



بررسی مورفولوژی براده در ماشینکاری کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم حاوی ۱٪ قلع

محمد حسنی فرد، رضا آذرآفزا*، محمدحسین علایی، مسلم نجفی

مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: azarmut@mut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۷ شهریور ۱۴۰۴

پذیرش: ۲۷ آبان ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

براده

تراشکاری

پارامترهای ماشینکاری

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم

قلع

چکیده

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم به دلیل استحکام ویژه بالا، مقاومت به سایش و پایداری حرارتی، در صنایع هوافضا، خودروسازی و تجهیزات پیشرفته کاربرد گسترده‌ای دارند. با این حال، حضور ذرات سخت تقویت‌کننده در این مواد، فرایند ماشینکاری را با چالش‌هایی همراه ساخته و اغلب منجر به تشکیل براده‌های ناپیوسته، دندانه‌دار و غیرپایدار می‌شود که تأثیر منفی بر کیفیت سطح و عمر ابزار دارند. از این رو، بهبود مورفولوژی براده نقش کلیدی در ارتقای قابلیت ماشینکاری این کامپوزیت‌ها ایفا می‌کند. در پژوهش حاضر، اثر پارامترهای ماشینکاری (سرعت برش، نرخ پیشروی، عمق برش و شرایط روانکاری) و نقش افزودنی قلع (Sn) بر مورفولوژی براده در تراشکاری کامپوزیت Al-Mg₂Si بررسی شد. برای این منظور، دو نوع کامپوزیت (با و بدون قلع) به روش ریخته‌گری درجا تولید و با استفاده از طرح آزمایش تاگوچی L16 مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که سرعت برش بیشترین اثر را بر طول و نوع براده دارد، در حالی که نرخ پیشروی و عمق برش در مقادیر بحرانی موجب تغییر رفتار براده‌برداری شدند. آنالیز SEM-EDS بیانگر وقوع سایش نفوذی و انتقال عناصر ابزار (W، Co و C) به سطح براده‌ها بود که با انتخاب پارامترهای بهینه کنترل گردید. علاوه بر این، افزودن ۱٪ قلع موجب کاهش میانگین طول براده و تشکیل براده‌هایی یکنواخت‌تر و پایدارتر شد. در مجموع، ترکیب اصلاح آلیاژی و انتخاب شرایط بهینه ماشینکاری به‌طور مؤثری موجب بهبود فرایند براده‌برداری، کاهش سایش ابزار و ارتقای قابلیت ماشینکاری کامپوزیت‌های Al-Mg₂Si گردید.

Investigation of chip morphology in machining of aluminum matrix composites containing 1% tin

Mohammad Hasanifard, Reza Azarafza*, Mohammad Hosein Alaee, Moslem Najafi

Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: azarmut@mut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 29 August 2025

Accepted: 18 November 2025

Keywords:

Chip

Turning

Machining Parameters

Aluminum Matrix Composites

Tin (Sn)

Abstract

Aluminum matrix composites (AMCs) are widely used in aerospace, automotive, and advanced engineering applications due to their high specific strength, wear resistance, and thermal stability. However, the presence of hard reinforcing particles makes their machining challenging, often leading to the formation of discontinuous, serrated, or unstable chips, which negatively affect surface quality and tool life. Therefore, improving chip morphology is crucial for enhancing the machinability of these materials. In this study, the effects of machining parameters (cutting speed, feed rate, depth of cut, and lubrication conditions) and the role of tin (Sn) addition on chip morphology during the turning of Al-Mg₂Si composites were investigated. Two types of composites (with and without Sn) were fabricated via in-situ casting and machined under various conditions using a Taguchi L16 orthogonal array. The results showed that cutting speed had the most significant effect on chip type and length, while feed rate and depth of cut exhibited critical influences at specific levels. SEM-EDS analysis revealed diffusion wear with the transfer of tool elements (W, Co, and C) onto the chip surface, which was mitigated under optimized machining conditions. Furthermore, the addition of 1 wt.% Sn reduced average chip length and promoted more uniform and stable chip formation. Overall, alloy modification combined with optimized machining parameters effectively improved the chip formation process, reduced tool wear, and enhanced the machinability of Al-Mg₂Si composites.

Please cite this article using:

Hasanifard M, Azarafza R, Alaee MH, Najafi M. Investigation of chip morphology in machining of aluminum matrix composites containing 1% tin. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Oct 23;12(8):20-37. doi: 10.22034/ijme.2025.543922.2130 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه فلزی^۱ به‌عنوان یکی از مواد مهندسی پیشرفته، به‌دلیل خواص مکانیکی مطلوب و قابلیت‌های مهندسی بالا، توجه بسیاری را در صنایع گوناگون از جمله خودروسازی، هوافضا و تجهیزات الکترونیکی به خود جلب کرده‌اند. این دسته از مواد، به‌ویژه در ساخت قطعاتی مانند اجزای موتور، میل‌گاردان، سیستم‌های ترمز، پوسته‌های پمپ و کمپرسورهای فشار بالا کاربرد گسترده‌ای دارند [۱، ۲]. یکی از مهم‌ترین مزایای کامپوزیت‌های زمینه فلزی نسبت به فلزات متداول صنعتی، امکان بهینه‌سازی خواص مکانیکی و فیزیکی از طریق ترکیب آلیاژ زمینه با فازهای تقویت‌کننده است. این فازهای تقویت‌کننده می‌توانند به‌صورت ذرات، الیاف کوتاه، ویسکر یا رشته‌های پیوسته به ساختار زمینه افزوده شوند [۳].

با گسترش روزافزون صنایع پیشرفته، استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی در کاربردهای صنعتی رشد قابل توجهی یافته است. با این حال، حضور ذرات سخت، به‌ویژه فازهای سرامیکی در این دسته از مواد، فرایند ماشینکاری آن‌ها را با پیچیدگی‌هایی همراه کرده است. یکی از چالش‌های اصلی، شکل‌گیری براده‌هایی با ساختار نامطلوب مانند براده‌های دندانه‌دار، ناپیوسته یا خردشده است که ناشی از رفتار شکست‌پذیر ذرات تقویت‌کننده و تنش‌های موضعی بالا در ناحیه برش است. این شرایط علاوه بر کاهش پایداری فرایند، می‌تواند منجر به عملکرد نامنظم ابزار و ایجاد ناپیوستگی در انتقال حرارت و نیرو شود. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که برای ماشینکاری این کامپوزیت‌ها عمدتاً از ابزارهای کاربیدی و ابزارهای الماس چندبلوری^۲ استفاده شده است، اما همچنان چالش‌های خوردگی و سایش ابزار، به‌ویژه در سرعت‌های برشی بالا و نرخ‌های پیشروی متغیر، به‌عنوان موضوعی اساسی باقی مانده است [۳-۵]. در این میان، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت‌شده با ذرات سرامیکی، به‌ویژه کاربید سیلیسیم (SiC) و سیلیسید منیزیم (Mg₂Si)، به‌دلیل برخورداری از خواصی چون استحکام ویژه بالا، سختی زیاد، مقاومت مطلوب در برابر سایش، پایداری حرارتی و ضریب انبساط حرارتی پایین، توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند [۶].

وجود ذرات سخت سرامیکی در ساختار این مواد، فرایند ماشینکاری را با چالش‌هایی جدی همراه ساخته و موجب افزایش تنش‌های موضعی، تغییر مکانیزم‌های براده‌برداری و پیچیده شدن رفتار جریان ماده در ناحیه تماس ابزار و قطعه می‌شود. درحالی‌که بخش قابل توجهی از مطالعات پیشین بر بررسی فرایندهای فرزکاری و سایش ابزار متمرکز بوده‌اند، توجه به رفتار براده‌برداری و شکل‌گیری براده‌ها در فرایند تراشکاری، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره ماهیت برهم‌کنش ابزار-ماده ارائه دهد [۷، ۸]. براده‌ها به‌عنوان یکی از محصولات مستقیم ماشینکاری، بازتابی از وضعیت تنش، تغییر شکل پلاستیک، و شرایط حرارتی حاکم بر منطقه برش هستند. بررسی شکل‌گیری براده امکان شناسایی نوع براده (نظیر براده پیوسته، ناپیوسته، دندانه‌دار و خردشده)، شدت تغییر شکل، و حتی رفتار ناهمسان ماده در طول برش را فراهم می‌سازد. این اطلاعات، علاوه بر کمک به بهینه‌سازی شرایط ماشینکاری، نقش مهمی در کنترل کیفیت سطح، کاهش سایش ابزار و پیش‌بینی عمر آن ایفا می‌کنند.

با وجود اهمیت بالای این موضوع، مطالعات محدودی به بررسی ساختار و شکل براده در حین تراشکاری کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم پرداخته‌اند. از این‌رو، تحلیل دقیق شکل‌گیری براده می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای درک بهتر مکانیزم‌های غالب در ماشینکاری این دسته از مواد به کار رود و مسیر را برای بهینه‌سازی ابزار، پارامترها و شرایط فرایند هموار سازد [۹، ۱۰]. به‌منظور بهبود قابلیت ماشینکاری کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم، بررسی تأثیر پارامترهای برشی و استفاده از عناصر آلیاژی مناسب امری ضروری است. یکی از عناصر مؤثر در این زمینه، قلع است که به‌دلیل نقطه ذوب پایین، رفتار روان‌ساز موضعی و خواص اصطکاکی مطلوب، می‌تواند نقش قابل توجهی در تسهیل فرایند براده‌برداری، بهبود شکل‌گیری براده، کاهش سایش ابزار و ارتقای کیفیت ماشینکاری ایفا کند. افزودن قلع به ساختار کامپوزیت، با تغییر در ریزساختار منطقه برش، می‌تواند جریان ماده را در حین برش کنترل کرده و منجر به کاهش تنش‌های مکانیکی و حرارتی در ناحیه تماس ابزار شود.

در یک مطالعه تجربی توسط سوگوابر و همکاران [۱۱، ۱۲]، رفتار سایش ابزار در فرزکاری کامپوزیت Al520 تقویت‌شده با ذرات SiC و افزودنی‌های بیسموت و قلع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن قلع، به‌دلیل خواص روان‌ساز و دمای ذوب پایین، نقش مؤثری در کاهش سایش ابزار ایفا می‌کند. در حالی‌که کامپوزیت‌های Al-SiC به‌واسطه سختی بسیار بالای ذرات SiC، سایش ساپنده شدید و پایداری حرارتی بیشتری ایجاد می‌کنند، کامپوزیت Al-Mg₂Si مورد مطالعه در پژوهش حاضر دارای ذرات

¹ MMCs

² PCD

سختی است که اگرچه ماهیتی شکننده دارند، اما رفتار شکست‌پذیر آن‌ها در حین ماشینکاری متفاوت است. این تفاوت در نوع فاز تقویت‌کننده، به همراه پارامترهای ماشینکاری و ترکیب آلیاژی، می‌تواند منجر به بروز مکانیزم‌های متفاوتی در سایش ابزار و شکل‌گیری براده در دو نوع کامپوزیت شود.

امامی و همکاران [۱۳] اثر مقادیر مختلف قلع را بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت Mg_2Si -15% Al مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزودن ۵ درصد وزنی قلع منجر به کاهش چشمگیر اندازه ذرات اولیه Mg_2Si از حدود ۴۵ به ۸ میکرومتر شده و در نتیجه بهبود قابل توجهی در استحکام کششی نهایی و افزایش درصد ازدیاد طول ایجاد کرده است. این تغییرات عمدتاً ناشی از تشکیل فاز بین‌فلزی Mg_2Sn بوده که به‌عنوان هسته‌زای ناهمگن برای رسوب Mg_2Si عمل کرده و موجب اصلاح ساختار می‌شود. همچنین، حضور قلع باعث افزایش زمان انجماد، کاهش دمای رشد و تغییر رفتار شکست از حالت ترد به حالت نسبتاً چقرمه شده است.

ماشک و همکاران [۱۴] رفتار تشکیل براده و شکل‌گیری آن را در فرایند تراشکاری کامپوزیت آلومینیوم-کاربید سیلیسیم ($A359/20\%wt SiC$) تحت شرایط مختلف ماشینکاری مرطوب بررسی کردند. آن‌ها از ابزار برشی کاربیدی بدون پوشش استفاده کرده و اثر استراتژی‌های مختلف سرمایه‌شامل خشک، مرطوب را بر ویژگی‌های براده ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از خنک‌کاری مرطوب موجب کاهش طول براده‌ها و کاهش پیچ‌خوردگی آن‌ها در مقایسه با شرایط خشک می‌شود. همچنین، تحلیل‌های ریزساختاری نشان داد که توزیع ذرات SiC در براده‌های تولید شده تحت شرایط مرطوب یکنواخت‌تر بوده است. در این شرایط، نسبت تراکم براده تا ۲۵٪ و زاویه برش تا ۱۶٪ افزایش یافت. در نهایت مشخص شد که جدایش براده عمدتاً از طریق ایجاد و گسترش ریزترک‌ها در فصل مشترک زمینه-ذره انجام می‌شود که به شکست بهتر براده و ایجاد لبه‌های ریش‌ریش در آن منجر می‌گردد.

در این پژوهش، دو نوع کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت‌شده با ذرات Mg_2Si ساخته شدند؛ یکی بدون افزودنی و دیگری حاوی عنصر قلع به‌عنوان افزودنی اصلاح‌کننده. این کامپوزیت‌ها با هدف بررسی مورفولوژی براده تحت شرایط مختلف ماشینکاری (تراشکاری) شامل چهار سطح از سرعت برش، نرخ پیشروی و عمق برش مورد مطالعه قرار گرفتند. عملیات ماشینکاری در دو حالت خشک و مرطوب و بر اساس طرح آزمایش تاگوچی با آرایه L_{16} اجرا شد.

وجه تمایز این تحقیق تمرکز بر تحلیل دقیق براده‌ها است؛ بدین ترتیب که علاوه بر اندازه‌گیری طول و بررسی شکل‌گیری براده‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای مشاهده ریزساختار سطح براده و از آنالیز عنصری EDS برای شناسایی ترکیب شیمیایی آن‌ها استفاده شد. این رویکرد امکان بررسی مکانیزم‌های سایش نفوذ، شکست و چگونگی شکل‌گیری براده را با دقت بالاتری فراهم آورد.

با توجه به محدودیت مطالعات پیشین که اثر هم‌زمان افزودن قلع و شرایط ماشینکاری را بر مورفولوژی، طول و ترکیب براده در کامپوزیت‌های $Al-Mg_2Si$ ارزیابی کرده باشند، یافته‌های این پژوهش می‌تواند بخشی از خلأ علمی موجود را پوشش داده و دیدگاه‌های تازه‌ای در زمینه بهینه‌سازی فرایند ماشینکاری این مواد ارائه دهد.

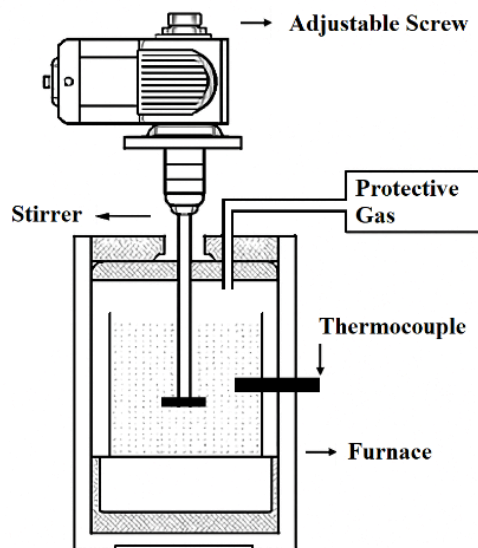
۲- مواد و تجهیزات

نمونه‌های کامپوزیتی مورد استفاده در این پژوهش به روش ریخته‌گری تهیه شدند. برای تنظیم ترکیب شیمیایی آلیاژ، از آلومینیوم-سیلیسیم تجاری، منیزیم و آلومینیوم خالص به‌عنوان مواد اولیه استفاده گردید. فرایند ذوب درون بوتله‌ای از جنس کاربید سیلیسیم و با استفاده از کوره مقاومتی انجام شد. دمای ذوب در طول فرایند در محدوده 750 ± 5 درجه سانتی‌گراد کنترل گردید. شماتیک سیستم ریخته‌گری و سیستم ذوب القایی مورد استفاده برای تولید کامپوزیت‌های درجا در شکل ۱ ارائه شده است.

عنصر آلیاژی قلع به‌صورت خالص و با درصد وزنی ۱٪ به مذاب افزوده شد تا به‌عنوان عامل اصلاح‌کننده ساختار عمل کند. عملیات انحلال و همگن‌سازی به‌مدت ۱۵ دقیقه ادامه یافت که طی آن، مذاب به‌طور پیوسته هم‌زده شده و سطح آن به‌منظور حذف ناخالصی‌ها پاک‌سازی شد. در مرحله بعد، مذاب به‌درون یک قالب سرامیکی استوانه‌ای با قطر ۳۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر ریخته شد. این قالب پیش‌تر به‌مدت ۱۵ دقیقه تا دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم شده بود [۱۵].



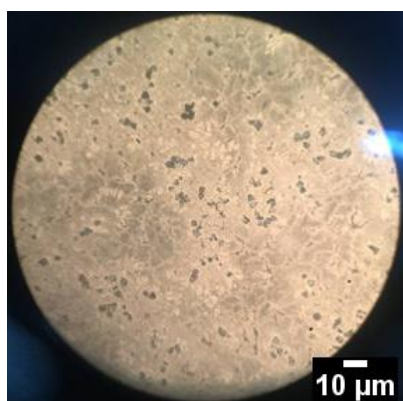
(ب)



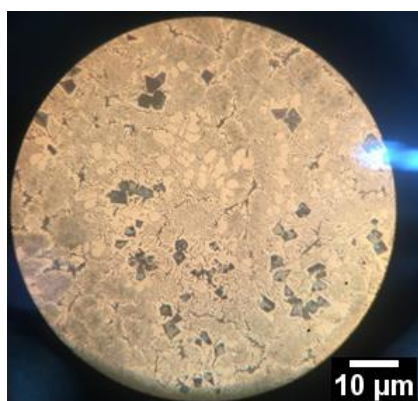
(الف)

شکل ۱ الف) شماتیک سیستم ریخته‌گری و ب) سیستم ذوب القایی مورد استفاده برای تولید کامپوزیت درجا پایه آلومینیوم

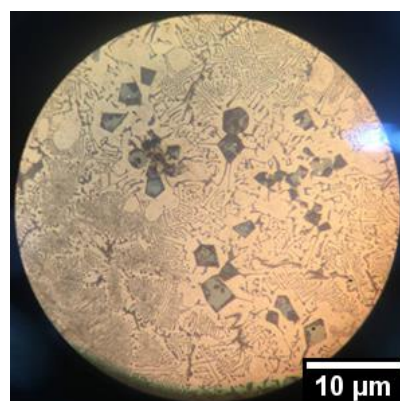
به‌منظور اطمینان از توزیع یکنواخت ذرات و دستیابی به کیفیت مطلوب در ساخت نمونه‌های کامپوزیتی، بخشی از کامپوزیت برش داده شد و پس از پولیش، برای انجام بررسی‌های ساختاری آماده گردید. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و در بزرگ‌نمایی $\times 400$ انجام شد. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، به‌جز برخی نواحی محدود که در آن‌ها پدیده تجمع ذرات دیده شد - که امری نسبتاً اجتناب‌ناپذیر در چنین ترکیباتی محسوب می‌شود - توزیع ذرات در سراسر ساختار کامپوزیت به‌صورت یکنواخت و همگن گزارش شد. آنالیز کوانتومتری نمونه‌ها در شرایط محیطی کنترل‌شده شامل دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۳۸٪ انجام شد. ترکیب شیمیایی نهایی کامپوزیت‌های تولیدشده در جدول ۱ ارائه شده است.



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۲ تصویر سطح اچ شده کامپوزیت‌های پایه آلومینیوم در سه بزرگنمایی الف) ۴۰۰، ب) ۲۰۰ و ج) ۱۰۰ برابر

جدول ۱ درصد وزنی عناصر در کامپوزیت‌های پایه آلومینیوم

کامپوزیت	Al	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Cr
Al-15%Mg ₂ Si	پایه	9.53	5.61	0.21	0.17	0.12	0.13	0.01
Al-15%Mg ₂ Si + 1%Sn	پایه	9.42	5.43	0.15	0.12	0.14	0.15	0.03

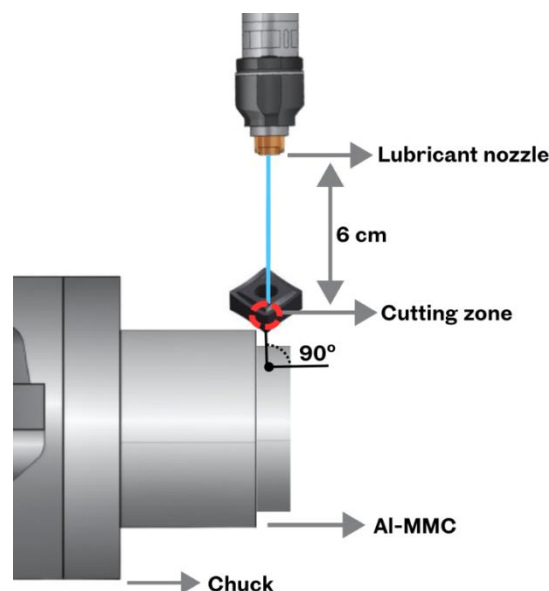
فرایند ماشینکاری با استفاده از دستگاه ماشین‌تراش مدل SN71C ساخت شرکت توس^۱ (جمهوری چک) انجام شد. ابزار برشی مورد استفاده، از نوع تنگستن کارباید پوشش‌دار (TiAlN) بوده که توسط شرکت بوهرلیت^۲ (اتریش) تولید شده و مطابق با استاندارد ISO 3685:1993 انتخاب گردید. این ابزار دارای هندسه مربعی با کد تجاری CNMG-120408-MS و کد اختصاصی LC415Z(HC-S15) بر اساس سیستم کدگذاری شرکت سازنده است. شکل ۳ تصویر شماتیک از نحوه قرارگیری المان‌های ماشینکاری را به همراه چیدمان ماشینکاری در حالت مرطوب و خشک نشان داده است. همچنین، مشخصات فیزیکی نمونه‌های کامپوزیتی و جزئیات مربوط به نحوه نصب آن‌ها در ماشین‌تراش در جدول ۲ ارائه شده است.



(ب)



(ج)



(الف)

شکل ۳ الف) شماتیک از نحوه قرارگیری المان‌های ماشینکاری، ب) چیدمان ماشینکاری در حالت مرطوب و ج) خشک

جدول ۲ مشخصات فیزیکی کامپوزیت‌ها و نحوه قرارگیری آن‌ها روی دستگاه تراش

پارامتر	مقدار (میلی‌متر)
طول قطعه‌کار	۱۵۰
قطر قطعه‌کار	۳۰
طول منطقه ماشینکاری شده در هر آزمایش	۱۸
طول درگیری قطعه با فک سه‌نظام	۳۰

برای بررسی دقیق مورفولوژی براده‌های تولیدشده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی و گاتسکن^۳ استفاده شد (شکل ۴). به منظور شناسایی ترکیب شیمیایی و تحلیل پدیده نفوذ عناصر در ساختار براده‌ها، از سامانه طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس متصل به SEM مطابق با پیکربندی نشان‌داده شده در شکل ۴ بهره‌گیری گردید. این ترکیب امکان تحلیل هم‌زمان ریزساختار سطحی و ترکیب عنصری براده‌ها را فراهم ساخت و به درک بهتر مکانیزم‌های شکل‌گیری و تغییرات شیمیایی آن‌ها کمک کرد. همچنین برای اندازه‌گیری طول براده‌های ایجادشده، از کولیس دیجیتال میتوتویو^۴ ساخت ژاپن با رزولوشن^۵ ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد.

¹ Tos

² Böhlerit

³ Vega Tescan2

⁴ Mitutoyo

⁵ Resolution



(ب)



(ج)



(الف)

شکل ۴ الف) میکروسکوپ الکترونی روبشی و گاتسکن ۲، ب) پیکربندی تجهیزات آنالیز براده و ج) پیکربندی سم‌ایکس تحلیل شیمیایی (EDS)

۳- طراحی آزمایش

جزئیات پارامترهای ماشینکاری به کاررفته در این تحقیق در جدول ۳ آمده است. سطوح انتخابی برای سرعت دورانی، نرخ پیشروی و عمق برش با توجه به توصیه‌های فنی ارائه شده از سوی تولیدکننده ابزار برشی تعیین شدند. در شرایط ماشینکاری مرطوب، از روانکار با پایه گیاهی (کرچک و پالم) به منظور بهبود روانکاری و کاهش اصطکاک در ناحیه برش استفاده شد [۱۶، ۱۷].

برای طراحی مجموعه آزمایش‌ها، از روش تاگوچی با آرایه متعامد L16 بهره گرفته شد تا ضمن کاهش تعداد آزمون‌ها، تنوع مؤثر پارامترها حفظ شود [۱۸]. در این پژوهش، تعداد ۱۶ آزمایش اصلی برای هر یک از دو نوع کامپوزیت (کامپوزیت بدون افزودنی قلع و کامپوزیت حاوی ۱ درصد وزنی قلع) طراحی و اجرا شد که در مجموع ۳۲ آزمایش اولیه را شامل می‌شد. به منظور اطمینان از صحت نتایج و کاهش احتمال خطای تصادفی، تمامی این آزمایش‌ها یک بار دیگر تکرار گردید و مقادیر میانگین نتایج به‌عنوان داده نهایی در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این فرایند تکرار مضاعف موجب افزایش دقت آماری و اعتبار نتایج گردید. تحلیل داده‌ها و پردازش آماری نیز با استفاده از نرم‌افزار تخصصی مینی‌تب^۱ انجام گرفت.

جدول ۳ پارامترهای مورد آزمایش و سطوح هریک از آنها

سطوح				فاکتورها	ردیف
سطح ۴	سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱		
		مرطوب	خشک	روانکاری	۱
۱۰۰۰	۷۱۰	۵۰۰	۳۶۰	سرعت دورانی (N) (rpm)	۲
۰/۲۸	۰/۲	۰/۱۲	۰/۰۸	سرعت پیشروی (f) (mm/rev)	۳
۲	۱,۵	۱	۰/۵	عمق برش (d) (mm)	۴

^۱ Minitab

سرعت‌های دورانی پایین‌تر، تولید حرارت کاهش یافت و ماتریس آلومینیوم سخت‌تر باقی ماند. این سختی، همراه با ماهیت ترد ذرات Mg_2Si ، باعث شد که ماده در حین برش راحت‌تر دچار شکست شود و در نتیجه، براده‌های ناپیوسته تولید گردد. همچنین، کاهش حرارت باعث محدود شدن خاصیت پلاستیسیته ماتریس شد که این موضوع نیز به شکل‌گیری براده‌های کوتاه‌تر و خردشده در شرایط سرعت دورانی پایین کمک می‌کند [۲۰].

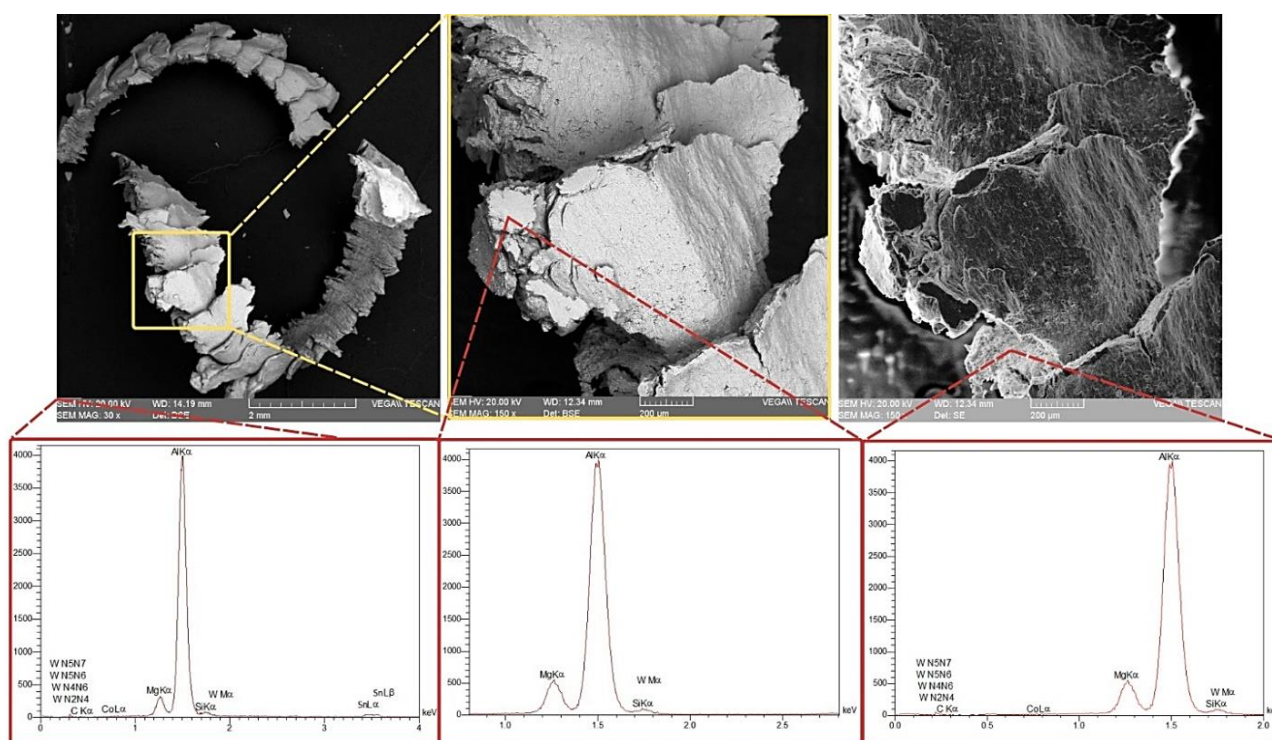
ماشینکاری خشک بیشتر از ماشینکاری مرطوب به تشکیل براده‌های مارپیچی کمک کرده است. افزایش تمایل به خمیدگی براده یا شکل‌گیری براده‌های مارپیچی در شرایط ماشینکاری خشک، به‌ویژه در کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم تقویت‌شده با ذرات Mg_2Si ، می‌تواند به تفاوت در تولید حرارت و اصطکاک در ناحیه تماس ابزار-براده نسبت داده شود. در ماشینکاری خشک، نبود روانکاری منجر به افزایش اصطکاک بین ابزار برشی و براده می‌شود. این اصطکاک بیشتر، حرارت بالاتری در سطح تماس ایجاد کرد که باعث انبساط حرارتی و نرم شدن ماتریس آلومینیوم می‌گردد [۲۱]. با نرم شدن غیر یکنواخت ماده، تغییر شکل پلاستیک بیشتری رخ داد و در نتیجه، براده‌ها به صورت مارپیچی و پیچشی شکل گرفتند. از سوی دیگر، در ماشینکاری مرطوب، روانکاری اصطکاک را کاهش داده و به دفع مؤثرتر حرارت کمک کرده است [۲۲]. این امر موجب تغییر شکل کنترل‌شده‌تر ماتریس آلومینیوم و محدود شدن تمایل به خمیدگی براده شد و در نتیجه، تشکیل براده‌های مارپیچی کمتر مشهود بود. همچنین، اثر خنک‌کنندگی سیال روانکار به حفظ تردی ذرات Mg_2Si کمک کرده است که این امر نیز با افزایش شکست ترد و تولید قطعات کوتاه‌تر براده، از شکل‌گیری براده‌های مارپیچی جلوگیری کند.

در عمق‌های برش کمتر، تمایل بیشتری به تشکیل براده‌های ذره‌ای مشاهده شد. در این شرایط، نیروی برشی اعمال‌شده بر ماده کاهش یافته که منجر به کاهش میزان تغییر شکل پلاستیک می‌گردد. این میزان محدود تغییر شکل، انرژی کافی برای نرم شدن قابل توجه ماتریس آلومینیومی را فراهم نکرد، درحالی‌که این نرم‌شدگی می‌توانست به تشکیل براده‌های پیوسته کمک کند. در عوض، حضور ذرات سخت Mg_2Si موجب شکست ماده شده و در نتیجه، براده‌های ریز و ذره‌ای تولید می‌کند [۲۰]. علاوه بر این، عمق برش کم، گرمای کافی در ناحیه تماس ابزار-براده ایجاد نکرد تا ماتریس آلومینیومی به‌طور مؤثری نرم شود. کاهش تولید حرارت، پلاستیسیته ماتریس را محدود کرده و آن را مستعد شکست ترد به جای جریان نرم می‌کند [۲۲]. این ترکیب از تغییر شکل محدود و گرمای ناکافی در عمق‌های برش کمتر، تشکیل براده‌های ذره‌ای را به‌جای براده‌های پیوسته یا مارپیچ افزایش داده و منجر به افزایش براده‌های خردشده تحت این شرایط شد.

در نرخ‌های پیشروی بالاتر، تمایل بیشتری به تشکیل براده‌های دندان‌دار (اره‌ای) مشاهده شد. این پدیده در نرخ پیشروی ۰,۰۸ میلی‌متر بر دور نیز دیده شد، اما در نرخ پیشروی ۰/۱۲ میلی‌متر بر دور که به‌عنوان مقدار بهینه شناسایی شد، این پدیده رخ نداد. در نرخ‌های پیشروی بالا، درگیری بیشتر ابزار برشی با ماده منجر به افزایش نیروهای برشی و نرخ تغییر شکل می‌شود [۲۱]. این سطح بالاتر از تغییر شکل معمولاً منجر به تشکیل براده‌های دندان‌دار می‌شود، زیرا وجود ذرات سخت Mg_2Si ، تغییر شکل پلاستیک ماده را با مشکل مواجه می‌کند. تعامل بین ابزار برشی و این ذرات، پروفیل براده‌های دندان‌دار ایجاد کرده و منجر به شکل مشخصه اره‌ای شد. در مقابل، در نرخ پیشروی بهینه ۰/۱۲ میلی‌متر بر دور، شرایط برش تعادلی میان نیروهای برشی و تغییر شکل ماده ایجاد کرد. این تعادل، تشکیل براده‌ای یکنواخت‌تر را تسهیل کرده و تمایل به تشکیل براده‌های دندان‌دار را کاهش می‌دهد [۲۳]. کاهش نیروهای برشی در این نرخ پیشروی، یکپارچگی ماتریس آلومینیومی را حفظ کرده و باعث ایجاد جریان نرم‌تر و پیوسته‌تر براده به جای براده‌های خردشده شد.

در نرخ‌های پیشروی کمتر، مانند ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور، شرایط تشکیل براده به‌طور قابل توجهی متفاوت از نرخ‌های پیشروی بالاتر بود. در این نرخ پایین‌تر، زمان تماس طولانی‌تر ابزار برشی با ماده، منجر به افزایش تولید حرارت در ناحیه برش شد. این افزایش دما، معمولاً شکل‌پذیری ماده را تقویت کرده و مکانیزم تغییر شکل پلاستیک را ارتقا می‌بخشد [۲۳]. با این حال، حضور ذرات سخت Mg_2Si همچنان بر فرایند تشکیل براده تأثیرگذار بود. در این شرایط، ماده به دلیل شکنندگی ذاتی Mg_2Si ، تمایل به شکست به‌جای جریان نرم در اطراف این ذرات داشت. در نتیجه، درحالی‌که تشکیل براده در این نرخ پیشروی به‌طور کلی پیوسته‌تر بود، تنش‌های ناشی از عمل برش و حضور ذرات سخت، موجب ایجاد نقاط ضعف موضعی شدند که به ایجاد پروفیل‌های براده‌ای نامنظم، از جمله برخی ویژگی‌های دندان‌دار، منجر شد.

شکل ۶ تصویر پخش الکترون برگشتی و نمودارهای طیف‌سنجی انرژی اشعه ایکس مربوط به فازهای مختلف تشکیل شده روی براده را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها بیانگر حضور عناصر تنگستن، کبالت و کربن بر سطح براده‌ها است که حاکی از وقوع سایش ساینده در حین فرایند ماشینکاری کامپوزیت Al-Mg₂Si است. این پدیده به‌ویژه در براده‌های دندانه‌دار نسبت به سایر انواع براده مشهودتر بوده است. بررسی‌های انجام شده نشان داد که مکانیزم تشکیل این نوع براده، تحت تأثیر نواحی برش موضعی و تنش‌های سیکلی شدیدی بوده که طی فرایند تغییر شکل پلاستیک متناوب ایجاد شده است. این تنش‌های سیکلی منجر به افزایش اصطکاک و ایجاد گرادیان حرارتی قابل توجه در فصل مشترک ابزار-براده شده که در نهایت به نفوذ و انتقال ذرات ابزار، شامل تنگستن، کبالت و کربن، به سطح براده منجر می‌شود [۲۴]. این نتایج حاکی از آن است که مکانیزم غالب سایش ابزار در این شرایط از براده، سایش ساینده بوده که مستقیماً تحت تأثیر پارامترهای ماشینکاری و رفتار براده‌برداری این نوع کامپوزیت قرار داشته است.

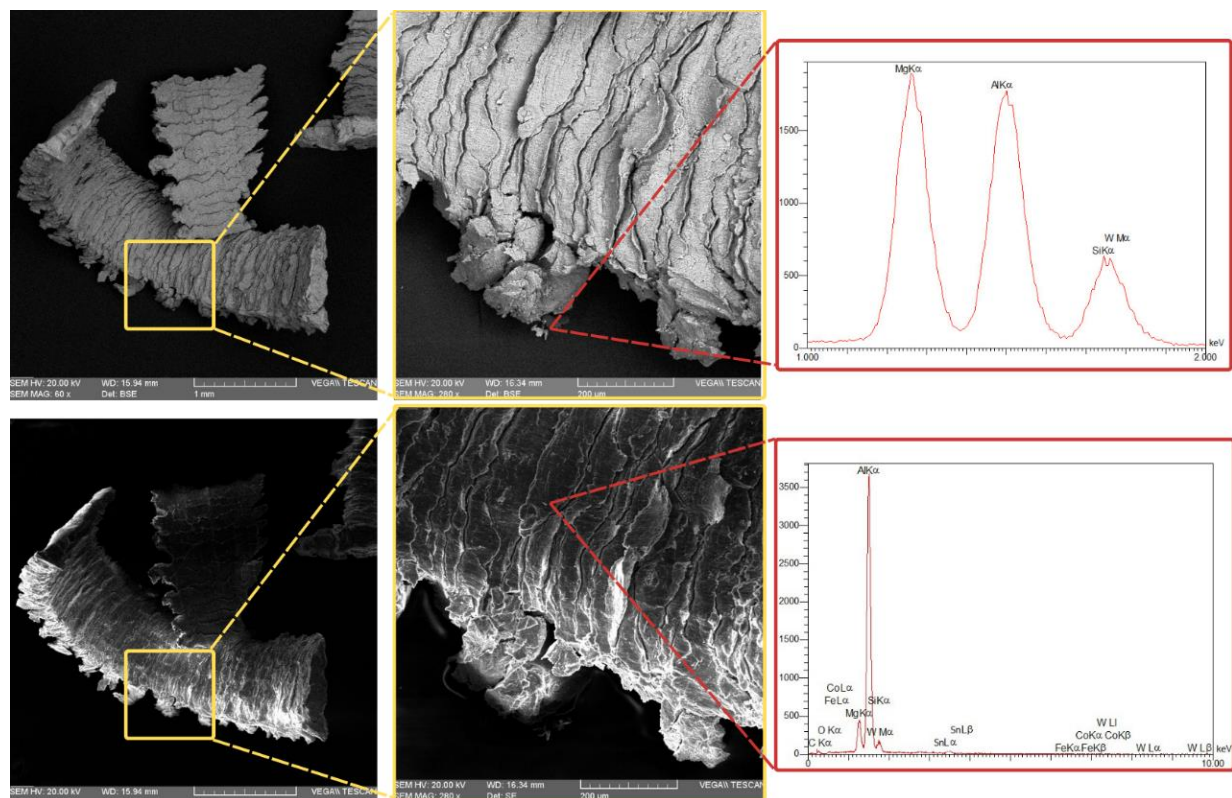


شکل ۶ تصویر ریزساختار از براده و نمودارهای طیف‌سنجی انرژی اشعه ایکس از فازهای مختلف تشکیل شده روی براده در شرایط ماشینکاری: محیط خشک، نرخ پیشروی $f = 0.28 \text{ mm/rev}$ ، عمق برش $d = 1 \text{ mm}$ و سرعت دورانی $N = 710 \text{ rpm}$

تصاویر الکترونی برگشتی و ثانویه^۱ به‌عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند در تحلیل ریزساختار مواد، دقت بالایی در بررسی ویژگی‌های میکروسکوپی سطحی و شناخت بهتر مکانیزم‌های شکست و سایش ابزار در فرایندهای ماشینکاری دارند. استفاده از این تصاویر در ترکیب با آنالیز طیف‌سنجی انرژی اشعه ایکس می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در زمینه شناسایی ترکیب شیمیایی و نحوه انتقال مواد از ابزار به براده‌ها ارائه دهد.

در این پژوهش، با توجه به اهمیت این تکنیک‌ها در دقت تحلیل‌ها، شکل ۷ به بررسی نتایج تصاویر الکترونی برگشتی و ثانویه و نمودارهای طیف‌سنجی انرژی اشعه ایکس از فازهای مختلف تشکیل شده روی براده‌ها پرداخته است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، حتی در شرایط ماشینکاری با سرعت‌های پایین، شکست ذرات Mg₂Si توسط ابزار مشاهده شد. این شکست، به‌ویژه در نواحی دندانه‌دار براده‌ها، منجر به سایش نفوذی شد که به‌وضوح در انتقال عناصر تنگستن، کبالت و کربن (که از ابزار تنگستن کارباید استخراج شده‌اند) به سطح براده‌ها قابل مشاهده است. این پدیده نشان‌دهنده تأثیر پارامترهای ماشینکاری در فرایند براده‌برداری و نقش سایش نفوذی در تغییرات ساختاری براده‌ها است.

¹ Backscattered and Secondary Electron Images



شکل ۷ تصویر ریزساختار از الکترون‌های برگشتی و ثانویه و نمودارهای طیف‌سنجی انرژی اشعه ایکس از فازهای مختلف تشکیل شده روی براده در شرایط ماشینکاری: مرطوب، نرخ پیشروی $f = 0.12 \text{ mm/rev}$ ، عمق برش $d = 1 \text{ mm}$ و سرعت دورانی $N = 360 \text{ rpm}$

به‌منظور تحلیل کمی طول براده‌های ایجاد شده در شرایط مختلف ماشینکاری، از کولیس دیجیتالی با دقت 0.01 میلی‌متر استفاده شده است. این سطح دقت امکان ثبت تغییرات جزئی در اندازه براده‌ها را فراهم کرده و موجب افزایش اعتبار داده‌های به‌دست‌آمده گردیده است. برای افزایش قابلیت اطمینان نتایج، فرایند اندازه‌گیری به‌صورت چندمرحله‌ای انجام گرفته و میانگین مقادیر ثبت شده در چندین نمونه براده محاسبه شده است.

داده‌های حاصل از این اندازه‌گیری‌ها در جدول ۴ ارائه شده است که شامل مقادیر دقیق طول براده برای هر یک از آزمایش‌ها در قالب ماتریس طراحی آزمایش L_{16} روش تاگوچی می‌باشد. استفاده از این ماتریس، امکان بررسی تأثیر مستقل و ترکیبی پارامترهای ورودی نظیر سرعت برشی، عمق برش، نرخ پیشروی و شرایط روانکاری را بر طول براده فراهم ساخته است. تحلیل این داده‌ها، اطلاعات ارزشمندی درباره نحوه تأثیرگذاری پارامترهای فرایند بر تشکیل براده ارائه داده و درک بهتری از مکانیزم براده‌برداری در کامپوزیت Al-Mg₂Si به‌دست داده است.

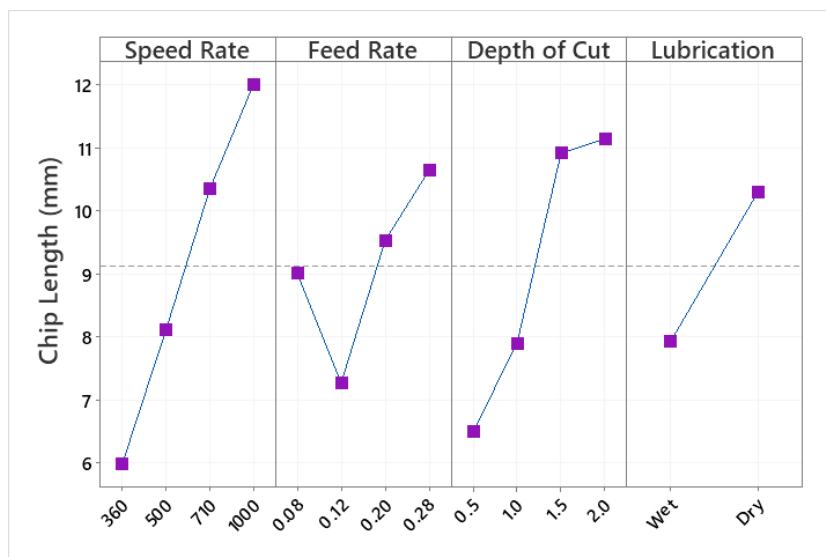
علاوه بر این، از طریق روش تاگوچی، مقادیر بهینه پارامترهای ماشینکاری برای دستیابی به طول براده مطلوب تعیین گردیده و سهم هر یک از متغیرهای ورودی در تغییرات اندازه براده مشخص شده است. این نتایج، نقش کلیدی هر پارامتر را در ایجاد الگوی براده‌برداری روشن ساخته و امکان بهینه‌سازی فرایند ماشینکاری را در جهت کاهش مشکلات ناشی از تشکیل براده‌های نامطلوب فراهم کرده است.

شکل ۸ نتایج حاصل از تحلیل تاگوچی را برای اندازه براده تولید شده تحت شرایط مختلف ماشینکاری ارائه داده است. این نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای ماشینکاری، از جمله سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش و استراتژی روانکاری، تأثیر مستقیمی بر طول و شکل براده داشته‌اند.

جدول ۵ سهم نسبی هر یک از این پارامترها را در تغییرات اندازه براده، همراه با مقدار ضریب تعیین ارائه کرده است. این یافته‌ها نقش کلیدی در بهینه‌سازی فرایند ماشینکاری دارند، زیرا طول براده می‌تواند شاخص مهمی برای ارزیابی نوع تغییر شکل ماده، میزان تنش‌های اعمال شده در منطقه برش و حتی نحوه سایش ابزار باشد.

جدول ۴ نتایج طول براده ایجاد شده به همراه ماتریس طراحی آزمایش‌ها

شماره آزمایش	روانکاری	پارامترهای ماشینکاری			نتایج
		عمق برش (mm) (d)	سرعت پیشروی (mm/rev) (f)	سرعت دورانی (rpm) (N)	
۱	مرطوب	۰/۵	۰/۰۸	۳۶۰	طول براده (mm)
۲	مرطوب	۱	۰/۱۲	۳۶۰	
۳	خشک	۱/۵	۰/۲	۳۶۰	
۴	خشک	۲	۰/۲۸	۳۶۰	
۵	خشک	۱	۰/۰۸	۵۰۰	
۶	خشک	۰/۵	۰/۱۲	۵۰۰	
۷	مرطوب	۲	۰/۲	۵۰۰	
۸	مرطوب	۱/۵	۰/۲۸	۵۰۰	
۹	مرطوب	۱/۵	۰/۰۸	۷۱۰	
۱۰	مرطوب	۲	۰/۱۲	۷۱۰	
۱۱	خشک	۰/۵	۰/۲	۷۱۰	
۱۲	خشک	۱	۰/۲۸	۷۱۰	
۱۳	خشک	۲	۰/۰۸	۱۰۰۰	
۱۴	خشک	۱/۵	۰/۱۲	۱۰۰۰	
۱۵	مرطوب	۱	۰/۲	۱۰۰۰	
۱۶	مرطوب	۰/۵	۰/۲۸	۱۰۰۰	



شکل ۸ میانگین طول براده برای پارامترهای مختلف ماشینکاری

در وهله نخست، مقدار بالای ضریب تعیین^۱ معادل ۹۵/۲۲٪ نشان می‌دهد که متغیرهای مستقل (یعنی پارامترهای ماشینکاری و سطوح آن‌ها) به خوبی قادر به تبیین تغییرات متغیر وابسته، یعنی طول براده، هستند. این مقدار بالا بیانگر آن است که مدل آماری به کاررفته توان مناسبی در توضیح رفتار سیستم دارد و بخش عمده‌ای از تغییرات مشاهده‌شده در طول براده ناشی از تغییر در پارامترهای ورودی بوده است.

^۱ R-square

جدول ۵ نتایج طول براده (میلی‌متر) به همراه میزان اثرگذاری هر پارامتر

سطح	سرعت دورانی (rpm)	نرخ پیشروی (mm/rev)	عمق برش (mm)	روانکاری
۱	۵/۹۸۸	۹/۰۱۲	۶/۴۹۵	۷/۹۲۶
۲	۸/۱۱۵	۷/۲۶۸	۷/۸۹۷	۱۰/۳۰۱
۳	۱۰/۳۴۵	۹/۵۳۰	۱۰/۹۱۵	
۴	۱۲/۰۰۸	۱۰/۶۴۵	۱۱/۱۴۸	
دلتا	۶/۰۲۰	۳/۳۷۷	۴/۶۵۳	۲/۳۷۵
رتبه	۱	۳	۲	۴
درصد ضریب تعیین				٪ ۹۵/۲۲

نتایج حاصل از تحلیل آماری نشان می‌دهد که سرعت دورانی مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر طول براده بوده است. مقدار دلتا برای این پارامتر برابر با ۶/۰۲۰ به دست آمد که بیانگر نقش تعیین‌کننده آن در میزان طول براده می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده شد، به ترتیب با افزایش سرعت دورانی، طول براده افزایش قابل توجهی داشته است. این روند ناشی از افزایش نرخ براده‌برداری و تغییر مکانیزم براده‌برداری از حالت شکننده به پلاستیک و پیوسته‌تر بوده است.

در سرعت‌های دورانی پایین، میزان انرژی حرارتی تولیدشده در ناحیه برش کمتر بوده و در نتیجه، ماده تمایل بیشتری به شکست موضعی و تشکیل براده‌های کوتاه و گسسته داشته است [۲۵]؛ اما با افزایش سرعت دورانی، دمای ناحیه برش افزایش یافته و موجب نرم شدن نسبی زمینه آلومینیومی شده است که در نتیجه آن، تغییر شکل پلاستیک ماده تسهیل گردیده و براده‌ها به صورت پیوسته‌تر و بلندتر تشکیل شده‌اند.

همچنین، افزایش سرعت دورانی باعث کاهش زمان تماس ابزار با سطح قطعه‌کار در هر سیکل براده‌برداری شده است که این امر نیز از شکست زودهنگام براده جلوگیری کرده و موجب افزایش طول آن می‌گردد [۲۵]؛ به همین دلیل، در سرعت‌های برشی بالا، براده‌های پیوسته و بلندتر غالب بوده‌اند، درحالی‌که در سرعت‌های پایین‌تر، براده‌ها بیشتر به شکل دنداندار و گسسته تشکیل شده‌اند. این نتایج تأکیدی بر نقش کلیدی سرعت دورانی در کنترل طول براده و بهینه‌سازی فرایند ماشینکاری کامپوزیت Al-Mg₂Si دارند.

عمق برش به‌عنوان دومین پارامتر تأثیرگذار بر طول براده شناسایی شد، به‌طوری‌که مقدار دلتا برای این پارامتر برابر با ۴/۶۵۳ محاسبه گردید. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، افزایش عمق برش منجر به افزایش طول براده شده است، اما میزان این افزایش در بازه‌های مختلف عمق برش یکسان نبوده و الگوی متفاوتی را نشان می‌دهد.

در بازه ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر و ۱/۵ تا ۲ میلی‌متر، روند افزایش طول براده دارای شیب ملایمی بوده است، اما در بازه ۱ تا ۱/۵ میلی‌متر، این شیب به‌طور محسوسی افزایش یافته که نشان‌دهنده تغییر در مکانیزم تشکیل براده در این محدوده است. این تغییر می‌تواند ناشی از دو عامل اصلی باشد:

- افزایش نیروی برشی و کرنش پلاستیک: با افزایش عمق برش، نیروی لازم برای براده‌برداری افزایش یافته که منجر به اعمال تنش و کرنش بیشتر بر ماده می‌شود [۲۶]. در عمق‌های پایین‌تر، این نیرو ممکن است برای تشکیل براده‌های بلند و پیوسته کافی نباشد، اما با رسیدن به یک آستانه بحرانی (در اینجا ۱،۵ میلی‌متر)، تغییر شکل پلاستیک ماده تسهیل گردیده و باعث افزایش محسوس طول براده شده است.

- اثر تعامل ابزار و ذرات سخت Mg₂Si: در کامپوزیت‌های آلومینیومی تقویت‌شده با ذرات سخت Mg₂Si، با افزایش عمق برش، احتمال تعامل مستقیم ابزار با ذرات سخت بیشتر شده و این امر می‌تواند بر مکانیزم براده‌برداری اثر بگذارد [۲۷]. در عمق‌های کم، ابزار ممکن است از میان فازهای نرم‌تر عبور کرده و تشکیل براده‌های کوتاه‌تر را تسهیل کند، اما در عمق‌های بالاتر، میزان برهم‌کنش ابزار با ذرات سخت افزایش یافته و موجب تغییر در نحوه شکست براده و در نتیجه افزایش طول آن شده است.

نرخ پیشروی به‌عنوان سومین پارامتر تأثیرگذار بر طول براده شناسایی شد که مقدار دلتا برای آن برابر با ۳/۳۷۷ به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، نرخ پیشروی ۰/۱۲ میلی‌متر بر دور کوتاه‌ترین طول براده را به خود اختصاص داده است،

در حالی که سایر مقادیر نرخ پیشروی به ترتیب ۰/۰۸، ۰/۲ و ۰/۲۸ میلی‌متر بر دور، افزایش تدریجی در طول براده را نشان داده‌اند. این روند نشان می‌دهد که یک نرخ پیشروی بهینه برای کاهش طول براده وجود دارد و مقادیر خارج از این مقدار، چه کمتر و چه بیشتر، باعث افزایش طول براده شده‌اند. این پدیده را می‌توان به دلایل زیر مرتبط دانست:

- اثر نرخ برش بر مکانیسم تغییر شکل ماده:

در نرخ‌های پیشروی پایین‌تر (۰/۰۸ میلی‌متر بر دور)، مدت‌زمان تماس ابزار با قطعه کار افزایش یافته و گرمای بیشتری در ناحیه برش تجمع پیدا می‌کند [۲۸]. این امر باعث نرم‌شدن موضعی زمینه آلومینیومی و تسهیل تغییر شکل پلاستیک شده که منجر به تشکیل براده‌های بلندتر نسبت به مقدار بهینه ۰/۱۲ میلی‌متر بر دور شده است. در نرخ‌های پیشروی بالاتر (۰/۲ و ۰/۲۸ میلی‌متر بر دور)، نیروی برشی افزایش یافته که باعث ایجاد شکست‌های موضعی در ماده و در نتیجه تشکیل براده‌های بلند و نامنظم شده است.

- برهم‌کنش ابزار با ذرات سخت Mg_2Si :

در نرخ‌های پیشروی کمتر از ۰/۱۲ میلی‌متر بر دور، زمان تماس ابزار با ذرات تقویت‌کننده افزایش یافته و این امر موجب تغییر مکانیزم براده‌برداری شده که در نتیجه طول براده را نسبت به مقدار بهینه افزایش می‌دهد [۲۷]. در نرخ‌های پیشروی بالاتر از مقدار بهینه، افزایش نیروی برشی سبب شده تا ابزار با ذرات سخت برخورد بیشتری داشته باشد که این موضوع منجر به شکست‌های موضعی و افزایش ناگهانی طول براده شده است.

به‌طور کلی، نتایج نشان داده است که نرخ پیشروی ۰/۱۲ میلی‌متر بر دور بهینه‌ترین مقدار برای کاهش طول براده بوده است، زیرا در این مقدار، توازن مناسبی بین نیروی برشی، انتقال حرارت و مکانیزم شکست ماده برقرار شده است. بنابراین، انتخاب نرخ پیشروی مناسب می‌تواند نقش مهمی در کنترل شکل و اندازه براده و بهینه‌سازی فرایند ماشینکاری کامپوزیت $Al-Mg_2Si$ داشته باشد.

در میان پارامترهای مورد بررسی، استراتژی روانکاری به‌عنوان کم‌اثرترین متغیر بر طول براده شناسایی شد، به‌طوری‌که مقدار دلتا برای این پارامتر برابر با ۲/۳۷۵ محاسبه گردید. باین حال، تأثیر روانکاری بر ویژگی‌های براده را نمی‌توان نادیده گرفت، چرا که تغییر در شرایط روانکاری، بر نحوه تشکیل براده، میزان اصطکاک و دمای ناحیه برش تأثیرگذار بوده. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، ماشینکاری در شرایط خشک منجر به ایجاد براده‌های بلندتری در مقایسه با ماشینکاری در شرایط مرطوب شده است که این روند تغییرات دارای شبیهی نسبتاً ملموس می‌باشد.

یکی از عوامل کلیدی در این تفاوت، تأثیر روانکاری بر دمای ناحیه برش و تغییر شکل ماده است. در ماشینکاری خشک، به دلیل عدم وجود سیال خنک‌کننده، گرمای بیشتری در ناحیه تماس ابزار و براده تجمع یافته است. این افزایش دما موجب نرم‌تر شدن بیشتر زمینه آلومینیومی شده و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک ماده افزایش می‌یابد [۲۹]. این امر باعث شده است که مقاومت ماده در برابر شکست کاهش یافته و در نهایت، براده‌های بلندتری در مقایسه با شرایط مرطوب ایجاد شود. در مقابل، در ماشینکاری مرطوب، استفاده از سیال خنک‌کننده موجب کاهش دما و اصطکاک شده و از نرم‌شدگی بیش‌ازحد زمینه آلومینیومی جلوگیری کرده است. در نتیجه، براده‌ها به شکل کوتاه‌تر و منظم‌تری تشکیل می‌شوند.

علاوه بر تأثیر بر دمای ناحیه برش، روانکاری نقش مهمی در میزان اصطکاک و چسبندگی براده به ابزار ایفا کرده است. در شرایط خشک، افزایش اصطکاک در ناحیه تماس ابزار-براده موجب ایجاد تنش‌های کششی بیشتر در طول براده شده است که در نتیجه آن، براده‌ها پیوسته‌تر و بلندتر رشد می‌کنند [۳۰]. در مقابل، در ماشینکاری مرطوب، کاهش اصطکاک بین ابزار و براده، میزان تنش‌های کششی را کاهش داده و موجب ایجاد براده‌هایی با طول کوتاه‌تر و شکستگی‌های کنترل‌شده‌تر می‌شود.

به‌طور کلی، اگرچه تأثیر استراتژی روانکاری بر طول براده در مقایسه با سایر پارامترهای ماشینکاری کمتر بوده است، اما نقش آن در کنترل نحوه تشکیل براده و تغییرات آن تحت شرایط مختلف قابل توجه می‌باشد.

با استفاده از قابلیت پیش‌بینی روش تاگوچی در نرم‌افزار مینی‌تب، سطوح بهینه پارامترهای ماشینکاری جهت کاهش طول براده تعیین گردید که در جدول ۶ ارائه شده است. این سطوح بر اساس تحلیل آماری داده‌ها و اثرگذاری آن‌ها بر کاهش طول براده و حفظ کارایی فرایند ماشینکاری انتخاب شده‌اند. انتخاب این سطوح بهینه از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا کنترل طول براده تأثیر مستقیمی بر عملکرد فرایند و بهبود شرایط برش دارد. در ادامه مقادیر پیش‌بینی شده برای میانگین طول براده و نسبت سیگنال به نویز با استفاده از مدل تاگوچی محاسبه شد. این مقادیر، برآوردی از عملکرد فرایند ماشینکاری تحت شرایط بهینه را ارائه داده‌اند و نشان می‌دهند که چگونه انتخاب پارامترهای مناسب می‌تواند موجب بهبود کیفیت براده و کنترل بهتر آن در طول فرایند ماشینکاری گردد.

جدول ۶ سطوح بهینه به ازای هر کدام از پارامترهای ماشینکاری

رخ پیشروی (mm/rev)	عمق برش (mm)	سرعت دورانی (rpm)	روانکاری
۰/۱۲	۰/۵	۳۶۰	مرطوب

به منظور اعتبارسنجی پیش‌بینی‌های انجام شده، آزمایش‌هایی با سطوح بهینه تعیین شده انجام گرفت و طول براده حاصل از این آزمایش‌ها با مقادیر پیش‌بینی شده مقایسه گردید. نتایج این مقایسه در جدول ۷ گزارش شده است و صحت پیش‌بینی‌های مدل تاگوچی را مورد ارزیابی قرار داده است. میزان تطابق داده‌های آزمایشگاهی با مقادیر پیش‌بینی شده، دقت و قابلیت اطمینان مدل تدوین شده را تأیید کرده است.

جدول ۷ نتایج پیش‌بینی شده و اعتبارسنجی آن

خطا (%)	تجربی	آماری
۷/۴۶	میانگین طول براده (mm)	سیگنال به نویز
	۰/۳۶	-۶/۷۶۱۴۵
		میانگین طول براده (mm)
		۰/۳۳۵

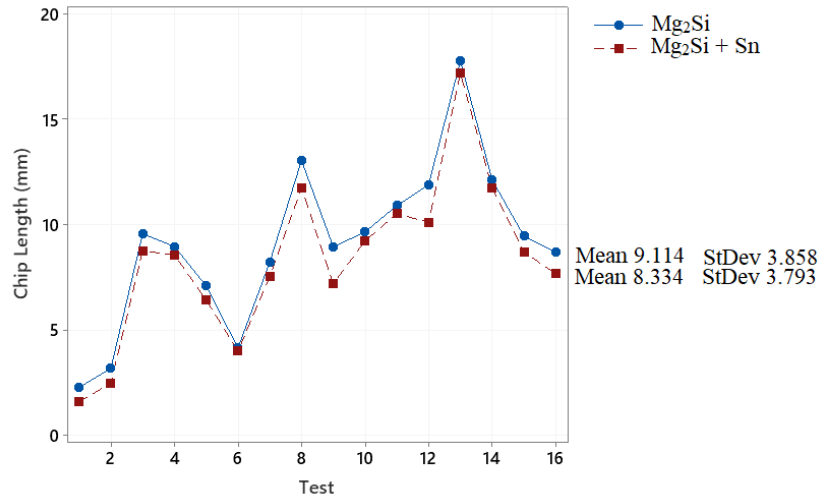
همان‌طور که انتظار می‌رفت، انتخاب مقادیر بهینه برای پارامترهای ماشینکاری تعیین شده منجر به کنترل مؤثرتر طول براده در فرایند ماشینکاری کامپوزیت Al-Mg₂Si گردید. نتایج حاصل نشان داد که میانگین طول براده به مقدار ۰/۳۳۵ میلی‌متر رسیده است که این مقدار بیانگر طول براده‌ای مطلوب و قابل قبول برای فرایند ماشینکاری این نوع کامپوزیت می‌باشد. کاهش طول براده علاوه بر بهبود روند تخلیه براده و کاهش تجمع آن در ناحیه برش، می‌تواند به کاهش نیروهای برشی و افزایش بهره‌وری فرایند نیز منجر گردد. علاوه بر این، درصد خطای پایین (۷/۴۶ درصد) بین نتایج حاصل از روش‌های آماری و داده‌های تجربی، اعتبار بالای مدل تاگوچی را تأیید کرده است. این میزان تطابق نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی توانسته است اثرگذاری هر یک از پارامترهای ماشینکاری بر طول براده را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند. به‌طور کلی، نتایج به‌دست‌آمده حاکی از دقت بالای این مدل در بهینه‌سازی فرایند ماشینکاری و تعیین شرایط ایده‌آل برای کنترل براده در این نوع کامپوزیت بوده است.

شکل ۹ اثر حضور عنصر قلع در ساختار کامپوزیت بر طول براده تولید شده در فرایند ماشینکاری را نشان داده است، کاهش طول براده (به میزان ۸ درصد) در حضور عنصر قلع را می‌توان به چند عامل کلیدی نسبت داد. نخست، قلع دارای نقطه ذوب پایینی است (۲۳۲ درجه سانتی‌گراد) و در حین فرایند ماشینکاری به راحتی می‌تواند در ناحیه برش به حالت نیمه‌ذوب یا مذاب درآید [۳۱]. این وضعیت منجر به تشکیل یک لایه روانکار موضعی در فصل مشترک ابزار و براده می‌شود که نقش مؤثری در کاهش اصطکاک سطحی دارد. کاهش اصطکاک باعث کاهش دمای ناحیه برش و کاهش انرژی لازم برای تغییر شکل پلاستیک ماده می‌شود. در نتیجه، تمرکز تنش در ناحیه برش افزایش یافته و جدایش براده با سهولت بیشتری اتفاق می‌افتد. از سوی دیگر، حضور قلع می‌تواند سبب نرم شدن موضعی زمینه آلومینیومی در دمای بالا شده و جریان ماده را محدودتر و گسسته‌تر نماید [۳۲]. مجموع این عوامل منجر به تولید براده‌های کوتاه‌تر، گسسته‌تر و دارای ساختار شکست پذیرتر نسبت به نمونه‌های فاقد قلع می‌گردد.

در مقایسه با نمونه‌های بدون قلع، افزودن قلع منجر به کاهش ۸ درصدی طول براده‌ها (از ۹/۱۱۴ میلی‌متر به ۸/۳۳۴ میلی‌متر) و کاهش پراکندگی داده‌ها (کاهش انحراف استاندارد^۱ از ۳/۸۵۸ به ۳/۷۹۳) شد. این تغییرات به کاهش اصطکاک و دمای ناحیه برش در حضور قلع نسبت داده شد که باعث بهبود پایداری و کیفیت فرایند براده‌برداری گردید.

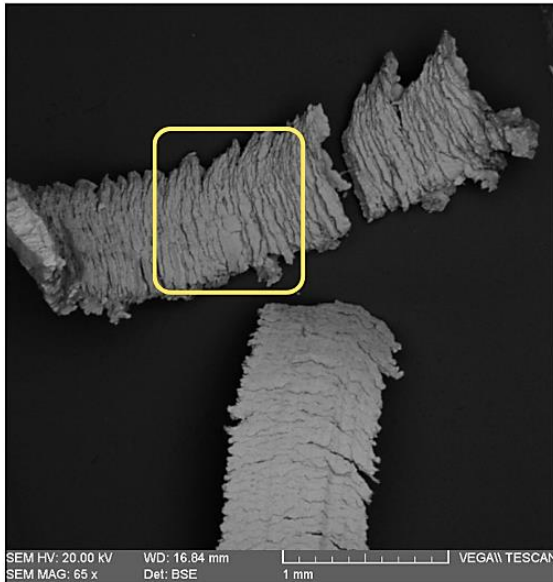
شکل ۱۰ نشان می‌دهد که حضور عنصر قلع در ساختار کامپوزیت تأثیر بارزی بر مورفولوژی براده داشته است. در نمونه‌های فاقد قلع، براده‌ها دندان‌های درشت‌تر و ناهمگون‌تری نشان دادند و سطح آن‌ها با ترک‌های ریز و شکست‌های ترد همراه بوده است. چنین ویژگی‌هایی منجر به تشکیل براده‌هایی خشک، ناپایدار و با قابلیت اعتماد کمتر گردید. این نوع براده‌ها به دلیل تمرکز تنش در نواحی دندان‌ها، استعداد بیشتری برای شکست و جدایش ناگهانی داشتند که می‌تواند موجب ارتعاشات نامطلوب در فرایند ماشینکاری و کاهش کیفیت سطح نهایی شود.

¹ Standard deviation (StDev)

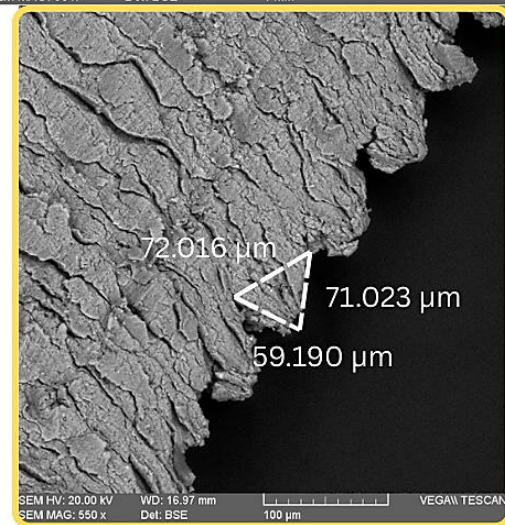
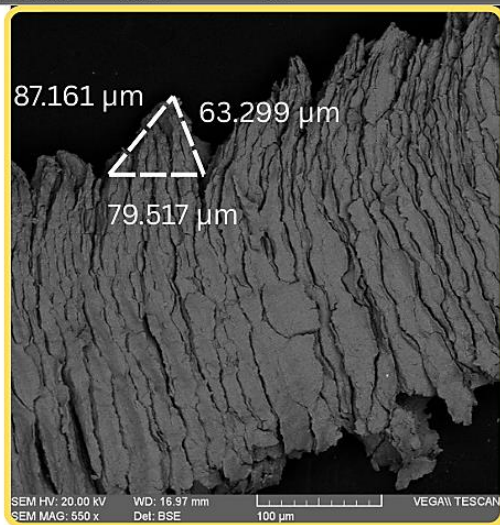
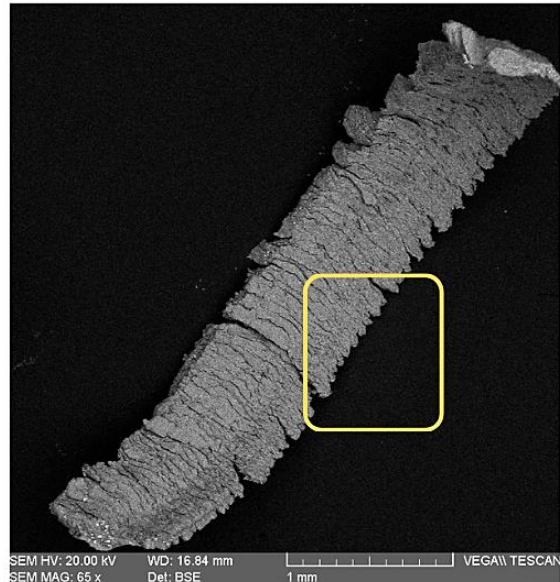


شکل ۹ اثر حضور عنصر قلع در ساختار کامپوزیت بر طول براده تولیدشده

Al-Mg₂Si



Al-Mg₂Si + Sn



شکل ۱۰ اثر حضور عنصر قلع در ساختار کامپوزیت بر مورفولوژی براده تولیدشده

در مقابل، در نمونه‌های حاوی قلع مشاهده شد که براده‌ها دندانه‌هایی ریزتر با توزیع یکنواخت‌تر داشتند و سطح براده از پیوستگی بیشتری برخوردار بود. مورفولوژی کلی این براده‌ها پایدارتر و همگن‌تر شکل گرفت که نشان‌دهنده یک مکانیسم براده‌برداری کنترل‌شده‌تر است. کاهش ترک‌های ترد و شکست‌های موضعی در این براده‌ها بیانگر آن است که حضور قلع تا حد زیادی رفتار ترد براده را تعدیل کرده و پایداری مکانیکی آن را افزایش داده است.

این تفاوت‌ها به ویژگی‌های ذاتی قلع نسبت داده شد. قلع به دلیل ماهیت نرم و نقطه ذوب پایین خود در شرایط ماشینکاری به‌صورت موضعی نقش روانکار جامد ایفا کرده و اصطکاک در ناحیه تماس ابزار - براده را کاهش داده است [۳۱]. کاهش اصطکاک علاوه بر کاهش دمای موضعی، موجب توزیع یکنواخت‌تر تنش و جلوگیری از تمرکز تنش‌های برشی در مرز دندانه‌ها شده است [۳۲]. در نتیجه، شکل‌گیری براده با مکانیسمی یکنواخت‌تر صورت گرفته و محصول نهایی آن، براده‌هایی پایدار، همگن و قابل اعتماد بوده است.

بنابراین، حضور قلع در کامپوزیت $Al-Mg_2Si$ نه تنها بر مورفولوژی براده اثرگذار بوده، بلکه با کاهش شکست‌های ترد و افزایش یکنواختی براده، کیفیت فرایند ماشینکاری و قابلیت پیش‌بینی‌پذیری آن را نیز بهبود داده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر پارامترهای ماشینکاری (سرعت دورانی، نرخ پیشروی، عمق برش و شرایط روانکاری) و نقش افزودنی قلع بر مورفولوژی براده در فرایند تراشکاری کامپوزیت‌های $Al-Mg_2Si$ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اصلی به‌صورت زیر جمع‌بندی می‌شوند:

- پارامترهای ماشینکاری شامل سرعت برش، نرخ پیشروی، عمق برش و شرایط روانکاری نقش تعیین‌کننده‌ای در نوع و شکل براده دارند. در سرعت‌های بالا و شرایط مرطوب، براده‌های پیوسته و پایدارتر ایجاد شدند، درحالی‌که در سرعت‌های پایین یا شرایط خشک، بیشتر براده‌های ناپیوسته، دندانه‌دار و ذره‌ای تشکیل شدند.
 - آنالیز SEM-EDS بیانگر وقوع سایش نفوذی و انتقال عناصر ابزار (C، Co، W) به سطح براده‌ها بود. این مکانیزم تحت تأثیر حرارت و اصطکاک موضعی تشدید شد. با این حال، انتخاب مقادیر بهینه پارامترهای ماشینکاری توانست این پدیده را کنترل و شدت آن را کاهش دهد و از سایش شدید ابزار جلوگیری نماید.
 - تحلیل آماری و تجربی نتایج نشان داد که سرعت برش بیشترین تأثیر را بر طول براده داشته و پس از آن عمق برش و نرخ پیشروی قرار می‌گیرند. افزایش سرعت برش منجر به تولید براده‌های بلندتر و پیوسته‌تر شد، درحالی‌که عمق برش و نرخ پیشروی در مقادیر بحرانی خود رفتار متفاوتی را ایجاد کردند. شرایط روانکاری کمترین تأثیر را بر طول براده داشت، اما همچنان در کنترل رفتار شکست براده مؤثر بود.
 - روش تاگوچی با ضریب تعیین ۹۵/۲۲٪ توانست تغییرات طول براده را با دقت بسیار بالایی مدل‌سازی کند. خطای پایین بین نتایج پیش‌بینی‌شده و داده‌های تجربی (حدود ۷/۵٪) بیانگر قابلیت اطمینان بالای مدل آماری در بهینه‌سازی شرایط ماشینکاری بود.
 - افزودن ۱٪ قلع به کامپوزیت $Al-Mg_2Si$ منجر به کاهش میانگین طول براده به میزان ۸ درصد و تغییر محسوس در مورفولوژی آن شد. در حضور قلع، براده‌ها یکنواخت‌تر، پایدارتر و دارای دندانه‌های ریزتر بودند، در حالی‌که در غیاب آن، براده‌ها تردتر و با ترک‌های ریز و دندانه‌های درشت‌تر تشکیل شدند. نقش روانکار موضعی قلع در کاهش اصطکاک و دمای ناحیه برش، عامل اصلی این بهبود محسوب می‌شود.
- به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان داد که ترکیب طراحی آلیاژی مناسب (افزودن قلع) همراه با انتخاب بهینه پارامترهای ماشینکاری می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود فرایند براده‌برداری، افزایش پایداری عملکرد ابزار و ارتقای کیفیت ماشینکاری کامپوزیت‌های $Al-Mg_2Si$ داشته باشد.

References

- [1] Chen LY, Qin P, Zhang L, Zhang LC. An overview of additively manufactured metal matrix composites: preparation, performance, and challenge. *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2024 Jun 20;6(5):052006. doi: 10.1088/2631-7990/ad54a4

- [2] Singh B, Kumar I, Saxena KK, Mohammed KA, Khan MI, Moussa SB, Abdullaev SS. A future prospects and current scenario of aluminium metal matrix composites characteristics. *Alexandria Engineering Journal*. 2023 Aug 1;76:1-7. doi: 10.1016/j.aej.2023.06.028
- [3] Khalid MY, Umer R, Khan KA. Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloy and its metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications. *Results in Engineering*. 2023 Dec 1;20:101372. doi: 10.1016/j.rineng.2023.101372
- [4] Lin JT, Bhattacharyya D, Ferguson WG. Chip formation in the machining of SiC-particle-reinforced aluminium-matrix composites. *Composites Science and Technology*. 1998 Jan 1;58(2):285-91. doi: 10.1016/S0266-3538(97)00126-7
- [5] Suthar J, Patel K. Tool wear and chip formation analysis of aluminium hybrid metal matrix composite. *Materials Today: Proceedings*. 2020 Jan 1;32:422-30. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.126
- [6] Ram SC, Bhushan A, Kumar MR, Gautam A, Moray A, Goel S. A comparative study of processing route, microstructures, fracture analysis and phase formation of Al-Si/Mg₂Si functionally graded composites: an overview. *Composite Interfaces*. 2024 Dec 1;31(12):1575-614. doi: 10.1080/09276440.2024.2358568
- [7] Sougavabar MA, Niknam SA, Davoodi B. 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*. 2023 May 1;24:571-85. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.03.006
- [8] Rajmohan T, Palanikumar K, Kathirvel M. Optimization of machining parameters in drilling hybrid aluminium metal matrix composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2012 Jun 1;22(6):1286-97. doi: 10.1016/S1003-6326(11)61317-4
- [9] Premnath AA. Studies on machining parameters while milling particle reinforced hybrid (Al6061/Al203/Gr) MMC. *Particulate Science and Technology*. 2015 Nov 2;33(6):682-92. doi: 10.1080/02726351.2015.1025457
- [10] Kumar R, Chauhan S. Study on surface roughness measurement for turning of Al 7075/10/SiCp and Al 7075 hybrid composites by using response surface methodology (RSM) and artificial neural networking (ANN). *Measurement*. 2015 Apr 1;65:166-80. doi: 10.1016/j.measurement.2015.01.003
- [11] Alipour Sougavabar M, Niknam SA, Davoodi B. Study of tool flank wear and surface quality in milling of Al520-MMCs reinforced with SiC and Sn particles. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2022 Dec 22;9(2):1970-5. [In Persian] doi: 10.22068/JSTC.2022.1972218.1807
- [12] Alipour Sougavabar M, Niknam SA, Davoodi B, Songmene V. Milling Al520-MMC reinforced with SiC particles and additive elements Bi and Sn. *Materials*. 2022 Feb 18;15(4):1533. doi: 10.3390/ma15041533
- [13] Emamy M, Pourbahari B, Malekan M, Emami K. Effects of Mg₂Sn intermetallic on the microstructure and tensile properties of Al-15% Mg₂Si-X% Sn composite. *Journal of Materials Research*. 2016 Dec;31(24):3891-9. doi: 10.1557/jmr.2016.426
- [14] Mašek P, Alagan NT, Mára V, Awe SA, Nwabuisi E, Zeman P. Chip formation and morphology in cryogenic machining of Al-SiC composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025 Mar;137(5):2899-917. doi: 10.1007/s00170-025-15337-w
- [15] Hasanifard M, Azarafza R, Alaei MH, Najafi M. Experimental investigation of the effects of machining parameters on surface quality in turning aluminum matrix composites reinforced with Mg₂Si particles. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Nov 21;11(9):13-25. [In Persian] doi: 10.22034/ijme.2024.466572.1983
- [16] Karimi Beram I, Niknam SA, Davoodi B. Investigating the effect of Sr element on the wear area on the cutting tool rake surface during turning Al-Mg₂Si with different percentages of Mg₂Si. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Jun 21;11(4):26-37. [In Persian] doi: 10.22034/ijme.2024.418231.1842
- [17] Hasanifard M, Niknam SA. Study of surface wear in coated carbide tools during turning of MO40 steel. In: *Proceedings of the 17th National Conference and the 6th International Conference on Construction and Production Engineering*; 2021; Tehran, Iran. [In Persian]
- [18] Sundaramoorthy R, Ravindran R. Tool wear optimization in CNC milling operation of Al-Mg₂Si alloys by Taguchi method. *SN Applied Sciences*. 2019 Sep;1(9):1093. doi: 10.1007/s42452-019-1100-5
- [19] Aeinehbandi S, Ghoreishi M, Ghasemi Jabal A, Mehrafshan MM. Optimization of drilling of AA7075 metal matrix composites using response surface method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Dec 21;11(10):32-44. [In Persian] doi: 10.22034/ijme.2024.461244.1969
- [20] Davoodi B, Tazehkandi AH. Experimental investigation and optimization of cutting parameters in dry and wet machining of aluminum alloy 5083 in order to remove cutting fluid. *Journal of Cleaner Production*. 2014 Apr 1;68:234-42. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.12.056
- [21] Aborkin A, Prusov E, Deev V, Babin D, Bokaryov D, Ryabkova V. Structure and mechanical properties of consolidated billets from recycled chip wastes of cast metal matrix composites of the Al-Si-SiC system. *Journal of Alloys and Compounds*. 2025 Jan 5;1010:177059. doi: 10.1016/j.jallcom.2024.177059

- [22] Fard RK, Afza RA, Teimouri R. Experimental investigation, intelligent modeling and multi-characteristics optimization of dry WEDM process of Al-SiC metal matrix composite. *Journal of Manufacturing Processes*. 2013 Oct 1;15(4):483-94. doi: [10.1016/j.jmapro.2013.09.002](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.09.002)
- [23] Ram SC, Chattopadhyay K, Bhushan A. A literature review on Al-Si alloy matrix based in situ Al-Mg₂Si FG-composites: Synthesis, microstructure features, and mechanical characteristics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2023 Feb;237(4):919-40. doi: [10.1177/09544062221124064](https://doi.org/10.1177/09544062221124064)
- [24] Mishra RR, Panda A, Sahoo AK, Kumar R. Characterization and machinability analysis of aluminium-based metal matrix composites (MMC): A critical review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2025 Feb;239(3):861-84. doi: [10.1177/09544062241290091](https://doi.org/10.1177/09544062241290091)
- [25] Shakur MA, Sultana MN, Zaman PB, Dhar NR. Multi-objective optimization of process parameters in terms of chip morphology in eco-friendly surface grinding of Al/SiC-MMC under MQL. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2025 Sep;47(9):438. doi: [10.1007/s40430-025-05754-z](https://doi.org/10.1007/s40430-025-05754-z)
- [26] Fang Y, Wang Y, Zhang P, Luo H. Research on chip formation mechanism and surface morphology of particle-reinforced metal matrix composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021 Dec;117(11):3793-804. doi: [10.1007/s00170-021-07921-7](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07921-7)
- [27] Bhushan RK. Analysis of chip formation mechanism in turning of AA 7075/SiCp MMCs. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2023 Nov 13;95(10):1659-68. doi: [10.1108/AEAT-11-2022-0309](https://doi.org/10.1108/AEAT-11-2022-0309)
- [28] Leksycki K, Feldshtein E, Dyachkova L, Arkusz K, Ceglewski M, Czerwicz Ł. An Insight into Chip and Surface Texture Shaping Under Finish Turning of Powder Steels Infiltrated with Tin Bronze. *Materials*. 2024 Dec 20;17(24):6244. doi: [10.3390/ma17246244](https://doi.org/10.3390/ma17246244)
- [29] Günay M, Korkmaz ME. Understanding the relationship between surface quality and chip morphology under sustainable cutting environments. *Materials*. 2024 Apr 16;17(8):1826. doi: [10.3390/ma17081826](https://doi.org/10.3390/ma17081826)
- [30] Sivalingam V, Liu H, Tiwari S, Kumar PG, Sun M, Kai G, Gupta MK, Eltaggaz A, Raju R. Effect of reinforced particles on the machinability of Al alloy under MQL, cryogenic, and hybrid lubrication. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024 Jun;132(7):3349-61. doi: [10.1007/s00170-024-13534-7](https://doi.org/10.1007/s00170-024-13534-7)
- [31] Gençer GM. Sn/Graphite/Cu reinforced aluminum: An experimental study on fabrication of hybrid surface composite as journal bearing material by friction stir processing. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024 Oct 15;1002:175445. doi: [10.1016/j.jallcom.2024.175445](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175445)
- [32] Gxowa-Penxa Z, Daswa P, Modiba R, Mathabathe MN, Bolokang AS. Development and characterization of Al-Al₃Ni-Sn metal matrix composite. *Materials Chemistry and Physics*. 2021 Feb 1;259:124027. doi: [10.1016/j.matchemphys.2020.124027](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124027)