Pashby, "Machining of aluminium based metal matrix composites," *Applied Composite Materials*, vol. 2, no. 1, pp. 31-42, 1995,doi: https://doi.org/10.1007/BF00567375.

[68] W. Bai, A. Roy, R. Sun, and V. V. Silberschmidt, "Enhanced machinability of SiC-reinforced metal-matrix composite with hybrid turning," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 268, pp. 149-161, 2019,doi: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.017.

[69] D. Das, S. K. Pradhan, A. K. Sahoo, A. Panda, M. P. Satpathy, and C. Samal, "Tool wear and cutting force investigations during turning 15 wt% SiCp-Al 7075 metal matrix composite," *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 854-859, 2020.

[70] A. Chambers and S. Stephens, "Machining of Al□ 5Mg reinforced with 5 vol.% Saffil and 15 vol.% SiC," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 135, pp. 287-290, 1991,doi: https://doi.org/10.1016/0921-5093(91)90577-A.

[71] P. Chen and Y. Miyake, "Machining Characteristics of SiC Whisker Reinforced Aluminum," in *Proceedings of 1989 ASM Int. Conf. on Machinability*, 1989,doi: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61152-4, pp. 69-75.

[72] A. Chambers, "The machinability of light alloy MMCs," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 27, no. 2, pp. 143-147, 1996,doi: https://doi.org/10.1016/1359-835X(95)00001-I.

[73] M. Brun, M. Lee, and F. Gorsler, "Wear characteristics of various hard materials for machining SiC-reinforced aluminum alloy," *Wear*, vol. 104, no. 1, pp. 21-29, 1985,doi: https://doi.org/10.1016/0043-1648(85)90243-1.

[74] N. Hung, F. Boey, K. Khor, C. Oh, and H. Lee, "Machinability of cast and powder-formed aluminum alloys reinforced with SiC particles," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 48, no. 1-4, pp. 291-297, 1995, doi: https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01661-J.

[75] G. T. Smith, *Cutting tool technology: industrial handbook*. Springer Science & Business Media, 2008.

[76] L. Looney, J. Monaghan, P. O'Reilly, and D. Taplin, "The turning of an Al/SiC metal-matrix composite," *Journal of materials processing technology*, vol. 33, no. 4, pp. 453-468, 1992,doi: https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90279-2.

[77] V. Songmene and M. Balazinski, "Machinability of graphitic metal matrix composites as a function of reinforcing particles," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 48, no. 1, pp. 77-80, 1999.

[78] I. Ciftci, M. Turker, and U. Seker, "CBN cutting tool wear during machining of particulate reinforced MMCs," *Wear*, vol. 257, no. 9, pp. 1041-1046, 2004,doi: https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.07.005.

[79] C. J. Nicholls, B. Boswell, I. J. Davies, and M. N. Islam, "Review of machining metal matrix composites," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 90, pp. 2429-2441, 2017, doi: https://doi.org/10.1007/s00170-016-9558-4.

[80] J.-P. Chen, L. Gu, and G.-J. He, "A review on conventional and nonconventional machining of SiC particle-reinforced aluminium matrix composites," *Advances in Manufacturing*, vol. 8, no. 3, pp. 279-315, 2020,doi: https://doi.org/10.1007/s40436-020-00313-2.