



## ساخت و بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه آلیاژهای مس تقویت‌شده با ذرات الماس میکرونی

علی علیزاده<sup>۱\*</sup>، محسن حیدری بنی<sup>۲</sup>، رامین سلطانی بیدار<sup>۳</sup>، جعفر اسکندری جم<sup>۴</sup>

۱- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۲- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۴- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

### چکیده

### کلمات کلیدی

کامپوزیت، تقویت‌کننده الماس، آلیاژ مس، ریزساختار، استحکام خمشی، سختی سنجی.

کامپوزیت‌های زمینه آلیاژهای مس تقویت شده با ذرات الماس میکرونی یک نوع از مواد کامپوزیتی هستند که از آلیاژهای مس به عنوان فاز زمینه و ذرات الماس میکرونی به عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌کنند. اندازه ذرات الماس معمولاً در محدوده میکرومتر است که باعث می‌شود تأثیر قابل توجهی بر روی خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی کامپوزیت بگذارند. در پژوهش حاضر نمونه‌های کامپوزیتی با آلیاژهای مختلف مس و تقویت‌کننده‌ی الماس با پوشش تیتانیوم ساخته شد. هدف از پژوهش حاضر، تولید کامپوزیت زمینه آلیاژهای مس تقویت شده با ذرات الماس میکرونی و بررسی خواص مکانیکی این کامپوزیت است. بنابراین ریزساختار، استحکام خمشی و خواص سایشی آن‌ها بررسی گردید. نتایج نشان داد که حضور عنصر کبالت در بین عناصر مس و قلع باعث افزایش دمای ذوب ترکیب و تغییرات فازی و ساختاری نمونه‌ها شده و همین موضوع باعث به وجود آمدن ساختار متناسب برای انتخاب زمینه کامپوزیت شده است. اتصال الماس در زمینه مس-قلع-کبالت اتصال بهتری نسبت به الماس در زمینه مس-قلع دارد. همچنین با اضافه کردن الماس به ساختار کامپوزیت، استحکام خمشی نمونه ۴۹/۶٪ کاهش یافت. درحالی که با افزودن الماس با پوشش تیتانیوم استحکام خمشی ۱۸٪/۲ نسبت به نمونه دارای الماس بدون پوشش افزایش پیدا کرده است. با اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده به نمونه‌هایی که کبالت در ساختار زمینه‌ی آن‌ها وجود دارد میزان ضریب اصطکاک کاهش یافت. همچنین نمونه دارای الماس نسبت به نمونه‌های فاقد الماس مقاومت سایشی خوبی داشته و ذرات الماس در زمینه کامپوزیت باقی ماندند.

### ۱- مقدمه

است که باعث می‌شود تأثیر قابل توجهی بر روی خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی کامپوزیت بگذارند. ذرات الماس به دلیل سختی بالای خود، مقاومت به سایش و سختی کلی کامپوزیت را افزایش می‌دهند. همچنین دارای هدایت حرارتی بسیار بالایی هستند، بنابراین ترکیب آن‌ها با مس می‌تواند منجر به تولید موادی با هدایت حرارتی عالی شود که در صنایع الکترونیک و انتقال حرارت بسیار مفید است.

کامپوزیت‌های زمینه آلیاژهای مس تقویت شده با ذرات الماس میکرونی یک نوع از مواد کامپوزیتی هستند که از آلیاژهای مس به عنوان فاز زمینه و ذرات الماس میکرونی به عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌کنند. این کامپوزیت‌ها به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد ذرات الماس و خاصیت‌های عالی مس، در کاربردهای مختلف صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اندازه ذرات الماس معمولاً در محدوده میکرومتر

\* نویسنده مسئول: a\_alizadeh@mut.ac.ir

بهبود چسبندگی بین سطحی بین الماس و مس از طریق تشکیل کاربید سیلیکون روی سطح الماس [۱۲]، تهیه کامپوزیت‌های الماس/مس اصلاح شده با  $Ti_3C_2Tx$  به عنوان لایه میانی با هدایت حرارتی بهبود یافته [۱۳]، بررسی ریزساختار و هدایت حرارتی پوشش‌های  $Cu_2AlNiZnAg$ /الماس روی زیرلایه مس خالص به روش آلیاژسازی مکانیکی با انرژی بالا [۱۴]، مروری بر اصلاح بین سطحی الماس و تأثیر آن بر خواص کامپوزیت‌های الماس/زمینه مس [۱۵]، بررسی تأثیر محتوای الماس و مدت آسیاب کردن بر ریزساختار و هدایت حرارتی پوشش کامپوزیت الماس/مس پوشش داده شده با  $Ti$  روی زیرلایه مس [۱۶]، بررسی ساختارهای بین سطحی و تأثیر آن‌ها بر هدایت حرارتی و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الماس/مس - بور [۱۷]، بهبود رابط‌های بین سطحی کامپوزیت‌های الماس/مس از طریق روش پوشش دهی با دمای پایین و کارایی بالا [۱۸]، شبیه سازی عددی و بررسی تجربی انتقال حرارت و ویژگی‌های هیدرولیکی سینک‌های حرارتی میکروکانال مستطیلی با استفاده از کامپوزیت‌های مس/الماس با هدایت حرارتی بالا [۱۹].

هدف از این تحقیق، تولید کامپوزیت زمینه آلیاژهای مس تقویت شده با ذرات الماس میکرونی و بررسی خواص مکانیکی این کامپوزیت است. از مهم‌ترین مسائل ساخت این نوع کامپوزیت، بهینه سازی استحکام ذرات الماس در زمینه فلزی و خواص سایشی مدنظر این نوع کامپوزیت است. پودرهای کامپوزیتی با استفاده از آسیاب کاری پراثری (سایشی) و به روش سینتر پرس داغ تولید شدند. به منظور بررسی استحکام خمشی، سختی و خواص سایشی، نمونه‌ها با اضافه کردن فلزات مختلف به زمینه، شرایط مختلف آسیاب کاری و پارامترهای مختلف فشار داغ، ساخته شدند.

## ۲- بیان مسئله پژوهش

به منظور انجام پژوهش ابتدا خواص مواد و تجهیزات موردنیاز جهت انجام آزمون تجربی مورد بررسی قرار گرفت و سپس آزمون‌های انجام شده و نحوه ساخت نمونه‌ها به تفصیل شرح داده شد.

### ۲-۱- خواص مواد

در این پژوهش از پودر مس خالص با درصد خلوص ۹۹/۹۹ درصد اتمیزه شده به وسیله گاز خنثی با متوسط اندازه ذره ۳۰ میکرون استفاده شد. ذرات پودر مس مورد استفاده کاملاً به صورت کروی شکل بوده و توزیع نسبتاً یکسانی از اندازه ذرات دارد. پودر قلع خالص با درصد خلوص ۹۹/۹۹٪ اتمیزه شده به وسیله گاز خنثی با متوسط اندازه

مس به خودی خود دارای هدایت الکتریکی بالاست و افزودن ذرات الماس می‌تواند باعث بهبود برخی ویژگی‌های الکتریکی دیگر شود. افزودن ذرات الماس به آلیاژ مس، مقاومت به سایش کامپوزیت را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد. ترکیب مس با الماس باعث می‌شود که این کامپوزیت‌ها در عین داشتن استحکام بالا، سبک باقی بمانند. ذرات الماس می‌توانند مقاومت به خوردگی را نیز افزایش دهند که به طول عمر بیشتر مواد در شرایط سخت کمک می‌کند. این ویژگی‌ها به دلیل کاربرد در صنایع هوافضا و قطعات الکترونیکی از نوآوری این گونه کامپوزیت‌ها است.

کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMC) تقویت شده با ذرات، یکی از جدیدترین مواد مهندسی بوده و توسعه سریع آن در سال‌های اخیر را می‌توان به دلیل خواص بسیار عالی و کاربردهای گسترده آن دانست. برای ساخت کامپوزیت‌ها، مواد مختلف با یکدیگر مخلوط شده و خواص موردنظر را ارائه می‌دهند. خواص آن‌ها متفاوت از خواص زمینه‌ی خود است؛ اما نه زمینه و نه تقویت کننده به تنهایی نمی‌توانند خواص مورد نظر را ارائه دهد، در صورتی که MMCها تنهایی قادر به فراهم کردن خصوصیات موردنیاز می‌باشند [۱-۳]. پرس گرم (HP)، پرس گرم ایزواستاتیک (HIP) و لحیم کاری فرآیندهای مرسوم هستند که برای تهیه ابزارهای الماس بسیار نازک استفاده می‌شوند. با این حال، معایبی برای این روش‌ها، از جمله ضخامت زیاد، درجه آلیاژی پایین و دقت محدود برش به دلیل نسبت ابعاد بزرگ وجود دارد [۴ و ۵]. ابزارهای تولید شده به روش پرس گرم، دارای الماس‌هایی هستند که معمولاً با سینتر در قالب‌های گرافیتی در یک پودر فلز قرار داده می‌شوند. کامپوزیت الماس/زمینه تولید شده به این روش، با استفاده از لحیم کاری یا جوش لیزری به هسته فولادی متصل می‌شود [۶]. در ابزارهای لحیم کاری شده، الماس‌ها با استفاده از یک فاز پرکننده که عموماً از آلیاژ مس، نیکل یا نقره تشکیل شده است، یک لایه منفرد را تشکیل می‌دهند که به هسته فولادی لحیم می‌شود [۷ و ۸]. از پژوهش‌های انجام شده در زمینه این نوع کامپوزیت‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

مقایسه ویژگی‌های دو ابزار الماس از دو روش سینتر پرس داغ و لحیم کاری از جنبه‌های پیوند زمینه فلزی به الماس، ارزیابی حفظ الماس و فرآیند سایش ابزار [۹]، بررسی اثر دمای پرس داغ بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ  $Cu-25\% Sn$  [۱۰]، بررسی خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های لایه‌ای زمینه مس و الماس پوشش داده شده با مس [۱۱]، آبکاری کامپوزیت نانو الماس/مس جهت

به محور عمودی سطح نمونه تنظیم شد، فاصله کارکرد بهینه بین نمونه و دتکتور ۱۰ میلی‌متر و عمق تحلیل ۱ میکرومتر بود. برای مطالعه ریزساختار نمونه‌های زینتر شده، سطح قطعات با سمباده‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ سمباده‌زنی و پولیش شدند. به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های زینتر شده از آزمون‌های خمش سه‌نقطه‌ای و سختی سنجی راکول B استفاده شد. آزمون خمش سه‌نقطه‌ای تحت استاندارد ASTM D790 [20] انجام شد. نمونه‌های خمش با مقطع مستطیل دارای طول ۳۰ میلی‌متر، ضخامت ۳ میلی‌متر و عرض ۵ میلی‌متر هستند. سرعت حرکت فک 0.6 mm/min طول تکیه‌گاه ۲۳ میلی‌متر بود. آزمون خمش، با دستگاه Santam STM 150، صورت پذیرفت. استحکام خمشی توسط فرمول (۱) [۲۰] محاسبه شد. که  $\sigma$  استحکام خمشی، F نیروی وارد شده بر قطعه، L طول تکیه‌گاه، b عرض و d ضخامت نمونه خمش است.

$$\sigma = 3FL/2bd^2 \quad (1)$$

چگالی نمونه‌ها، به روش غوطه‌وری یا ارشمیدس طبق استاندارد ASTM B962 اندازه‌گیری شد. چگالی تئوری توسط قانون مخلوطها [۲۰] رابطه (۲) محاسبه شد.

$$\rho_c = (\rho_m \times X_m) + (\rho_f \times X_f) \quad (2)$$

#### ۲-۴- ساخت نمونه‌ها

مراحل ساخت نمونه‌ها در این پژوهش شامل فراوری پودر کامپوزیتی، سینتر پودرها به روش پرس داغ است. برای تعیین درصد‌های عناصر فلزی مختلف و نوع تقویت‌کننده‌ی الماس با توجه به بررسی مقالات، در کامپوزیت‌های حاوی الماس ۹ درصد وزنی است. به همین منظور در تمام نمونه‌های کامپوزیتی به مقدار ۹ درصد وزنی الماس استفاده شد. ابتدا پودرهای فلزی مس و قلع با نسبت ترکیب Cu-15Sn۸۵ و سپس در نمونه‌های بعدی با اضافه کردن ۹ درصد وزنی کبالت به ترکیب، تهیه شدند. لازم به ذکر است پودرهای مس و قلع در نمونه‌های مجزا از قبل به صورت پودر از پیش آماده شده برنز استفاده شدند. ابتدا پودرهای زمینه فلزی به مقدار ۳۳ گرم وزن شده و سپس به مقدار ۹ درصد وزنی (۳ گرم) به ترکیب فلزی اضافه شده و به مقدار ۲ درصد وزنی اسید استتاریک به منظور جلوگیری از چسبیدن پودر به گلوله‌های آسیاب اضافه شدند. نسبت وزن گلوله به پودر در این آسیاب ۱:۳۰ انتخاب شد که به مقدار ۹۰۰ گرم گلوله فلزی از جنس استیل ۳۰۴ به قطر 5mm استفاده شد. فرایند آسیاب با سرعت

ذره ۲۰ میکرون در نظر گرفته شد. ذرات پودر قلع مورد استفاده به صورت کروی و بیضوی شکل بود. پودر برنز با ترکیب Cu-20wt.%Sn با درصد خلوص ۹۸٪ اتمیزه شده به وسیله گاز خنثی با متوسط اندازه ذره ۴۵ میکرون بود. ذرات پودر برنز مورد استفاده به صورت بیضوی شکل است. پودر کبالت با درصد خلوص ۹۹ درصد و متوسط اندازه ذره ۱۰ میکرون و پودر الماس با درصد خلوص ۹۹٪ با متوسط اندازه ذره ۱۰۰ میکرون استفاده شد. ذرات پودر الماس مورد استفاده به صورت تیتانیوم ساخت کشور چین با درصد خلوص ۹۹٪ با متوسط اندازه ذره ۱۰۰ میکرون تهیه شد. ذرات پودر الماس مورد استفاده به صورت گوشه‌دار است. پودر الماس با اندازه ۱۵ میکرون با درصد خلوص ۹۹٪ در نظر گرفته شد و ذرات پودر الماس مورد استفاده به صورت گوشه‌دار بود.

#### ۲-۲- تجهیزات

برای انجام فرآیند آلیاژسازی مکانیکی Cu-Sn-Co-Diamond از یک آسیاب گلوله‌ای از نوع سایشی مجهز به سیستم خنک‌کننده آبگرد و اتمسفر کنترل شده، استفاده گردید. برای توزین پودرهای اولیه به منظور آسیاب کردن و همچنین توزین پودرهای آسیاب شده به اندازه قرص‌های یک و سه سانتی برای پرس کردن درون قالب، از ترازو کیا الکترونیک مدل BL2 با دقت یک‌صدم اعشار استفاده شد. جهت جلوگیری از اکسیداسیون پودرهای آسیاب شده در حین تخلیه محفظه آسیاب، کلیه مراحل باز کردن درب محفظه آسیاب و تخلیه آن، در گلاوباکس و تحت اتمسفر گاز خنثی آرگون انجام گرفت. به منظور متراکم‌سازی نمونه‌ها برای آزمون احتراق و آزمون‌های مکانیکی از دستگاه پرس هیدرولیکی مستقر در دانشگاه صنعتی مالک اشتر با ظرفیت ۱۰۰ تن مجهز به سنسور تنظیم و نگهداری فشار استفاده شد. برای پرس سرد و پرس گرم و سینتر نمونه‌ها از قالب گرم‌کار با قطر 4cm و ارتفاع 10cm از جنس فولاد گرم کار H13 استفاده شد. به منظور سینتر پرس داغ نمونه‌های Cu-Sn-Co-Diamond از محفظه تحت اتمسفر با دمای کاری 1000°C استفاده گردید.

#### ۲-۳- آزمون‌ها

تغییر ریزساختار نمونه‌های زینتر شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی (SEM) مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN مجهز به طیف‌سنج EDS مورد بررسی قرار گرفت. شرایط تست EDS این‌گونه بود که ولتاژ شتاب‌دهنده در محدوده ۱۵ تا ۲۰ کیلو ولت قرار داشت، زاویه برخورد پرتو الکترونی با سطح نمونه در حدود ۳۰ درجه نسبت

از افزایش دما تا 600°C، به منظور هم‌دما شدن قالب و پودرها، پس از یک ساعت فشار 200MPa اعمال شد. پس از یک ساعت فشار حذف و کوره خاموش شد. پس از سرد شدن کوره، قطعه کامپوزیتی از قالب خارج شد. در جدول ۱ مشخصات کامل نمونه‌های تولید شده و مورد بررسی آورده شده است.

430rpm و با سه مدت زمان ۴ و ۱ و نیم ساعت در یک محفظه‌ی آبگرد برای نمونه‌های مربوطه انجام شد. پودرهای تولید شده به روش آسیاب پر انرژی با وزن ۳۰ گرم به درون قالب ریخته شده و سپس با فشار 200MPa پرس سرد شدند. پس از پرس سرد قالب به درون محفظه‌ی پرس داغ منتقل شد. به منظور اطمینان از خنثی بودن اتمسفر محفظه، گاز آرگون در طول فرایند به داخل محفظه پرس داغ تزریق شد. پس

جدول ۱: مشخصات نمونه‌های تولید شده.

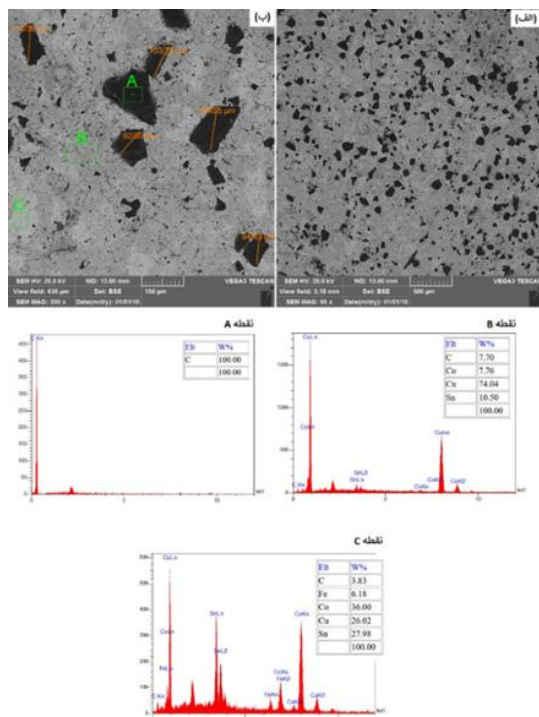
شماره نمونه	ترکیب (درصد وزنی)							مدت زمان آسیاب
	Cu	Sn	Co	Bronze (85-15)	الماس D100	الماس D100 با پوشش تیتانیوم	الماس D15	
۱	۸۵	۱۵	-	-	-	-	-	۴ ساعت
۲	-	-	-	۱۰۰	-	-	-	۴ ساعت
۳	۷۵	۱۵	۱۰	-	-	-	-	۴ ساعت
۴	۶۸	۱۴	۹	-	۹	-	-	۴ ساعت
۵	۶۸	۱۴	۹	-	-	۹	-	۴ ساعت
۶	۷۸	۱۳	-	-	۹	-	-	۴ ساعت
۷	-	-	-	۹۱	-	-	-	۴ ساعت
۸	۶۸	۱۴	۹	-	۹	-	-	۱ ساعت
۹	۶۸	۱۴	۹	-	۹	-	-	۳۰ دقیقه
۱۰	۶۸	۱۳	-	-	-	-	۹	۴ ساعت

### ۳- نتایج

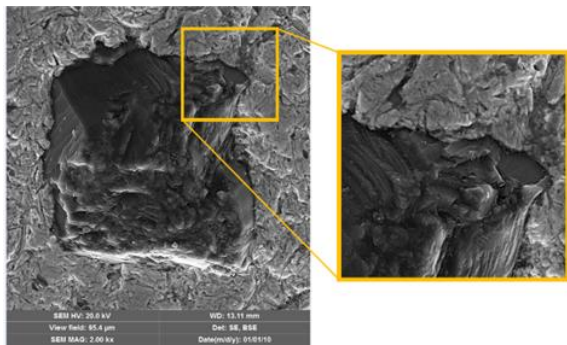
نتایج مربوط به ۱۰ نمونه ساخته شده در قالب بررسی اثر حضور کبالت بر ریزساختار و فصل مشترک الماس زمینه مس-قلع، تأثیر آلیاژی بودن برنز بر ریزساختار و فصل مشترک زمینه مس-قلع و الماس، مقایسه ریزساختار و فصل مشترک در زمینه مس-قلع با الماس با اندازه ۱۰۰ و ۱۵ میکرون، استحکام خمشی، بررسی سطوح شکست، بررسی رفتار سایشی، بررسی سطوح سایش ارائه و به تفصیل شرح داده شده است.

### ۳-۱- اثر حضور کبالت بر ریزساختار و فصل مشترک الماس زمینه مس-قلع

در شکل ۱ ریزساختار نمونه ۴ (مس-قلع-کبالت-الماس) و شکل ۲ ریزساختار نمونه ۶ (مس-قلع-الماس) را نشان داده شده است. با اضافه کردن ۱۰ درصد وزنی الماس بدون پوشش ساخته شدند. با مقایسه ریزساختار این دو نمونه نشان داد که حضور کبالت در ترکیب باعث ایجاد مناطق دوفازی در ریزساختار ترکیب شد.



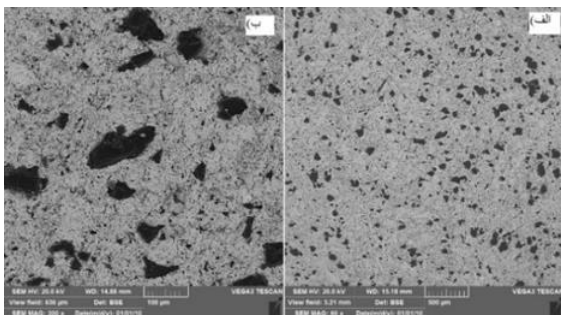
شکل ۱: تصاویر SEM و آنالیز EDS ریزساختار نمونه ۴ الف) نمای دور- ب) نمای نزدیک.



شکل ۴ : تصویر SEM الماس در نمونه ۶ (مس-قلع-الماس).

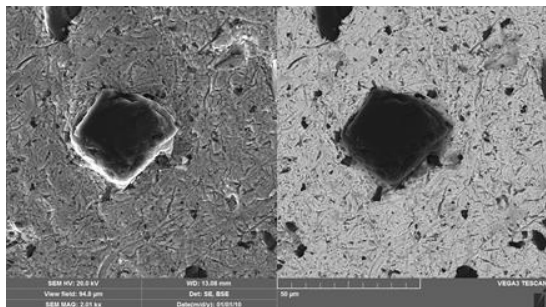
### ۳-۲- تأثیر آلیاژی بودن برنز بر ریزساختار و فصل مشترک زمینه مس-قلع و الماس

در شکل ۵ ریزساختار کامپوزیتی نمونه ۷ را نشان داده شد. در این نمونه نیز همانند نمونه‌های قبل توزیع الماس مناسب بوده و الماس‌ها در حین آسیاب در ترکیب پخش شده و مورفولوژی مناسبی دارند. ریزساختار این نمونه در مقایسه با نمونه ۶ تفاوت چندانی ندارند و در ریزساختار این دو نمونه مناطق دوفازی دیده نشد. این نشان داد که برنز، قلع و کبالت موجب دوفازی شدن نمونه نشده‌اند و عامل اصلی در دوفازی شدن نمونه به نوع توزیع الماس بستگی دارد.



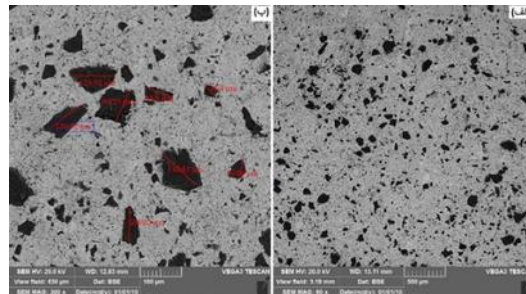
شکل ۵ : تصاویر SEM ریزساختار نمونه ۷ (برنز-الماس) (الف) نمای دور- (ب) نمای نزدیک.

در شکل ۶ تصویر الماس و فصل مشترک آن با زمینه در نمونه ۷ آورده شده است که در مقایسه با فصل مشترک الماس در زمینه مس-قلع، چسبندگی و فصل مشترک بهتری مشاهده شد [۲۴].



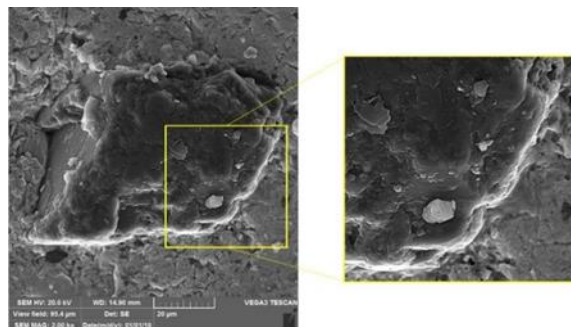
شکل ۶ : تصویر SEM الماس در نمونه ۷ (برنز-الماس).

الماس در این دو نمونه به صورت یکنواختی توزیع شده و به دلیل مورفولوژی الماس استفاده شده، الماس با اندازه‌های مختلفی در ترکیب مشاهده شد و همانطور که در شکل ۱ و ۲ مشاهده شد اندازه متوسط الماس‌ها از بازه‌ای بین ۹۰ تا ۱۲۰ میکرومتر هستند.



شکل ۲ : تصاویر SEM ریزساختار نمونه ۶ (الف) نمای دور- (ب) نمای نزدیک.

اهمیت بررسی این دو نمونه در نحوه اتصال الماس در زمینه کامپوزیت است که از شکل ۳ می‌توان گفت که فصل مشترک الماس - زمینه مناسب است. با مقایسه مورفولوژی الماس و شکل ۳ می‌توان گفت که سطح الماس در نمونه ۴ فرایند آسیاب دچار تخریب سطحی شده است. از طرفی با توجه به اینکه الماس در دماهای زیر  $700^{\circ}\text{C}$  گرافیته نمی‌شود [۲۲] از لحاظ ساختاری الماس به گرافیت تبدیل نشده است. در شکل ۴ هم این شرایط برای الماس تکرار شد و الماس به صورت طبیعی این ظاهر را داشته و گرافیته نشده است. اتصال الماس در زمینه مس-قلع-کبالت به نظر اتصال بهتری نسبت به الماس در زمینه مس-قلع دارد زیرا کبالت با کربن محلول‌های جامد و مایع تشکیل می‌دهد و سطح الماس را مرطوب می‌کند [۲۳].



شکل ۳ : تصویر SEM الماس در نمونه ۴ (مس-قلع-کبالت-الماس).

استحکام خمشی نمونه افزایش یافته است. با مقایسه مقادیر استحکام نمونه‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که استفاده از ترکیب پودرهای مس و قلع، ۱۶ درصد استحکام خمشی بیشتری نسبت به ترکیب برنزی است. این بیانگر این است که ترکیب الماس در کنار مس و قلع اتصال بهتری نسبت به ترکیب برنز و الماس برقرار کرده است. مقادیر استحکام خمشی نمونه ۴ و ۸ و ۹ نشان داد که مدت زمان آسیاب تأثیر چشمگیری بر روی استحکام نمونه نداشته و استحکام این نمونه‌ها تفاوت چندانی ندارند اما تفاوت اصلی این سه نمونه در کرنش آن‌هاست به طوری که کرنش نمونه ۸ نسبت به نمونه ۴، ۴۰٪ افزایش یافته و نمونه ۹ نیز ۳۵٪ افزایش کرنش داشته‌اند و می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش مدت زمان آسیاب کرنش کامپوزیت افزایش پیدا کرده است. با مقایسه مقادیر استحکام نمونه ۶ و ۱۰ مشاهده شد که استفاده از الماس با اندازه کوچک‌تر باعث کاهش استحکام خمشی نمونه شده است. در جدول ۳ مقادیر کرنش خمشی نمونه‌ها ارائه شده است که با مقایسه مقادیر این نمودار مشاهده می‌شود که نمونه ۲ به علت آسیاب نشدن و آلیاژی بودن پودر مورد استفاده دارای بالاترین میزان کرنش در مقایسه با سایر نمونه‌ها و نمونه ۱ است. مابقی نمونه‌ها رفتار کرنشی یکسانی نشان داده و در یک محدوده قرار گرفته‌اند [۲۶].

جدول ۲: نتایج استحکام خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌های کامپوزیتی.

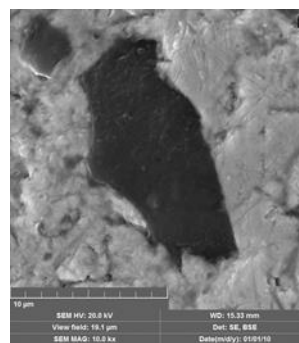
شماره نمونه	استحکام خمشی (Mpa)
۱	۶۴۳/۴
۲	۷۱۵/۵
۳	۶۵۸
۴	۴۰۹/۵
۵	۴۴۱/۱
۶	۵۰۶/۲
۷	۴۲۵/۶
۸	۳۳۲/۶
۹	۳۰۹/۷
۱۰	۴۲۶/۴

جدول ۳: میزان کرنش‌های خمشی نمونه‌های کامپوزیتی.

شماره نمونه	میزان کرنش خمشی
۱	۰/۰۱۰۶۴
۲	۰/۰۴۱۳۷
۳	۰/۰۰۶۷۶۶
۴	۰/۰۰۶۸۷۶

### ۳-۳- مقایسه ریزساختار و فصل مشترک در زمینه مس-قلع با الماس با اندازه ۱۰۰ و ۱۵ میکرون

تصاویر ریزساختار نمونه ۱۰ که با زمینه مس-قلع و الماس با اندازه ۱۵ میکرون است نشان داد همانند نمونه‌های قبلی الماس به طور یکنواخت در ترکیب فلزی زمینه توزیع شده است. ذرات ریزتر به دلیل فضای بیشتری برای توزیع یکنواخت در زمینه فلزی، به خوبی پراکنده شدند که این اتصالات عالی به دلیل سازگاری بهتر بین ذرات ریز الماس و زمینه فلزی است. در شکل ۷ تصویر SEM الماس در ساختار زمینه‌ی مس-قلع آورده شده است و همانطور که مشاهده شد، اتصال الماس به زمینه بسیار عالی بوده و اثری از شکستگی و تخریب هم در سطح الماس مشاهده نشد و این ویژگی‌ها می‌تواند به علت ریزتر بودن اندازه الماس‌ها نسبت به نمونه‌های ۴ تا ۹ باشد [۲۵].



شکل ۷: تصویر SEM الماس در نمونه ۱۰ (مس-قلع-الماس با اندازه ۱۵ میکرون).

### ۳-۴- نتایج استحکام خمشی

در جدول ۲ نتایج استحکام خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌های کامپوزیتی آورده شده است. با مقایسه مقادیر استحکام خمشی نمونه ۱ و ۲ می‌توان دریافت که نمونه برنزی به دلیل آلیاژی بودن پودرها و آسیاب نشدن پودرهای مورد استفاده استحکام خمشی بیشتری نسبت به نمونه مخلوطی مس و قلع را دارا است. در نمونه ۱ و ۳ با اضافه کردن کبالت به ترکیب استحکام خمشی ۲/۳ درصد افزایش پیدا کرد و این می‌تواند به دلیل دوفازی شدن ریزساختار باشد. با اضافه کردن الماس به ساختار کامپوزیت که وجه تفاوت نمونه‌های ۳ و ۴ است، استحکام خمشی نمونه ۴۹/۶ درصد کاهش یافت که این به دلیل حضور ذرات سرامیکی الماس در ساختار زمینه است که مسبب چنین کاهش در استحکام نمونه است. در نمونه ۵ مشاهده شد که استحکام خمشی ۱۸/۲ درصد نسبت به نمونه ۴ افزایش پیدا کرده است که از این افزایش می‌توان برداشت کرد که با حضور ذرات الماس با پوشش تیتانیوم در ساختار کامپوزیت و اتصال قوی بین ذرات الماس با پوشش و زمینه،

شماره نمونه	میزان کرنش خمشی
۵	۰/۰۰۶۲۲
۶	۰/۰۰۶۸۰۵
۷	۰/۰۰۵۵۳۲
۸	۰/۰۱۲۴۹۴
۹	۰/۰۱۱۳۴۷
۱۰	۰/۰۰۶۳۸۷

### ۳-۵- نتایج بررسی سطوح شکست

با توجه به صاف و ورقه‌ای بودن سطح شکست نمونه ۱ می‌توان گفت که شکست ترد اتفاق افتاده است. همچنین مشخص شد که رشد ترک از میان دانه‌ها عبور کرده و این رفتار عیناً در نمونه ۳ نیز اتفاق افتاده است. با مشاهده نمونه ۲ که حاوی پودر آلیاژی آسیاب نشده برنز است مشخص شد دیپمپل‌ها و سطح برآمده آن، در این نمونه شکست نرم اتفاق افتاده است. با توجه به نتایج سطح شکست کامپوزیت در حضور الماس مشخص شد، نمونه ۴ دارای ترک است و سطح آن شامل دیپمپل‌های ناشی از کنده شدن الماس از زمینه است. این موضوع بیانگر این است که ترک از ذرات الماس عبور نکرده و رشد ترک در زمینه اشاعه پیدا کرده است. نمونه ۵ نیز دارای رفتار مشابه با نمونه ۴ است. نکته قابل توجه این است که پوشش‌های الماس نسبتاً روی الماس باقی مانده‌اند و این پوشش با رنگ روشن‌تری نمایان است که می‌توان نتیجه گرفت اتصال تیتانیوم به الماس قوی‌تر از اتصال تیتانیوم به زمینه مس-قلع-کبالت است. به همین ترتیب در مابقی نمونه‌ها رفتار شکست ترد مشاهده شد [۲۷].

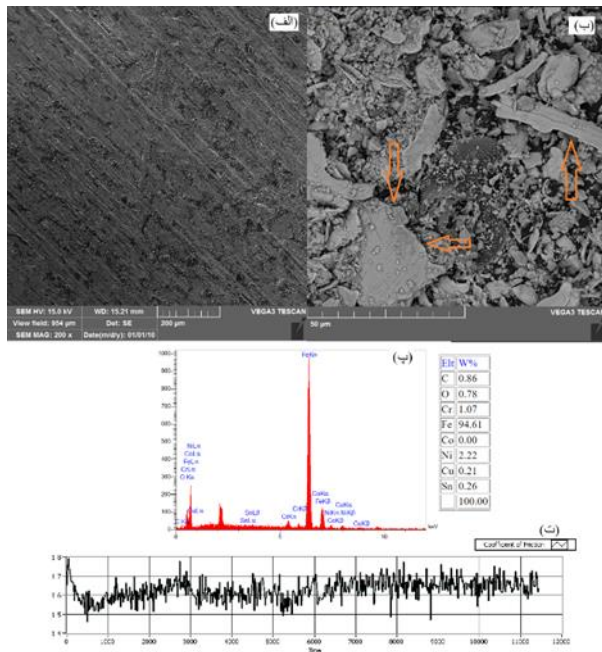
### ۳-۶- بررسی رفتار سایشی

نمودارهای ضریب اصطکاک تحت نیروی ۲۰ نیوتون برحسب زمان نشان داد که نمونه ۱ ضریب اصطکاک تقریباً یکسانی را در طی فرایند سایش دارد و این نشان می‌دهد که در طول فرایند سایش، هم سطح دیسک و هم سطح نمونه دچار سایش یکسانی شده‌اند. نمونه ۲ نیز رفتار مشابهی با نمونه ۱ دارد اما نمونه ۳ ضریب اصطکاک بالاتری نسبت به نمونه‌های قبلی دارد که این می‌تواند به علت حضور کبالت در ساختار نمونه ۳ باشد. نمونه‌های ۱ تا ۳ ضریب اصطکاک یکسانی دارند و این می‌تواند به این علت باشد که به دلیل عدم حضور ذرات تقویت‌کننده، دیسک سایشگر توانایی بیشتری در نفوذ به سطح نمونه را دارد که می‌تواند منجر به درگیر شدن جوانب پین با سطح نمونه شود و در کل این قضیه می‌تواند باعث ایجاد ناهمواری بیشتر در سطح نمونه شود. با افزایش این ناهمواری‌ها در سطح نمونه، مقاومت سطح

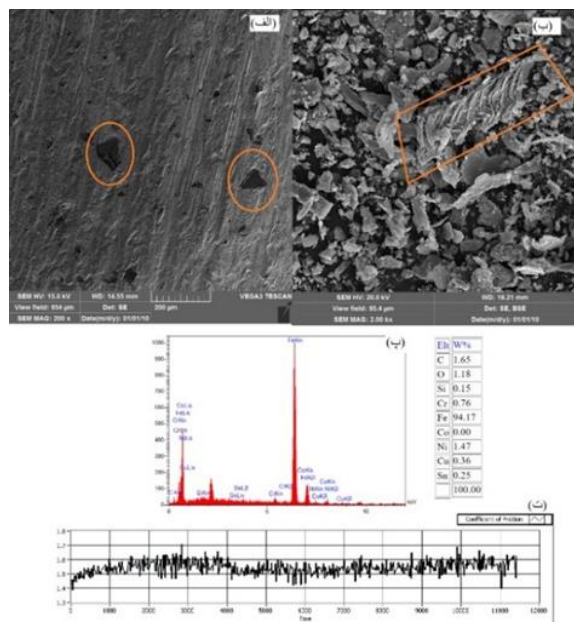
نمونه در برابر حرکت دیسک بیشتر می‌شود و در نتیجه ضریب اصطکاک بالا و ثابت می‌ماند. اما نمونه ۴ رفتار متفاوتی از ضریب اصطکاک نسبت به نمونه‌های قبلی را نشان داد. به این صورت که در ابتدا اصطکاک بین نمونه و دیسک بالا بوده و سپس طی سایش از این مقدار کاسته شده و به یک حالت ثابتی از سایش رسید به نحوی که ضریب اصطکاک در پایان فرایند سایش عدد یک را نشان داد. این رفتار بیانگر سایش خراشان در نمونه است به طوری که ذرات الماس سطح دیسک را ساییده است و به یک حالت پایدار از تماس سطحی رسیده است. نمونه‌های ۵ و ۸ و ۹ نیز رفتار مشابهی با نمونه ۴ دارد ولی با این تفاوت که ضریب اصطکاک در انتهای سایش در نمونه‌های ذکر شده اعداد مختلفی را نشان داده است. با اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده به نمونه‌هایی که کبالت در ساختار زمینه‌ی آن‌ها وجود دارد میزان ضریب اصطکاک کاهش یافته است. علت این قضیه را این‌گونه می‌توان شرح داد که با اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده سختی نمونه و مقاومت سطح نمونه در برابر دیسک افزایش یافته است. بنابراین از افزایش میزان ناهمواری‌ها جلوگیری شده و سطح سایش یکنواخت‌تری ایجاد شده است که این قضیه می‌تواند باعث کاهش ضریب اصطکاک شود، همچنین در کامپوزیت‌ها علاوه بر دلایل بالا، استفاده از ذرات کبالت نیز باعث کمتر شدن ضریب اصطکاک این کامپوزیت شده است. HCP بودن ساختار کبالت سبب کاهش ضریب اصطکاک و در نهایت افزایش مقاومت در برابر سایش شد [۲۸]. کبالت در دماهایی که ساختار HCP دارد، به صورت یک روان‌کننده‌ی جامد عمل کرد [۲۹]. همچنین مشاهده شد نمونه‌هایی که کبالت در کنار الماس در ترکیب آن‌ها حضور دارد ضریب اصطکاک طی فرایند سایش کاهش یافته است. با بررسی نمونه‌های ۶ و ۷ مشاهده شد که ضرایب اصطکاک این دو نمونه با وجود اینکه دارای الماس هستند اما مقادیر بالای اصطکاک و روند ثابتی را از خود نشان دادند و این می‌تواند به علت بالا بودن استحکام و سختی این دو نمونه باشد که در مواجهه با سطح دیسک تغییر نکردند، اما برای مقایسه این دو نمونه می‌توان گفت نمونه ۷ که حاوی برنز بود رفتار اصطکاکی مناسب‌تری نسبت به نمونه ۶ از خود نشان داد و در طی فرایند سایش ضریب اصطکاک آن کاهش یافت. نمونه ۱۰ نیز به همین دلیل رفتار مناسب سایشی را از خود نشان نداد و در طی فرایند سایش ضریب اصطکاک آن افزایش پیدا کرد.

۳-۷- بررسی سطوح سایش

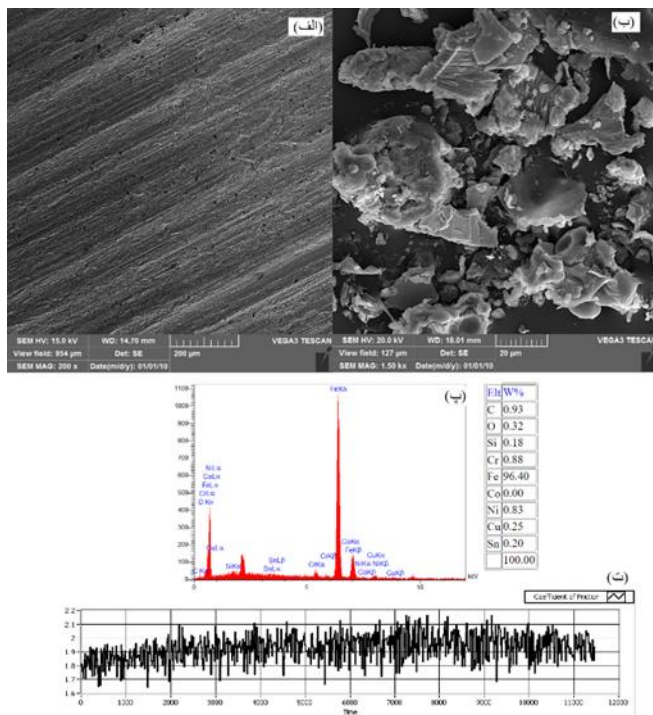
یکی از راهکارهای مؤثر جهت مطالعه رفتار سایشی مواد، بررسی سطوح سایش از نظر مورفولوژی و ترکیب شیمیایی سطح و لایه‌های شکل گرفته بر روی آن است. تصویر میکروسکوپی سطح سایش و ذرات ناشی از سایش نمونه‌های ۱ تا ۱۰ ارائه شده‌اند. شکل ۸ نمایانگر مورفولوژی سطح سایش نمونه ۱ است. ذرات ناخالصی در سطح ماده وجود دارد که ممکن است طی فرایند سایش از سطح دیسک کنده شده و به نمونه چسبیده باشد. در این نمونه خطوط سایش مشاهده شد اما این خطوط عمق بالایی نداشته و فاصله آن‌ها از یکدیگر زیاد است و دچار سایش چسبان شده است [۲۷].



شکل ۹: (الف) تصویر SEM سطح سایش، (ب) تصویر براده‌ی حاصل از سایش و (پ) آنالیز EDS براده‌های حاصل از سایش و (ت) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۲ (برنز).



شکل ۸: (الف) تصویر SEM سطح سایش، (ب) تصویر براده‌ی حاصل از سایش و (پ) آنالیز EDS براده‌های حاصل از سایش و (ت) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۱ (مس-قلع).



شکل ۱۰: (الف) تصویر SEM سطح سایش، (ب) تصویر براده‌ی حاصل از سایش و (پ) آنالیز EDS براده‌های حاصل از سایش و (ت) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۳ (مس-کبالت).

در شکل ۹ خطوط سایش در نمونه ۲ تراکم بیشتری دارند و از ظاهر این خطوط مشخص است که رفتار سایشی بهتری نسبت به نمونه ۱ داشته ولی باز هم در مناطقی در نمونه ۲ سطوح مختلفی از کامپوزیت کنده شده و رفتار سایش چسبان در این نمونه مشاهده شد. در نمونه ۳ سایش شدید چسبان نشان داده شد (شکل ۱۰). در این نمونه سطوح ورقه‌ای مختلفی از سطح کنده شده و سایش چسبان بوده و اثرژی و سطح تماس دیسک با نمونه منجر کنده شدن حجمی مواد از نمونه شده است. شکل ۱۱ ذرات الماس به خوبی نقش خود را در نمونه ۴ نشان داده‌اند، این ذرات همانطور که در شکل مشخص شده در زمینه باقی مانده است [۲۸].



زمینه داشته و همین امر منجر به افزایش عمر الماس در زمینه کامپوزیت گردید.

۴- با اضافه کردن الماس به ساختار کامپوزیت، استحکام خمشی نمونه ۴۹/۶٪ کاهش یافت که این به دلیل حضور ذرات سرامیکی الماس در ساختار زمینه است.

۵- در هر دو نمونه حاوی الماس با ذرات ۱۰۰ و ۱۵ میکرونی، ذرات به طور یکنواخت در ترکیب فلزی زمینه توزیع شده است. در نمونه با ذرات ۱۵ میکرونی الماس، اتصال الماس به زمینه بسیار عالی بوده و اثری از شکستگی و تخریب هم در سطح الماس مشاهده نشد و این ویژگی‌ها می‌تواند به علت ریزتر بودن اندازه الماس‌ها باشد.

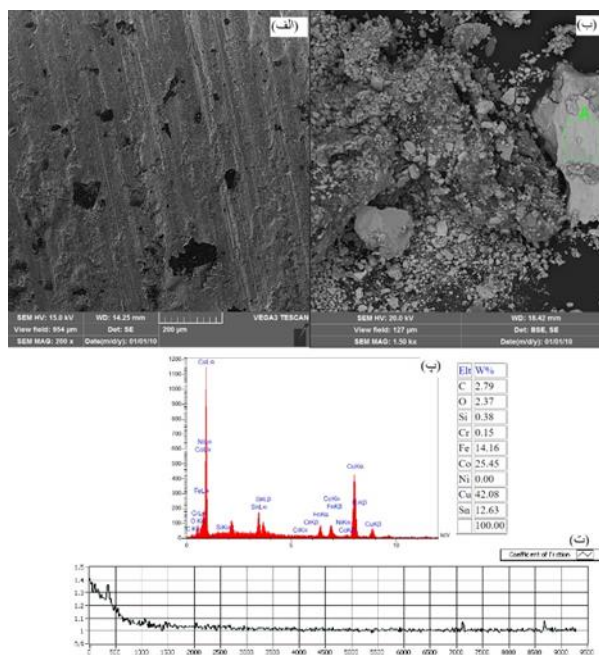
۶- با افزودن الماس با پوشش تیتانیوم، استحکام خمشی ۱۸/۲٪ نسبت به نمونه دارای الماس بدون پوشش تیتانیوم افزایش پیدا کرده است و دلیل آن اتصال قوی بین ذرات الماس با پوشش تیتانیوم و زمینه است.

۷- با اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده به نمونه‌هایی که کبالت در ساختار زمینه‌ی آن‌ها وجود دارد میزان ضریب اصطکاک کاهش یافت. ۸- نمونه دارای الماس نسبت به نمونه‌های فاقد الماس مقاومت سایشی خوبی داشته و ذرات الماس در زمینه کامپوزیت باقی ماندند. ۹- با بررسی سطوح شکست مشخص شد که نمونه مس-قلع و نمونه برنز دارای شکست ترد بوده در حالی که نمونه حاوی مس-قلع-کبالت دارای شکست نرم است.

۱۰- با بررسی سطوح شکست مشاهده شد پوشش‌های الماس نسبتاً روی الماس باقی مانده‌اند و این پوشش با رنگ روشن‌تری نمایان است که می‌توان نتیجه گرفت، اتصال تیتانیوم به الماس قوی‌تر از اتصال تیتانیوم به زمینه مس-قلع-کبالت است.

#### ۹- منابع

- [1] C. Artini, M. Muolo, and A. Passerone, "Diamond-metal interfaces in cutting tools: a review," *Journal of Materials Science*, vol. 47, no. 7, pp. 3252-3264, doi.org/10.1007/s10853-011-6164-6, 2012.
- [2] L. De Oliveira, R. d. R. Paranhos, R. d. S. Guimarães, G. Bobrovitchii, and M. Filgueira, "Use of PM Fe-Cu-SiC composites as bonding matrix for diamond tools," *Powder metallurgy*, vol. 50, no. 2, pp. 148-152, doi.org/10.1179/174329007X161982, 2007.
- [3] Y.-Z. Hsieh and S.-T. Lin, "Diamond tool bits with iron alloys as the binding matrices," *Materials*



شکل ۱۱: (الف) تصویر SEM سطح سایش، (ب) تصویر براده‌ی حاصل از سایش و (پ) آنالیز EDS براده‌های حاصل از سایش و (ت) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۴ (مس-قلع-کبالت-الماس).

#### ۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، تولید کامپوزیت زمینه آلیاژهای مس تقویت شده با ذرات الماس میکرونی و بررسی خواص مکانیکی این کامپوزیت است. از مهم‌ترین مسائل ساخت این نوع کامپوزیت، بهینه‌سازی استحکام ذرات الماس در زمینه فلزی و خواص سایشی مدنظر این نوع کامپوزیت است. نتایج به دست آمده به شرح زیر است: ۱- حضور عنصر کبالت در بین عناصر مس و قلع باعث افزایش دمای ذوب ترکیب و تغییرات فازی و ساختاری در این نمونه شده است و همین موضوع باعث به وجود آمدن ساختار متناسب برای انتخاب زمینه کامپوزیت شد.

۲- اتصال الماس در زمینه مس-قلع-کبالت اتصال بهتری نسبت به الماس در زمینه مس-قلع دارد

۳- اتصال الماس در زمینه مس-قلع-کبالت به نظر اتصال بهتری نسبت به الماس در زمینه مس-قلع دارد که دلیل آن کاهش تخلخل در نمونه دارای کبالت است که این کاهش تخلخل به دلیل رطوبت ایجاد شده در الماس و یک دست شدن آن است. همچنین الماس با پوشش تیتانیوم اتصال تقریباً بهتری نسبت به الماس بدون پوشش به

- [14] H. Cao, D. Xiong, "Preparation of diamond/copper composites modified by Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> as interlayer with enhanced thermal conductivity" *Diamond and Related Materials*, Vol. 118, doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108504, 2021.
- [15] J. Zang, H. Li, J. Sun, Y. Shen, N. Su, X. Feng, "Microstructure and thermal conductivity of Cu-Cu<sub>2</sub>AlNiZnAg/diamond coatings on pure copper substrate via high-energy mechanical alloying method" *Surfaces and Interfaces*, V. 21, doi.org/10.1016/j.surf.2020.100742, 2020.
- [16] L. Zhou, J. Liu, R. Ding, J. Cao, K. Zhan, B. Zhao, "A review of diamond interfacial modification and its effect on the properties of diamond/Cu matrix composites" *Surfaces and Interfaces*, Vol. 40, doi.org/10.1016/j.surf.2023.103143, 2023.
- [17] J. Sun, J. Zang, H. Li, X. Feng, Y. Shen, "Influence of diamond content and milling duration on microstructure and thermal conductivity of Ti-coated diamond/copper composite coating on copper substrate" *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 259, doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124017, 2021.
- [18] Z. Xie, H. Guo, W. Xiao, X. Zhang, S. Huang, M. Sun, H. Xie, "Interfacial structures and their effect on thermal conductivity and mechanical properties of diamond/Cu-B composites" *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol.34(1), Issue 1, doi.org/10.1016/S1003-6326(23)66395-2, 2024.
- [19] C. Wei, X. Wang, J. Wen, Q. Wang, Z. Donga, "Interface improvement of diamond/copper composites through a low-temperature high-efficiency coating method" *Thin Solid Films*, Vol.804, doi.org/10.1016/j.tsf.2024.140486, 2024.
- [20] K. Lu, C. Wang, H. He, X. Fan, F. Chen, F. Qi, C. Wang, "Numerical simulation and experimental investigation on heat transfer and hydraulic characteristics of rectangular microchannel heat sinks using high thermal conductivity diamond/copper composites, *Diamond and Related Materials*, Vol.147, doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111371, 2024.
- [21] <https://www.astm.org/d0790-17.html>.
- [22] <https://www.astm.org/b0962-17.html>.
- [23] M. Zeren and Ş. Karagöz, "Sintering of polycrystalline diamond cutting tools," *Materials & design*, vol. 28, no. 3, pp. 1055-1058, doi.org/10.1016/j.matdes.2005.09.018, 2007.
- Chemistry and Physics, vol. 72, no. 2, pp. 121-125, doi.org/10.1016/S0254-0584(01)00419-9, 2001.
- [4] H. Dong, "A study of mechanical properties and microstructure of Cu-based matrixes for diamond ultrathin sawing," *Results in Physics*, vol. 12, pp. 748-753, doi.org/10.1016/j.rinp.2018.12.041, 2019.
- [5] R. German, *Sintering: from empirical observations to scientific principles*. Butterworth-Heinemann, 2014.
- [6] H. Tönshoff, H. Hillmann-Apmann, and J. Asche, "Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications," *Diamond and Related Materials*, vol. 11, no. 3-6, pp. 736-741, doi.org/10.1016/S0925-9635(01)00561-1, 2002.
- [7] J. C. Sung and M. Sung, "The brazing of diamond," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 27, no. 2, pp. 382-393, doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.11.011, 2009.
- [8] J. Xu, A. H. Sheikh, and C. Xu, "Interfacial failure modelling of diamond bits made of particulate composites," *Composite structures*, vol. 155, pp. 145-159, doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.075, 2016.
- [9] Y. Yu, X. Tie, G. Zhang, G. Huang, H. Huang, and X. Xu, "Comparison of brazed and sintered diamond tools for grinding of stone," *Materials Research Innovations*, vol. 18, no. sup2, pp. S2-869-S2-873, doi.org/10.1179/1432891714Z.00000000052, 2014.
- [10] P. Han, F.-r. Xiao, W.-j. Zou, and B. Liao, "Influence of hot pressing temperature on the microstructure and mechanical properties of 75% Cu-25% Sn alloy," *Materials & Design*, vol. 53, pp. 38-42, doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.024, 2014.
- [12] F. Luo, X. Jiang, H. Sun, J. Shang, Y. Zhang, Rui Shu, "Mechanical and thermal properties of Cu-coated diamond reinforced Cu matrix bioinspired laminated composites" *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 938, doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168584, 2023.
- [13] T. Hagio, J.Park, Y. Naruse, Y. Goto, Y. Kamimoto, R. Ichino, T. Bessho, "Electrodeposition of nano-diamond/copper composite platings: Improved interfacial adhesion between diamond and copper via formation of silicon carbide on diamond surface" *Surface and Coatings Technology*, Vol. 403, doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126322, 2020.

- composite with high thermal conductivity” *Materials & Design*, Vol. 87, pp. 527-539, 2015.
- [28] N. Poulou, P. Selvakumar, J. T. Philip, “Experimental Investigation on Tribological Behaviour of Copper Diamond Composites” *International Journal of Vehicle Structures & Systems (IJVSS)*, Vol. 14, No. 6, p746, 2022.
- [29] J. D. Donaldson and D. Beyersmann, "Cobalt and cobalt compounds," *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, doi.org/10.1002/14356007.a07\_281.pub2, 2000.
- [30] A. Handbook, "ASM Handbook Volume 18–Friction, Lubrication and Wear Technology," ed: ASM International, OH, 1992.
- [24] H. Okamoto, M. E. Schlesinger and E. M. Mueller, eds 2016 *ASM Handbook: Alloy Phase Diagrams* (Materials Park, Ohio: ASM International).
- [25] P. Vityaz, C. Ковалева, V. Zhornik, T. Grigoreva, N. Lyakhov, “Mechanical Alloying of Copper- or Iron-Based Metallic Binders for Diamond Tools” *Powders journal*, Vol.2, pp.403-420, 2023.
- [26] H. Cho, D. Yan, J. Tam, U. Erb, “Effects of diamond particle size on the formation of copper matrix and the thermal transport properties in electrodeposited copper-diamond composite materials” *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.791, 2019.
- [27] A. Abyzov, F. Shakhov, A. Averkina, V. Nikolaev, “Mechanical properties of a diamond–copper [31]