



مقایسه تجربی ریزساختار و خواص سطحی نمونه Al/Al_2O_3 تولید شده با روش‌های متالورژی پودر و تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای

سیدمحمد رضا سده‌ئی^۱، محمد خسروی^{۲*}، یداله یعقوبی‌نژاد

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند

^۲ استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند

^۳ دانشیار مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۲

چکیده

با توجه به اهمیت بالای روش‌های ساخت با پودر فلزاتی همچون آلومینیوم، در این پژوهش با استفاده از پودر آلومینیوم خالص، نمونه‌هایی با دو روش متالورژی پودر و تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای ساخته و سپس نمونه‌ها از نظر ریزساختار، سختی، مقاومت سایشی و مقاومت خوردگی مورد بررسی قرار گرفتند. روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای نسبت به روش متالورژی پودر بهبود قابل توجهی در میزان سختی، تراکم ریزساختار، افزایش مقاومت به سایش و خوردگی آلومینیوم نشان می‌دهد. این بهبود را می‌توان به سرعت و دمای بالای فرآیند تفجوشی و همچنین اعمال همزمان نیرو و دما و در نتیجه چگالی کامل‌تر ساختار نسبت داد. ضریب سایش و سختی به ترتیب از ۰/۹ و ۴۳ برینل در روش متالورژی پودر به ۰/۸ و ۴۹/۳ برینل در روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای افزایش یافته است؛ همچنین با توجه به نتایج آزمون خوردگی، مقاومت خوردگی خطی نمونه تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای بیشتر از نمونه متالورژی پودر مرسوم نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: آلومینیوم؛ متالورژی پودر؛ تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای؛ سایش؛ خوردگی.

Experimental comparison of microstructure and surface properties of Al / Al_2O_3 sample produced by powder metallurgy and spark plasma sintering methods

Sayyed Mohammad Reza Sedehi¹, Mohammad Khosravi^{2*}, Yadollah Yaghoubinezhad³

¹ MSc., Mech. Eng., Birjand University of Technology., Birjand, Iran

² Assis. Prof., Mech. Eng., Birjand University of Technology., Birjand, Iran

³ Assoc. Prof., of Materials Eng., Birjand University of Technology., Birjand, Iran

Abstract

Due to the high importance of manufacturing methods with metal powders such as aluminum, in this study, using pure aluminum powder, samples were made by two methods of powder metallurgy and spark plasma sintering, and then the samples in terms of microstructure, hardness. Abrasion resistance and corrosion resistance were evaluated. Spark plasma sintering method compared to powder metallurgy method shows significant improvement in hardness, microstructure density, increased wear resistance, and corrosion of aluminum. This improvement can be attributed to the high speed and temperature of the sintering process as well as the simultaneous application of force and temperature, resulting in a more complete density of the structure. The coefficient of wear and hardness increased from 0.9 and 43 Brinell in powder metallurgy method to 0.8 and 49.3 Brinell in spark plasma sintering method, respectively. Also, according to the results of corrosion test, the linear corrosion resistance of sintering-plasma-spark sample is higher than powder metallurgy sample.

Keywords: Aluminium; Powder metallurgy; Spark plasma sintering; Wear; Corrosion

۱- مقدمه

ساخت مواد مرکب^۱ با زمینه آلومینیوم به دلیل بهبود خواص مکانیکی، حرارتی، مغناطیسی و الکتریکی در فناوری صنایع امروزی مورد نیاز است [۱،۲]. طراحی و توسعه مواد مرکب باعث افزایش دوام و قابلیت اطمینان قطعاتی می‌شود که در شرایط سخت در صنایع هوافضا و زیست‌پزشکی کاربرد دارند [۳]. به طور کلی، یک روش ریخته‌گری برای سنتز آلومینیوم و آلیاژهای آن استفاده می‌شود. با این حال، روش ریخته‌گری باعث جداسازی و ریزترک شده و به همین دلیل، آلیاژهای آلومینیوم اغلب از طریق روش‌های متالورژی پودر ساخته می‌شوند که نه تنها برای تولید انبوه مواد آلیاژی بدون تفکیک، بلکه برای ریزساختارهای همگن قطعات پیچیده مناسب هستند [۴،۵]. روش‌های مختلفی مبتنی بر متالورژی پودر برای ساخت این نوع کامپوزیت‌ها وجود دارد که از مهمترین آن‌ها می‌توان به فرایند دو مرحله‌ای پرس سرد و تفجوشی^۲ [۶] و تفجوشی پلاسما جرقه‌ای^۳ [۷] اشاره کرد. روش‌های ساخت پودری مزایایی مانند دمای پایین فرایند، مصرف کم انرژی و استفاده زیاد از مواد، نسبت به سایر روش‌های ساخت کامپوزیت‌ها را ارائه می‌دهد [۸،۹]. در فرآیندهای متالورژی پودر، مواد تقویت‌کننده با مواد زمینه مخلوط شده و با فشار کافی (بسته به تخلخل مورد نیاز در مواد نهایی) فشرده می‌شوند تا قطعاتی یکپارچه ایجاد شود [۱۰،۱۱]. سپس نمونه‌های فشرده شده، در دمایی معمولاً زیر نقطه ذوب ماده زمینه برای مدت زمان کافی حرارت داده شده تا اتصال ذرات صورت گیرد [۱۲]. فرآیند گرمایش و نگه داشتن نمونه در دمای از پیش تعیین شده برای یک دوره زمانی مشخص به عنوان تف-جوشی شناخته می‌شود [۱۳]. میزان فشار، دما و زمان تف-جوشی از مهمترین پارامترها در فرآیند متالورژی پودر هستند [۱۴].

رحیمیان و همکاران [۱۵] تأثیر دما، زمان و اندازه ذرات جهت آماده‌سازی $Al-Al_2O_3$ توسط متالورژی پودر را مورد مطالعه قرار دادند. سان و همکاران [۱۶] نیز از متالورژی پودر برای تهیه کامپوزیت‌های آلومینیوم خالص تقویت شده با SiC استفاده کردند. یک کامپوزیت آلومینیوم تقویت‌شده با اکسید گرافن توسط متالورژی پودر ساخته شد [۱۷].

آلومینیوم می‌تواند روشی قابل قبول برای موفقیت در کاربردهای خاص این فلز محسوب شود. علیرغم دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد، توسعه صنعتی این روش به دلیل فناوری نامطلوب فعلی به طور جدی به تأخیر افتاده است [۱۸]. فرآیند اصلی متالورژی پودر به تفجوشی فاز مایع با پودرهای مخلوط شده به عنوان ماده اولیه [۱۸] و پرس گرم با پودرهای پیش‌آلیاژی تقسیم می‌شود. اگرچه تفجوشی فاز مایع، ساده و مقرر به صرفه است، اما خواص مکانیکی پایین اجزای متخلخل معمولاً قادر به استفاده برای محصولات صنعتی نبوده و به شدت به ماشینکاری بعدی متکی هستند. بلاند و همکاران [۱۹] ذکر کرده‌اند که متالورژی پودر آلومینیوم تجاری به دلیل گستردگی خواص مکانیکی، محدود شده است. در پژوهشی دیگر اسویت و همکاران [۲۰] از فورج پودری برای بهبود خواص مکانیکی آلومینیوم استفاده کرده‌اند. به عنوان یک انتخاب دیگر برای متالورژی پودر آلومینیوم، اجزای ساخته شده توسط پرس گرم با ریزساختار و خواص مکانیکی مشابه آلومینیوم ریخته‌گری دارای چگالی کامل و خواص مکانیکی خوبی هستند. با این حال، مشکل اجتناب‌ناپذیر این است که فرآیند پرس گرم فعلی برای متالورژی پودر آلومینیوم همیشه برای اطمینان از چگالی بالا نیاز به فشار بارگذاری بالا (> ۱۰ مگاپاسکال) دارد. کوک و همکاران [۲۱] پودر آلومینیوم تقویت‌شده با ۰/۴ درصد Sc را با استفاده از تفجوشی پلاسما جرقه‌ای زیر ۵۰ مگاپاسکال در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد ساخته و نشان دادند، چگالی نسبی آلومینیوم مربوطه بیش از ۹۹/۵٪ و استحکام کششی ۲۲۶ مگاپاسکال بوده است. خلیل و همکاران [۲۲] فرایند تفجوشی پلاسما جرقه‌ای را برای آلومینیوم‌های ۶۰۶۱ و ۲۱۲۴ بهینه و تأیید کردند که بهترین شرایط این فرایند در ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۳۵ مگاپاسکال رخ داده است.

استینفلد و همکاران [۲۳] با استفاده از فرآیند تفجوشی پلاسما جرقه‌ای، نمونه آلومینیوم خالص را با چگالی بالا و بدون رشد قابل توجه ذرات با موفقیت ساخته و نشان دادند با افزایش دمای تفجوشی، چگالی نسبی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. اثر سوزاندن اکسیدهای آلومینیوم و افزایش سریع دما با فشار وارد شده، رشد ذرات را در طی فرآیند تفجوشی

³ Spark plasma sintering (SPS)

¹ Composite

² Sintering

جدول ۱- ترکیب شیمیایی پودر مورد استفاده

material	Impurity content (mass%)
Al	99/5
Si	0/25
Fe	0/20
Cu	0/05
Mn	0/05
V	0/05
Other	0/03
Density (g/cm ³)	2/7
Particle size (um)	45
material	Impurity content (mass%)
Al	99/5
Si	0/25
Fe	0/20
Cu	0/05
Mn	0/05
V	0/05
Other	0/03
Density (g/cm ³)	2/7
Particle size (um)	45

۲-۲- آزمایش‌ها

به ازای هر نمونه، ۲۰ گرم پودر آلومینیوم با استفاده از دو روش تفجوشی پلاسما جرقه‌ای و متالورژی پودر مرسوم مورد استفاده قرار گرفت. جهت فشردن پودر در روش تفجوشی پلاسما جرقه‌ای، از یک قالب گرافیتی با قطر داخلی ۲۰ میلی‌متر استفاده و یک ورق فویل گرافیتی با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر بین قالب و پودر قرار داده شد تا جریان یکنواخت در پودر ایجاد و از آلودگی نمونه تولیدی جلوگیری شود. با توجه به پژوهش‌های گذشته [۲۰، ۲۱] در مورد شرایط بهینه تفجوشی پلاسما جرقه‌ای آلومینیوم، این فرایند با استفاده از نرخ گرمایش ۵۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه، زمان نگهداری ۱۰ دقیقه و پالس پایین و بالای به ترتیب ۲۰۰ mA/s & ۴۰ انجام و فشار و درجه حرارت به ترتیب در ۴۵ مگاپاسکال و ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد ثابت شد. در روش متالورژی پودر مرسوم، از قالب و سنبه با جنس CK45 و کیفیت سطح کاملاً پرداخت، استفاده شده است. بعد از تهیه مواد، پودر در قالب، تزریق و با دستگاه پرس تحت بارگذاری سرد به میزان ۴۵ مگاپاسکال قرار گرفت. فرایند متالورژی پودر و شماتیک روش تفجوشی پلاسما جرقه‌ای در شکل ۱ مشهود است. بعد از فشردن پودر و تولید نمونه خام اولیه، این قطعات به کوره لوله‌ای مدل ۱۲۵۰۵۰-TF۵/۲۵ منتقل و تحت حفاظت گاز آرگون فرآیند تفجوشی انجام می‌پذیرد. برای مشاهده تغییرات ریزساختار بعد از ساخت نمونه‌ها، قطعات بر عمود بر امتداد

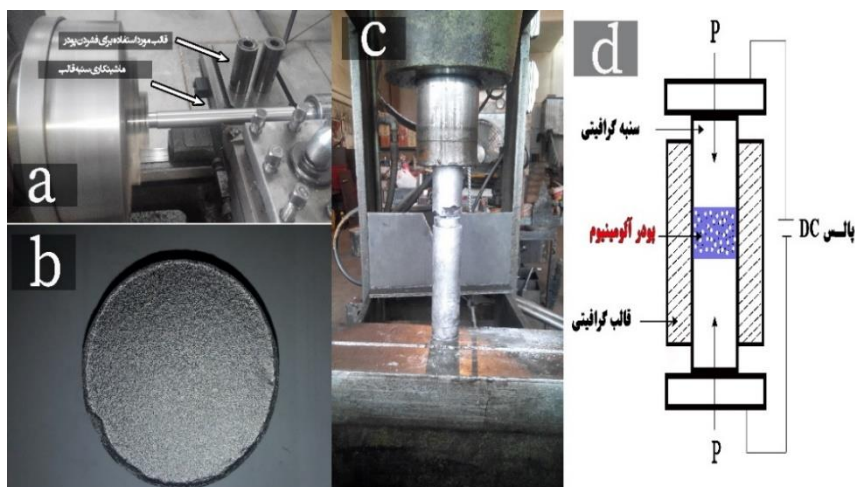
پلاسما جرقه‌ای مهار می‌کند. بعضی از قسمت‌های لایه اکسیدی در سطح ذرات آلومینیوم توسط میکروپلاسما تولید شده شکسته و با فشار وارد شده به شکل سوراخ در می‌آیند؛ بنابراین می‌توان با افزایش نفوذ بین ذرات آلومینیوم به موادی با تخلخل پایین دست یافت. در پژوهشی دیگر خادمی و همکاران [۲۴]، از روش تفجوشی پلاسما جرقه‌ای برای ساخت کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با درصد‌های مختلف نانولوله کربنی استفاده کرده‌اند. همچنین ذبیحی و همکاران [۲۵] نمونه‌های آلومینیومی مورد نیاز برای فرایند اکستروژن برشی ساده را از طریق روش متالورژی پودر مرسوم ساخته و بعد از تفجوشی به استحکام برشی ۸۰ مگاپاسکال رسیده‌اند. آن‌ها همچنین نشان دادند، هر چه ارتفاع قطعات تولیدی کمتر باشد، می‌توان به استحکام بیشتری برای نمونه‌های ساخته شده دست یافت، به همین دلیل مقطع اکستروژن را بر خلاف مقطع پرس در متالورژی پودر انتخاب کرده‌اند.

همه موارد فوق در مورد پرس و تفجوشی پودرهای آلومینیوم به تجهیزات پیچیده و گران‌قیمت متکی هستند و بازده تولید پایین آن‌ها برای برآوردن نیازهای تولید صنعتی مدرن واجد شرایط نیست. این محدودیت، هزینه ساخت نمونه از پودر را به عنوان یک فناوری شکل‌دهی تقریباً جدید به چالش کشیده است و منجر شده که این روش فعلی نتواند مزیت قابل توجهی برای صنعت آلومینیوم ایجاد کند. با این حال تا به امروز، مطالعات کمی در مورد مقایسه متالورژی پودر مرسوم (شامل دو مرحله پرس سرد و تفجوشی) و روش تفجوشی پلاسما جرقه‌ای پودر آلومینیوم انجام شده است. هدف از این تحقیق، تجزیه و تحلیل خواص سطحی (مقاومت به خوردگی، مقاومت به سایش و مقدار سختی) و ریزساختار نمونه ساخته شده با استفاده از این دو روش برای ارتقا و کاربردی نمودن صنعت متالورژی پودر آلومینیوم است.

۲- مواد و آزمایشات تجربی

۲-۱- مواد

پودر آلومینیوم با خلوص ۹۹/۵٪ و اندازه دانه ۴۵ میکرومتر و با ترکیب شیمیایی نشان داده شده در جدول ۱ به عنوان ماده اصلی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱- تصاویر (a) ماشینکاری قالب و (b) نمونه تولیدی (c) فرایند SPS (d) شماتیک فرایند SPS

میلی ولت، سرعت اسکن ۱ میلی‌ولت و مدت زمان OCP ۱۲۰۰ ثانیه انجام شد.

۳- بحث و نتیجه‌گیری

۳-۱- ریزساختار میکروسکوپ نوری

اندازه و شکل دانه یکی از مهمترین عوامل موثر بر خواص و رفتار فلزات است. کاملاً مشهور است که خصوصیات مکانیکی، شیمیایی، زیستی، رفتار سوپرپلاستیکی در دمای بالا، رفتار خوردگی و بسیاری دیگر از خصوصیات فلزات به خصوصیات ریزساختار آن‌ها، به اندازه دانه بستگی دارد [۲۶]. نتایج متالوگرافی از ریزساختار نمونه‌های تولیدی هر دو روش در شکل ۲ نمایش داده شده است. همانطور که در این تصاویر مشخص است، نمونه تولیدی با روش تفجوشی پلاسمای-جرقه‌ای نسبت به روش متالورژی پودر مرسوم دارای ساختاری یکتواخت‌تر و ریزتر است. از دیگر تفاوت‌های ساختار دو نمونه، می‌توان به ایجاد دو نوع حفره گازی و انقباضی در آن‌ها اشاره نمود. یکی از دلایل بروز این نتایج به دو مرحله‌ای بودن روش متالورژی پودر مربوط می‌شود. در نمونه متالورژی پودر مرسوم به دلیل عدم حضور نیرو در حین تفجوشی بر روی نمونه، گازهای ناشی از رطوبت به راحتی آزاد شده و باعث به وجود آمدن حفره گازی و ساختاری درشت دانه می‌شوند. این اتفاق در فرایند SPS به دلیل حبس شدن این گازها به واسطه نیروی

پرس و با استفاده از میکروسکوپ متالوگرافی معکوس ساخت شرکت Meiji ژاپن مورد بررسی قرار گرفتند. بعد از فرایند پرداخت سطح نمونه برای آشکارسازی سطح نمونه‌ها از محلول با ترکیب شیمیایی حاوی ۵-۱۰٪ HNO_3 ، ۶۵-۷۵٪ H_3PO_4 و ۵-۱۰٪ CH_3COOH استفاده شده است. در ادامه آزمایشات با هدف بررسی بیشتر فازهای موجود در نمونه از پراش اشعه ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه Explorer ساخت شرکت GNR ایتالیا و تحت شرایط $V=40Kv$ و $Current=30mA$ و برای بررسی تغییرات مورفولوژی نمونه‌های تفجوشی شده از میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی (SEM) مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN جمهوری چک دارای قدرت تفکیک در حد ۱/۵ نانومتر در ولتاژ ۱۵ کیلوولت استفاده شد. سختی نمونه‌ها با استفاده از روش برینل و با دستگاه سختی-سنج مدل INNOVATEST NEXUS 8000XL با اعمال بار ۶۱۲/۹ نیوتنی ساچمه تنگستن به قطر ۲/۵ میلی‌متر و زمان نگه داشتن ۱۵ ثانیه تحت استاندارد ASTM A370(2020) اندازه‌گیری و برای بدست آوردن میانگین متوسط، برای هر نمونه حداقل ۳ بار تست تکرار شد. تست سایش با روش پین روی دیسک در آزمایشگاه تخصصی و طبق استاندارد ASTM G99 در دمای محیط و بصورت خشک تحت نیروی ۵ نیوتن، زمان ۳۶۰۰ ثانیه و سرعت ۶۰ دور بر دقیقه با جنس ساینده پین فولادی انجام پذیرفت. آزمایش‌های خوردگی الکتروشیمیایی روی نمونه‌ها در محدوده ولتاژ ۲۵۰- تا ۲۵۰+

اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) نیز مشاهده نمی‌شود. وجود لایه های اکسیدی آلومینیوم می‌تواند در بخش شکل پذیری آتی قطعات تولید شده، محدودیت‌های فراوانی را ایجاد نماید. جهت مرجح در آلومینیوم خالص صفحات (۱۱۱) می‌باشند که پس از تف‌جوشی به صفحات (۲۰۰) در هر دو نمونه تولید شده توسط روش پلاسمای جرقه‌ای و متالورژی پودر سنتی تغییر یافته است. به عبارتی، صفحات کریستالی از صفحات پر تراکم به صفحات با تراکم کم‌تر تغییر که می‌تواند در شکل‌پذیری قطعات تولید شده با ملاحظاتی از جمله افزایش نیروی پرس و نیاز به روغنکاری همراه باشد. با تقریب پروفیل‌های پیک و گسترش کرنش به ترتیب از طریق توابع کوشی و گاوسی، می‌توان اندازه متوسط دانه (d) را از رابطه (۱) و ریزکرنش (η) را از رابطه (۲) تعیین کرد [۲۹]:

$$\beta = \frac{k \lambda}{d \cos \theta} \quad (1)$$

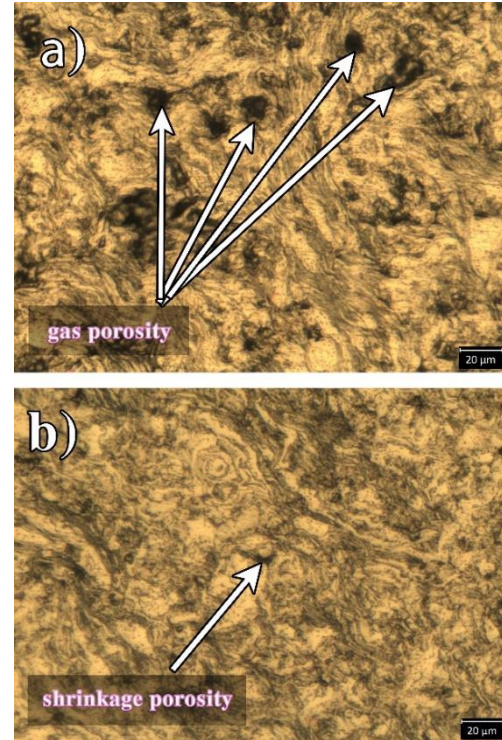
$$\frac{\beta^2}{\tan^2 \theta} = \frac{\lambda}{d} \left(\frac{\beta}{\tan \theta \sin \theta} \right) + 25\eta^2 \quad (2)$$

که در آن λ طول موج پرتو ایکس ($\lambda = 0.154 \text{ nm}$) و θ و β زاویه و سطح بزرگترین پیک است. با انجام یک تناسب برای تمام پیک‌های اندازه‌گیری شده، بعد از محاسبه d و η ، چگالی نابجایی (ρ) را می‌توان با استفاده از معادله (۳) ارزیابی نمود [۲۸]:

$$\rho = \frac{2\sqrt{3}(\eta^2)^{1/2}}{b \times d} \quad (3)$$

که در آن b بردار برگر است. با توجه به نتایج جدول ۲ و به منظور بحث بیشتر در مورد اندازه دانه در این کار تصاویر SEM از هر دو نمونه در شکل ۴ نشان داده شده است. در این تصاویر تخلخل با خطوط زرد و شکستگی‌های ساختاری با دایره‌های قرمز مشخص شده‌اند.

وارد بر نمونه در حین تف‌جوشی، به صورت انقباضی ظاهر شده و ساختاری ریزتر را موجب می‌شوند [۲۷].



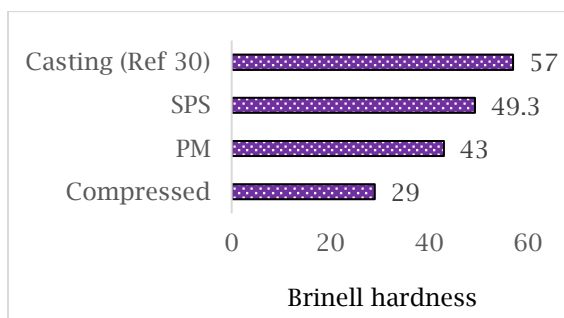
شکل ۲- تصاویر متالوگرافی نمونه‌های (a) PM و (b) SPS

۳-۲- XRD

برای بررسی تغییرات فازهای به وجود آمده و محاسبه اندازه دانه و تنش‌های پسماند در طی دو فرایند متالورژی پودر مرسوم و تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای، آنالیز طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD) بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. در شکل ۳، طیف-سنجی پراش پرتو ایکس نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد فاز کاربید آلومینیوم (Al_4C_3) در نمونه‌ی تولیدی با روش تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای مشاهده نشده است، که علت این موضوع به کنترل صحیح شرایط ساخت و جلوگیری از نفوذ کربن در این روش است. همانطور که در شکل ۳ مشهود است، می‌توان پیک ۳۸ و ۴۰ درجه را قوی‌ترین پیک موجود در آلومینیوم دانست. علاوه بر این پیک-ها، گراف‌های ضعیف‌تری در زوایای ۶۵ و ۷۸ درجه نیز مشاهده می‌شود. در آنالیز XRD، عریض شدن بلندترین پیک، عمدتاً به اندازه کوچک دانه‌ها و اعوجاج شبکه نسبت داده می‌شود [۲۸]. علاوه بر این، با توجه به کنترل شرایط تف‌جوشی

۳-۳- سختی سنجی

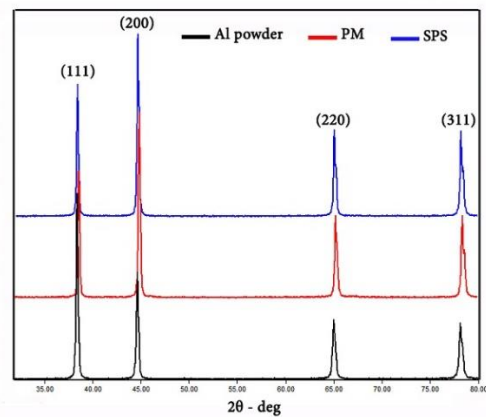
ذبیحی و همکاران [۲۵] در پژوهشی با تولید نمونه‌های آلومینیوم خالص از طریق روش متالورژی پودر مرسوم و سپس تغییر شکل پلاستیک شدید با روش اکستروژن برشی ساده توانستند، سختی ۴۱ برینل بعد از تفجوشی را نهایتاً به ۴۶/۵ برینل بعد از ۳ پاس اکستروژن ساده برشی^۱ برسانند، در حالی- که در این پژوهش، سختی نمونه خام پرس شده از ۲۹ برینل به ترتیب به ۴۳ و ۴۹/۳ برینل بعد از متالورژی پودر و تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای رسیده است. نتایج سختی سنجی برینل بر روی نمونه‌ها در مراحل مختلف در شکل ۵ نمایش داده شده است. این افزایش مقدار سختی در روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای به دلیل ریزساختار همگن و اندازه کوچکتر دانه‌های نمونه است؛ همچنین برای درک بهتر از تغییرات سختی در آلومینیوم، سختی آلومینیوم ریخته گری شده نیز گزارش شده است [۳۱].



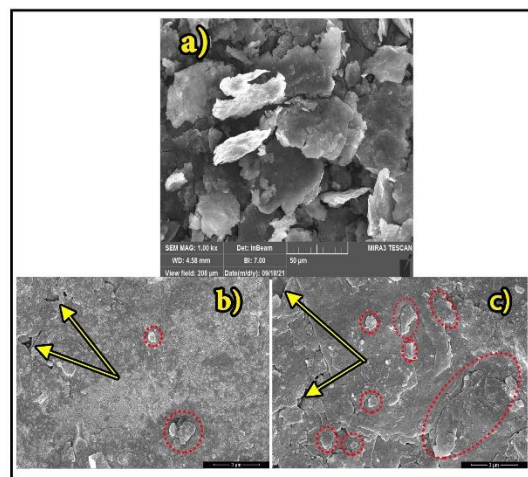
شکل ۵- نتایج آزمون سختی سنجی برینل

۳-۴- نتایج آزمون سایش

اشکال ۶ و ۷ به ترتیب عمق سایش و ضریب اصطکاک به همراه تصویر SEM سطوح نمونه‌های تولیدی با روش متالورژی پودر مرسوم و تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای را تحت بار ۵ نیوتن و مدت زمان ۳۶۰۰ ثانیه نشان می‌دهد. واضح است که میزان سایش در نمونه تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای کمتر از نمونه متالورژی پودر مرسوم بوده که این امر نشان دهنده بهبود مقاومت در برابر سایش است. همانطور که ملاحظه می‌شود، نتایج در نمونه تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای، سطوح سایش نسبتاً صاف‌تری را به نمایش می‌گذارند و در مقایسه با تعداد



شکل ۳- نتایج آزمون XRD

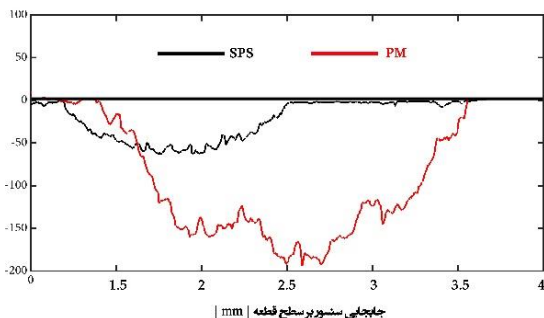


شکل ۴- تصاویر SEM (a) پودر اولیه، نمونه (b) SPS، (c) PM

جدول ۲- مقادیر تنش پسماند حاصل از آزمون XRD

Parameter	PM	SPS
Burger vector (b)	2/871	2/871
Wavelength (λ)	0/154	0/154
Peak width - β (rad)	0/00174	0/00698
Peak angle - θ (rad)	0/3926	0/3883
Medium grain size - d (nm)	95/505	23/833
Thin strain - η (%)	0/0002	0/0011
Dislocation density - ρ (m^{-2})	0/0000013	0/0000554

^۱ Simple shear extrusion (SSE)



شکل ۶- عمق ساییش (a) PM (b) SPS

۳-۵- نتایج آزمون خوردگی

در شکل ۸، تست خوردگی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای دو نمونه نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری خوردگی، شیب‌های تافل در ناحیه خطی منحنی‌های قطبش رسم شده و مقاومت قطبش بر اساس فرضیه SternGreay و معادلات (۶) - (۴) محاسبه شد [۳۲،۳۳].

$$R_p = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c) i_{corr}} \quad (۴)$$

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (۵)$$

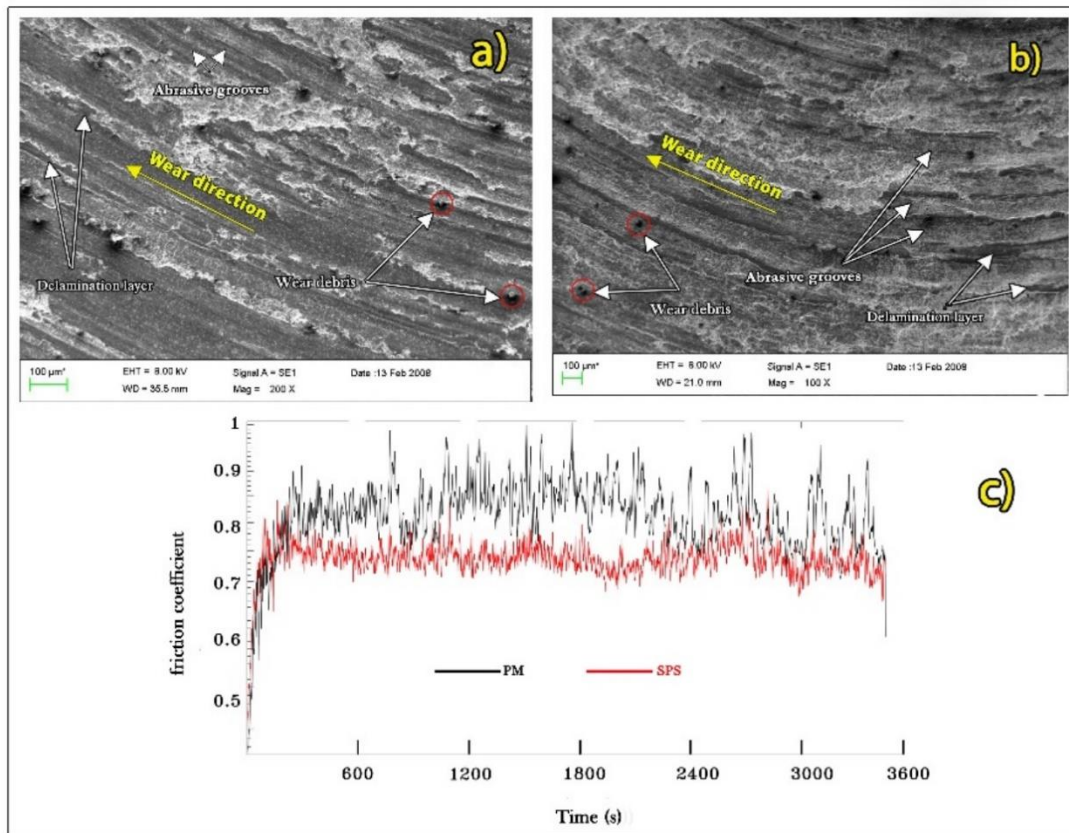
$$B = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c)} \quad (۶)$$

در معادلات فوق R_p (Kohm.cm^2) مقاومت قطبش خطی (LPR) نمونه تولیدی، b_a و b_c شیب‌های تافل آندی و کاتدی، i_{corr} ($\mu\text{A/cm}^2$) چگالی جریان خوردگی و E_{corr} پتانسیل خوردگی است. پارامترهای الکتروشیمیایی، مانند i_{corr} ، E_{corr} ، R_p ، b_a ، b_c و نرخ خوردگی در جدول ۶ ارائه شده است.

زیادی شیار عمیق در نمونه متالورژی پودر مرسوم، سطوح لایه-لایه سطحی و بزرگ روی سطوح ایجاد می‌شود. بنابراین، وجود مناطق شیاری و لایه‌لایه در امتداد مسیر ساییش نشان می‌دهد که مکانیسم‌های غالب ساییش در نمونه تف‌جوشی پلاسمای-جرقه‌ای لایه‌لایه شدن و ساییدگی است. مقایسه سطوح ساییش نمونه‌های ساخته شده، نشان داد که مقاومت ساییش قطعات تولیدی به روش تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای نسبت به نمونه متالورژی پودر مرسوم به طور قابل توجهی بهبود یافته است. این بهبود را می‌توان به افزایش سختی و بهبود ریزساختار بر اساس تکنیک تولید سریع نسبت داد. کاهش اندازه دانه باعث افزایش مقاومت در برابر ساییش نمونه تف‌جوشی پلاسمای-جرقه‌ای شده است. نتایج تحلیلی ساییش نمونه‌های تولیدی در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج عمق نفوذ و کاهش وزن پس از آزمون ساییش، نشان‌دهنده آن است که در نمونه تف-جوشی پلاسمای جرقه‌ای حداکثر عمق نفوذ و کاهش وزن ۶۸۰ میکرومتر و ۰/۰۰۶ گرم است که این مقادیر برای نمونه متالورژی پودر مرسوم به ۱۸۰۰ میکرومتر و ۰/۰۲ گرم می‌رسد که این نتایج ناشی از نرم بودن و ساییش بیشتر نمونه متالورژی پودر مرسوم است. در این شکل همچنین عرض شیاری ایجاد شده در آزمون ساییش برای هر دو نمونه استخراج می‌شود، به طوری که عرض شیار مقادیر ۳ و ۱/۵ میلی‌متر را به ترتیب برای نمونه متالورژی پودر مرسوم و تف‌جوشی پلاسمای جرقه-ای ثبت کرده است.

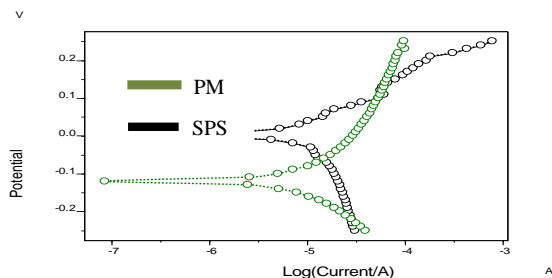
جدول ۳- مقادیر عددی آزمون ساییش

Process	Initial weight (g)	Final weight (g)	weight loss (g)
SPS	۱۸/۰۴۲۴	۱۸/۰۳۶۳	۰/۰۰۶۱
PM	۱۴/۶۶۵۹	۱۴/۶۴۵۷	۰/۰۲۰۲



شکل ۷- تصاویر SEM از مسیر سایش نمونه (a) PM (b) SPS و (c) نمودار ضریب اصطکاک

تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای حدود $0.2/30$ (Kohm.cm²) است. این مقایسه نشان می‌دهد که مقاومت خوردگی خطی نمونه تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای بیشتر از نمونه متالورژی پودر مرسوم است. علاوه بر این، نرخ خوردگی نمونه‌های استخراج شده از نرم افزار Corroview در شکل ۱۳ و جدول ۶ نشان داده شده است. همانطور که به وضوح نشان داده شده است، ویژگی‌های روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای می‌تواند نرخ خوردگی را کاهش دهد.



شکل ۸- نتایج آزمون خوردگی

مقادیر این جدول نشان می‌دهد که پتانسیل خوردگی از 310 میلی‌ولت در نمونه متالورژی پودر به 80 میلی‌ولت برای نمونه تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای افزایش یافته است که نشان‌دهنده آن است که خوردگی از نظر ترمودینامیکی کاهش می‌یابد. تحقیقات نشان داده است که اگر پتانسیل خوردگی افزایش و چگالی جریان خوردگی سیر نزولی داشته باشد، خوردگی نمونه کاهش می‌یابد [۳۴،۳۵]؛ بنابراین، همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، اگر منحنی به سمت چپ و بالا جابه‌جا شود، رفتار خوردگی بهبود می‌یابد. طبق جدول ۶، چگالی جریان از $28/2 \mu A/cm^2$ (نمونه متالورژی پودر مرسوم) به حدود $0.22 \mu A/cm^2$ در نمونه تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای کاهش یافته است. یکی از بهترین روش‌ها برای مقایسه مقاومت به خوردگی مواد، روش LPR است. همانطور که در جدول ۶ نشان داده شده است، LPR نمونه متالورژی پودر مرسوم برابر با $1/58$ (Kohm.cm²) است، در حالی که این مقدار در نمونه

۴- نتایج

با توجه به اهمیت ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی، در این پژوهش نمونه‌های آلومینیوم با استفاده از روش متالورژی پودر مرسوم و تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای که از راه‌هایی متداول و موثر جهت ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌باشند، ساخته و اثرات دو فرایند بر ریزساختار و سختی نمونه‌های تولیدی مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه‌گیری زیر حاصل شد:

- ۱- با توجه به جمع‌بندی نتایج پژوهش می‌توان روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای را باعث ارتقای خواص مکانیکی و موجب دانسیته نسبتاً کامل نمونه و همچنین سرعت بالای ساخت معرفی نمود.
- ۲- نتایج متالوگرافی و تصاویر SEM تهیه شده از ریزساختار نمونه‌های تولیدی، معرف کاهش اندازه دانه و کاهش حفرات در روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای نسبت به روش متالورژی پودر مرسوم است که این موضوع سبب افزایش سختی نمونه تولید شده است.
- ۳- عدد سختی ثبت شده برای نمونه‌های تولیدی، از ارتقای عدد ۲۹ برینل به ازای نمونه خام فشرده شده در پرس سرد به ۴۳ برینل در روش متالورژی پودر مرسوم و ۴۹/۳ برینل در روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای حکایت دارد.
- ۴- نتایج آزمون سایش نیز نشان‌دهنده افت شدید کیفیت سایش در نمونه متالورژی پودر مرسوم است، به طوری که عمق سایش و میزان کاهش وزن پس از این آزمون در نمونه متالورژی پودر مرسوم نسبت به روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای به میزان ۱۱۰۰ میکرومتر و ۰/۰۱۴۱ گرم افزایش یافته است.
- ۵- با توجه به نتایج آزمون خوردگی، مقاومت خوردگی خطی نمونه تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای بیشتر از نمونه متالورژی پودر مرسوم نشان داده شده است.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از شرکت نانو سطوح شرق ایران برای تامین پودر آلومینیوم و همچنین سرکارخانم محدثه مرادقلی (شهرستان زاهدان) که با نظرات سازنده خود نویسندگان را بهره‌مند ساخته اند، تقدیر ویژه نمایند.

۶- مراجع

- [1] Raj, S. A., Jana, D. C., Barick, P., & Saha, B. P. (2018). Microstructure evolution in densification of SiC ceramics by aluminium vapour infiltration and investigation of mechanical properties. *Ceram. Int*, 44(8), 9221-9226.
- [2] Akinwamide, S. O., Abe, B. T., Akinribide, O. J., Obadele, B. A., & Olubambi, P. A. (2020). Characterization of microstructure, mechanical properties and corrosion response of aluminium-based composites fabricated via casting—a review. *Int. J. Adhes. Adv Manuf Technol*, 109(3), 975-991.
- [3] Saheb, N., & Hayat, U. (2017). Electrical conductivity and thermal properties of spark plasma sintered Al₂O₃-SiC-CNT hybrid nanocomposites. *Ceram Interna*, 43(7), 5715-5722.
- [4] C. Lall and W. Health, *Int. J. Powder Metall.* 36, 45 (2000)
- [5] F. V. Beaumont, *Int. J. Powder Metall.* 36, 41 (2000).
- [6] Kumar, C. A. V., & Rajadurai, J. S. (2016). Influence of rutile (TiO₂) content on wear and microhardness characteristics of aluminium-based hybrid composites synthesized by powder metallurgy. *Trans. Nonfer Met Soci China*, 26(1), 63-73.
- [7] Jiang, H., Xu, Z., Xiu, Z., Jiang, L., Gou, H., Zhou, C., & Wu, G. (2018). Effects of pulse conditions on microstructure and mechanical properties of Si₃N₄/6061Al composites prepared by spark plasma sintering (SPS). *J. Alloys Compd*, 763, 822-834.
- [8] Abdullah, Y., & Kamarudin, N. (2012). Al/B4C composites with 5 And 10 wt% reinforcement content prepared by powder metallurgy. *J. Nuc and Tech*, 9(01), 43-48. [9] R.Q. Guo, P.K. Rohatgi, D. Nath, *J. Mater. Sci.* 32 (1997) 3971-3974.
- [10] Sayyed Mohammad Reza Sedehi, Mohammad Khosravi, Yadollah Yaghoobinezhad, Mechanical properties and microstructures of reduced graphene oxide reinforced titanium matrix composites produced by spark plasma sintering and simple shear extrusion, *Ceram Interna*, Volume 47, Issue 23, 2021, P 33180-33190.
- [11] Saboori, A., Novara, C., Pavese, M., Badini, C., Giorgis, F., & Fino, P. (2017). An investigation on the sinterability and the compaction behavior of aluminum/graphene nanoplatelets (GNPs) prepared

- role of lean process improvement in implementation of evidence-based practices in behavioral health care. *J. Beha Health Serv & Res*, 42(4), 504-518.
- [24] Khademi DA, Babakhani AB. Investigation of Mechanical Properties of Al-Al₂O₃ Composites Synthesized By Spark Plasma Sintering. *J. New Mater.* 2017 Jan 20;7(26):49-58.
- [25] Majed Zabihi, Esmaeil Emadoddin, Fathallah Qods, Processing of Al/Al₂O₃ Composite Using Simple Shear Extrusion (SSE), Manufactured by Powder Metallurgy (PM), *Metall. Mater. Inter*, <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00299-y>
- [26] Langdon TG. The processing of ultrafine-grained materials through the application of severe plastic deformation. *J Mater Sci* 2007;42:338897.
- [27] Gürbüz, M., Can Şenel, M., & Koç, E. (2018). The effect of sintering time, temperature, and graphene addition on the hardness and microstructure of aluminum composites. *J. Compos. mater*, 52(4), 553-563.
- [28] Liu, J., & Liang, C. (2017). Microstructure characterization and mechanical properties of bulk nanocrystalline aluminium prepared by SPS and followed by high-temperature extruded techniques. *Materials Letters*, 206, 95-99.
- [29] F. Zhou, J. Lee, S. Dallek, E.J. Lavernia, *J. Mater. Res.* 16 (12) (2001) 3451-3458.
- [30] Dark, T. A., Beamish, R. J., McFarlane, G. A., Nelson Jr, R. E., Anderson, E., West, C. W., ... & Kudo, G. US DEPARTMENT OF COMMERCE Malcolm Baldrige, Secretary.
- [31] Thiago M. Ribeiro, Eduardo Catellan, Amauri Garcia, Carlos. The effects of Cr addition on microstructure, hardness and tensile properties of as-cast Al-3.8wt.%Cu-(Cr) alloys, *j m a t e r r e s t e c h n o l . 2 0 2 0 ; 9 (3) : 6 6 2 0 - 6 6 3 1*
- [32] Cheng, L., Liu, C., Han, D., Ma, S., Guo, W., Cai, H., & Wang, X. (2019). Effect of graphene on corrosion resistance of waterborne inorganic zinc-rich coatings. *J. Alloys Compd*, 774, 255-264.
- [33] Wen, L., Wang, Y. M., Liu, Y., Zhou, Y., Guo, L. X., Ouyang, J. H., & Jia, D. C. (2011). EIS study of a self-repairing microarc oxidation coating. *Corros. Sci.*, 53(2), 618-623.
- [34] Zhang, Y., Chen, F., Zhang, Y., & Du, C. (2020). Influence of graphene oxide additive on the tribological and electrochemical corrosion properties of a PEO coating prepared on AZ31 magnesium alloy. *Tribol Interna*, 146, 106135.
- [35] Yaghoubinezhad, Y., & Afshar, A. (2015). Experimental design for optimizing the corrosion resistance of pulse reverse electrodeposited graphene oxide thin film. *J. Solid State Electrochem.*, 19(5), 1367-1380.
- by powder metallurgy. *J. Mater. Eng. Perform.*, 26(3), 993-999.
- [12] Bunakov, N. A., Kozlov, D. V., Golovanov, V. N., Klimov, E. S., Grebchuk, E. E., Efimov, M. S., & Kostishko, B. B. (2016). Fabrication of multi-walled carbon nanotubes-aluminum matrix composite by powder metallurgy technique. *Resu phys*, 6, 231-232.
- [13] A.E. Nassar, E.E. Nassar, *J. King Saud Univ. – Eng. Sci.*, (2015).
- [14] Dixit, M., & Srivastava, R. K. (2018, June). Effect of compaction pressure on microstructure, density and hardness of copper prepared by powder metallurgy route. In *IOP conference series: Mater. Sci. Eng (Vol. 377, No. 1, p. 012209)*. IOP Publishing.
- [15] Rahimian, M., Ehsani, N., Parvin, N., & reza Baharvandi, H. (2009). The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of Al-Al₂O₃ composites, made by powder metallurgy. *J. Mater. Proce Tech*, 209(14), 5387-5393.
- [16] Sun, C., Song, M., Wang, Z., & He, Y. (2011). Effect of particle size on the microstructures and mechanical properties of SiC-reinforced pure aluminum composites. *J. Mater. Eng. Perform*, 20(9), 1606-1612.
- [17] Kwon, H., Mondal, J., AlOgab, K. A., Sammelseg, V., Takamichi, M., Kawaski, A., & Leparoux, M. (2017). Graphene oxide-reinforced aluminum alloy matrix composite materials fabricated by powder metallurgy. *J. Alloys Compd*, 698, 807-813.
- [18] Qian, M., & Schaffer, G. B. (2010). Sintering of aluminium and its alloys. In *Sintering of advanced materials* (pp. 291-323). Woodhead Publishing.
- [19] Boland, C. D., Hexemer Jr, R. L., Donaldson, I. W., & Bishop, D. P. (2013). Industrial processing of a novel Al-Cu-Mg powder metallurgy alloy. *Mater. Sci. Eng: A*, 559, 902-908.
- [20] Sweet, G. A., Amirkhiz, B. S., Williams, B. W., Taylor, A., Hexemer, R. L., Donaldson, I. W., & Bishop, D. P. (2019). Microstructural evolution of a forged 2XXX series aluminum powder metallurgy alloy. *Mater. Charact*, 151, 342-350.
- [21] Cooke, R. W., Kraus, N. P., & Bishop, D. P. (2016). Spark plasma sintering of aluminum powders prealloyed with scandium additions. *Mater. Sci. Eng: A*, 657, 71-81.
- [22] Khalil, A., Hakeem, A. S., & Saheb, N. (2011). Optimization of process parameters in spark plasma sintering Al6061 and Al1214 aluminum alloys. *Adv. Mater. Res (Vol. 328, pp. 1517-1522)*. Trans Tech Publications Ltd.
- [23] Steinfeld, B., Scott, J., Vilander, G., Marx, L., Quirk, M., Lindberg, J., & Koerner, K. (2015). The